



IRANIAN FOUNDRYMEN'S
SOCIETY

Founding Research Journal

Parametric Investigation of Cooling Slope Casting Method on the Microstructure and Hardness Values of Al-A380 Alloy

Nader Raki¹, Amin Kolahdooz^{2*}

1. M.Sc. Student, Department of Mechanical Engineering, Khomeinishahr Branch, Islamic Azad University, Khomeinishahr, Isfahan, Iran.
2. Assistant Professor, Young Researchers & Elite Club, Khomeinishahr Branch, Islamic Azad University, Khomeinishahr, Isfahan, Iran.

Received: 17 November 2017
Accepted: 23 February 2018

Abstract:

A380 Aluminum alloy is suited for producing of different parts with proper strength and low weight because of having 8.5% silica and a suitable temperature range. Also, due to the wide usage of Al-A380 alloy in various industries such as automobile and aerospace industries, the use of some methods to improve the mechanical properties of this alloy can help to develop its applications. In the process of semisolid forming, by applying shear stress on alloy, dendritic structures converted to the globular ones that have better properties than the structure of common casting. The main objective of this study is to improve the microstructure and mechanical properties and determine the desired levels of propagation temperature and slope length in a semi-solid casting of Al-A380 alloy with the aid of a cooling slope method. The grain diameter, hardness and porosity in the samples were considered as important output characteristics in this study. Investigation of the microstructure of Al-A380 alloy in this study showed that the temperature of 605°C on the 600mm length and using the coolant system is the most appropriate casting that can be the best condition for this alloy. It is because of in this temperature the least grain diameter (32µm) is made. The hardness in this condition was obtained around 98HB that can be related to the effect of the shear stress rate.

Keywords:

Semi-solid casting,
Cooling slope plate,
Al-A380 Alloy,
Hardness,
Grain size.

Journal homepage: www.foundingjournal.ir

Please cite this article using:

Raki N., Kolahdooz A., Parametric investigation of cooling slope casting method on the microstructure and hardness of Al-A380 alloy, in Persian, Founding Research Journal, 2018, 2(2) 109-121.
DOI: 10.22034/frj.2018.106034.1009

* Corresponding Author:

Amin Kolahdooz, Assistant Professor

Address: Khomeinishahr Branch, Islamic Azad University,
P.O. Box 84715/119, Khomeinishahr, Isfahan, Iran. Tel/Fax: +98(31)33660011.

E-mail: aminkolahdooz@iaukhsh.ac.ir



انجمن علمی ریخته‌گری ایران

فصل‌نامه علمی پژوهشی

پژوهش‌نامه ریخته‌گری

بررسی عاملی روش ریخته‌گری سطح شیب‌دار خنک شونده بر ریزساختار و مقادیر سختی آلیاژ آلومینیم A380

نادر راکی^۱، امین کلاه‌دوز^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، واحد خمینی‌شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران
 ۲- استادیار، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد خمینی‌شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران aminkolahdooz@iaukhsh.ac.ir (نویسنده مکاتبه کننده)

چکیده:

دریافت: ۱۳۹۶/۰۸/۲۶

پذیرش: ۱۳۹۶/۱۲/۰۴

آلیاژ آلومینیم A380 با حدود ۸/۵ درصد سیلیسیم و بازه دمائی مناسب، آلیاژی مطلوب برای تولید قطعات مختلف با استحکام مناسب و وزن کم است. همچنین با توجه به کاربرد وسیع این آلیاژ در صنایع مختلف نظیر صنایع خودروسازی و صنایع هوا فضا، استفاده از روش‌هایی جهت بهبود خواص مکانیکی این آلیاژ، می‌تواند به توسعه کاربرد آن کمک شایانی نماید. در فرآیندهای شکل‌دهی نیمه‌جامد، با اعمال تنش برشی به آلیاژ به دلیل شکسته شدن ریزساختار، این خواص بهبود می‌یابد. هدف اصلی در این تحقیق، بهبود ریزساختار و خواص مکانیکی و تعیین سطوح مطلوب متغیرهای دمای بارریزی و طول سطح شیب‌دار در ریخته‌گری نیمه‌جامد آلیاژ آلومینیم A380 با کمک سطح شیب‌دار خنک‌کننده است. قطر دانه‌ها، سختی و میزان تخلخل در نمونه‌ها به عنوان مشخصه‌های مهم خروجی در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفتند. بررسی ریزساختاری آلیاژ آلومینیم A380 در این پژوهش نشان داده است که از میان سه دمای بارریزی مختلف، دمای 605°C در طول بارریزی ۶۰ سانتیمتر و همراه با عبور مایع خنک‌کننده، مناسب‌ترین حالت ریخته‌گری برای این آلیاژ است. چرا که در این دما ضمن برخورداری از کمترین قطر دانه $32\mu\text{m}$ ، بیشترین افزایش مقدار سختی یعنی ۹۸HB حاصل شد. دلیل آن را می‌توان به تاثیر هم زمان نرخ تنش برشی و مدت زمان اعمال آن مربوط کرد.

واژه‌های کلیدی:

شکل‌دهی نیمه‌جامد،
 سطح شیب‌دار،
 آلومینیم A380،
 سختی،
 اندازه دانه.

۱- مقدمه

شکل‌دهی مکانیکی هستند. در این فرآیندها ابتدا فلز یا آلیاژ در شرایط کنترل شده‌ای ذوب شده و سپس درست از بالای خط لیکوئیدوس به مذاب تنش برشی کافی وارد می‌شود. در ادامه مذاب با سرعت مشخصی سرد شده و هم‌زمان اعمال تنش برشی بر آن باعث تبدیل ذرات دندریتی به شکل رزی و در نهایت کروی می‌شود [۱]. مکانیزم‌هایی، برای شکسته شدن دندریت‌ها در اثر اعمال تنش در نظر گرفته شده است [۲]. از جمله این مکانیزم‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره نمود [۳-۵]:

- در اثر جریان یافتن مذاب نیرویی بر بازوهای دندریت‌ها اعمال شده و سبب شکسته شدن آنها می‌شود. جریان مذاب باعث افزایش حرارت در انتهای بازوهای دندریتی و ذوب مجدد آنها می‌شود.

انجماد اکثر آلیاژها صنعتی به صورت دندریتی است. در اثر اعمال تنش در ناحیه دو فاز جامد-مذاب (به هر روش) این دندریت‌ها می‌توانند به صورت تکه‌های مجزا شکسته سپس شروع به رشد کنند. در اثر ادامه اعمال تنش و سرد کردن مذاب، ذرات دندریتی در ابتدا به صورت رزی شکل رشد نموده و با ادامه فرآیند به صورت کروی در می‌آید [۱]. یکی از این روش‌های ایجاد ریز ساختارهای غیردندریتی با ذرات کروی شکل، استفاده از انواع فرآیندهای نیمه‌جامد است. فرآیندهای نیمه‌جامد از جمله روش‌های به نسبت نوین تولید مواد هستند که دارای عمری در حدود چهل سال است. این روش‌ها مشتمل بر شکل‌دهی مخلوطی نیمه‌جامد-نیمه‌مذاب با استفاده از روش‌های ریخته‌گری و

در ریخته‌گری نیمه‌جامد بسیار مناسب هستند. نیاز روزافزون صنایع هواپیماسازی و خودروسازی به آلیاژهای سبک باعث تمرکز بیشتر محققان بر مطالعه روی آلیاژهای آلومینیم شده است [۹].

هم‌اکنون، روش‌های مختلفی برای دستیابی به ساختاری غیردندریتی در حالت نیمه‌جامد وجود دارد. از آن جمله می‌توان به روش‌های هم‌زدن مکانیکی، هم‌زدن مغناطیسی، روش اسپری کردن، روش سطح شیب‌دار خنک‌کننده، استفاده از امواج فراصوتی و غیره نام برد [۱۱، ۱۰، ۱]. از این میان این روش‌ها، روش سطح شیب‌دار خنک‌کننده از روش‌های نسبتاً ساده و ارزان برای تولید قطعات به روش نیمه‌جامد است [۱۲]. کلاه‌دوز و همکاران [۱۳] تاثیر عملیات گرمایش مجدد بر ریزساختار و مقدار سختی آلیاژ آلومینیم A۳۵۶ را با روش ریخته‌گری سطح شیب‌دار مورد مطالعه قرار دادند. نتایج ایشان نشان می‌دهد که از نظر اندازه، توزیع و شکل ذرات، نمونه تهیه شده با دمای قالب 300°C که به مدت ۱۰ دقیقه در دمای 80°C تحت عملیات گرمایش مجدد قرار گرفته بود، بهترین شرایط را دارا است. نوروزی و همکاران [۱۴] به بررسی تاثیر درجه حرارت در ریخته‌گری نیمه‌جامد آلیاژ آلومینیم A۳۵۶ روی سطح شیب‌دار با سیستم خنک‌کننده پرداختند. ایشان در این تحقیق تاثیر درجه حرارت شامل دمای ریخته‌گری، دمای مذاب، و دمای سطح شیب‌دار را بر ریزساختار بررسی نموده و اعلام کردند که ساختار شاخه‌ای فاز آلفا اولیه در ریخته‌گری با سطح شیب‌دار به ساختار غیرشاخه‌ای تبدیل می‌شود. همچنین مشخص شد که دمای بارریزی و دمای سطح شیب‌دار بر قطر و مورفولوژی فاز آلفا اولیه تاثیر می‌گذارد و سبب کاهش ۲۲ درصدی قطر ذرات و افزایش ۸/۵ درصدی فاکتور شکل در ضعیف‌ترین حالت می‌شود. بهترین نتیجه ایشان در دمای بارریزی 625°C و دمای قالب 200°C با استفاده از سیستم خنک‌کاری حاصل شد. در این شرایط، قطر ذرات ۸۸ میکرومتر و فاکتور شکل ۰/۶۸ اعلام شده است. ایشان در ادامه کار خود [۱۵] بهینه‌سازی متغیرهای ریخته‌گری نیمه‌جامد سطح شیب‌دار روی آلیاژ آلومینیم A356 را مورد مطالعه قرار دادند. ایشان به بررسی تاثیر متغیرهای دما، طول و زاویه بارریزی و دمای قالب بر قطر ذرات پرداختند و اعلام داشته‌اند که شرایط بهینه در دمای 630°C ، زاویه سطح شیب‌دار 60° ، طول ۴۹۵mm و

• بازوهای دندریتی در اثر تنش اعمالی خم شده و تغییر شکل مومسان می‌دهند. در اثر ایجاد نابجایی‌ها (در این دما نابجایی‌ها به راحتی صعود و حرکت می‌کنند) مرزدانه‌هایی در بازوهای دندریتی ایجاد می‌شود. هر گاه که این تغییر زاویه به حدود ۲۰ درجه برسد، انرژی این مرز دو برابر انرژی فصل مشترک مذاب جامد شده و لذا مذاب، مرزدانه را خیس کرده و به سرعت در امتداد آن حرکت می‌کند. بازوی دندریت جدا شده و با ادامه یافتن اعمال تنش این ذرات به حالت رزی و سپس کروی تغییر شکل می‌دهند.

• رشد اولیه بازوهای دندریتی با ایجاد حالت رزی شکل ادامه می‌یابد. در نرخ برش بالا و یا مدت زمان نگهداری زیاد (سرعت سرد کردن کم) ساختاری کروی با مقداری مذاب محبوس شده در آن به وجود می‌آید. این امر به علت شکسته شدن بازوهای دندریتی در اثر اعمال تنش، ذوب مجدد آن‌ها و ادامه یافتن انجماد صورت می‌گیرد. نکته کلیدی در این فرآیندها، دستیابی به یک ساختار غیردندریتی و کروی است. این ساختار در کنار پایین بودن دمای فرآیند و کاهش مصرف انرژی گرمایی، رفتار ویسکوز مواد هنگام سیلان به قالب، کاهش میزان حلالیت گاز و حفرات گازی، کاهش انقباض حین انجماد نسبت به روش ریخته‌گری، باعث افزایش عمر قالب و همچنین بهبود خواص مکانیکی قطعه تولیدی می‌شود. دلیل این امر این است که انجماد دندریتی اغلب منجر به عدم مذاب‌رسانی کامل و به تبع آن ایجاد عیوب انقباضی در بین بازوهای دندریتی می‌شود [۶]. لذا این فرآیندها به عنوان یک روش موفق و قابل اعتماد جهت ساختن قطعاتی با ابعاد نزدیک به قطعه‌ی نهایی و ریزساختاری یکنواخت مورد توجه قرار گرفته‌اند [۷]. به منظور تهیه‌ی دوغاب نیمه‌جامد، به‌طور کلی دو روش رئوکستینگ و تیکسوکستینگ استفاده می‌شود. در روش رئوکستینگ ساختار نیمه‌جامد مستقیماً از مذاب بدست می‌آید. اما در روش تیکسوکستینگ ابتدا آلیاژ نیمه‌جامد به صورت شمش ریخته‌شده و سپس تا دمای نیمه‌جامد حرارت داده می‌شود، در مرحله‌ی بعد تحت فرآیندهای خاصی به ساختار جامد غیردندریتی تبدیل و نهایتاً در قالب تزریق و یا شکل‌دهی می‌شود [۸]. فرآیندهای نیمه‌جامد در بسیاری از فلزات از جمله منیزیم، مس، آلومینیم، چدن و بسیاری از آلیاژهای آهنی کاربرد دارد. این آلیاژها به علت دامنه‌ی انجمادشان برای استفاده

ریزساختار و خواص مکانیکی نمونه بررسی شده است. نتایج در تحقیقات کلاه‌دوز و همکاران نشان می‌دهد که با تغییر فشار از ۱۰۰ به ۱۵۰ مگاپاسکال، میانگین قطر ذرات حدود ۷ درصد کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش دما، به ترتیب سختی و نیروی پرس، ۱۳ و ۲۱ درصد کاهش می‌یابد. به علاوه با افزایش دما و زمان نگهداری، قطر ذرات فاز آلفای اولیه افزایش یافته که سبب کاهش سختی می‌شود. در این تحقیق با توجه به نیاز صنایع به دانش کافی در زمینه ریخته‌گری نیمه جامد روی سطوح شیب‌دار، به بررسی عاملی متغیرهای این فرایند بر ریزساختار و سختی آلیاژ A380 پرداخته شده است.

۲- مواد و روش تحقیق

در این تحقیق از آلیاژ آلومینیم A380 استفاده شد که ترکیب شیمیایی آن در جدول (۱) ارائه شده است. با توجه به نمودار تعادلی آلومینیم-سیلیسیم و مقدار ۸/۴۲ درصد سیلیسیم، دمای سالییدوس و لیکوئیدوس این آلیاژ به ترتیب ۵۷۷ و ۶۲۰°C بدست می‌آید. به دلیل اینکه استفاده از نمودار دوتایی تعادلی برای تعیین دمای شروع و پایان انجماد برای آلیاژی با بیش از دو عنصر حاوی خطا است، لذا این دماها به صورت تجربی اندازه‌گیری شد. به این منظور، مذاب این آلیاژ در داخل بوتله کوره الکتریکی قرار داده و سپس با دماسنج کاهش دمای آن از ۶۶۰ تا ۵۳۰°C، هر پنج ثانیه ثبت و گزارش شد. شکل (۱) نمودار منحنی سرد شدن مذاب را نشان می‌دهد که از آن دمای لیکوئیدوس و سالییدوس آلیاژ به ترتیب ۵۸۰ و ۶۲۵°C بدست آمده است. بر این اساس، بارریزی بین دو دمای ۵۹۵ تا ۶۱۵°C با فاصله دمایی ۱۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است. در این حالت و در مجموع، ۳ سطح دمایی مشخص شده است.

برای بارریزی و خنک‌کاری در شرایط کنترل‌شده، یک مجموعه سطح شیب‌دار خنک‌شونده طراحی و ساخته شد (شکل ۲). سیستم خنک‌کاری شامل یک مخزن، پمپ و لوله‌های انتقال آب است. مقدار ۲۰ لیتر آب موجود درون مخزنی به حجم ۶۰ لیتر با دمای ثابت ۱۸°C، که دمای آن مرتب توسط دماسنج کنترل می‌شود، در فشار ثابت ۱bar توسط پمپ و لوله‌های انتقال آب درون مسیر تعبیه شده در زیر سطح شیب‌دار به گردش درمی‌آید. ورودی آب از پایین سطح شیب‌دار و خروجی آن از بالا است.

با دمای قالب ۲۰۰°C حاصل می‌شود. در این شرایط قطر ذرات ۷۸ میکرومتر گزارش شده است.

رنجبرپور و همکاران [۱۶] به بررسی ریزساختار و خواص سایشی آلیاژ آلومینیم A390 تولید شده با روش ریخته‌گری روی سطح شیب‌دار پرداختند. در این راستا ایشان ذوب‌ریزی را در ۵ دمای مختلف و در طول ثابت ۵۰۰mm، زاویه ۴۵ درجه انجام داد. ایشان اعلام نمودند که بهترین نتیجه از لحاظ سختی زمانی حاصل می‌شود که دمای ذوب‌ریزی ۵۹۰°C باشد. ایشان عملیات گرمایش مجدد را در سه دمای متفاوت انجام دادند و عنوان نمودند که زمانی که نمونه به مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۵۴۵°C قرار داشته باشد ریزساختار حاصله نسبت به دماهای دیگر ریزتر و یکنواخت‌تر می‌شود.

کریمی و همکاران [۱۷] تاثیر متغیرهای ریخته‌گری نیمه‌جامد به روش هم‌زن مکانیکی از قبیل سرعت هم‌زن و مقدار کسر جامد بر ریزساختار و خواص کششی رنوکت نیمه جامد آلیاژ آلومینیم A319 در مقایسه با نمونه شاهد که در دمای ۷۰۰°C ریخته‌گری شده بود را مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل نشان می‌دهد که با افزایش سرعت هم‌زن و کاهش دمای بارریزی ساختار شاخه‌ای به ساختار کروی نزدیک‌تر می‌گردد به طوری که فاکتور شکل ذرات آلفا از ۰/۴۲ به ۰/۷۱ می‌رسند. بت‌کن و همکاران [۱۸] به بررسی تاثیر متغیرهای هم‌دمای هم‌زن مکانیکی بر ساختار آلومینیم A356 پرداختند. نتایج ایشان نشان می‌دهد که با کاهش دما از ۶۱۳ به ۶۰۳°C خواص مکانیکی افزایش می‌یابد. با افزایش سرعت هم‌زن از ۲۴۰rpm به ۳۰۰rpm ساختار شاخه‌ای بیشتر شکسته می‌شود. ولی با افزایش سرعت هم‌زن به ۳۹۰ و ۴۹۰ دور بر دقیقه مخلوط دچار تلاطم شدیدی شده و در نهایت ریزساختار کمتری شکسته می‌شود. هو و همکاران [۱۹] به بررسی رفتار سایشی آلیاژ آلومینیم پرداختند. فرآیند مورد بررسی ایشان رنوکتینگ لود و اعلام نمودند که به واسطه بهبود در ریزساختار، مقاومت سایشی آلیاژ نیز بهبود قابل توجهی می‌نماید.

کلاه‌دوز و همکاران [۲۰] و کاظمی و همکاران [۲۱] به ترتیب به بررسی تاثیر متغیرهای تیکسوفرمینگ آلیاژ آلومینیم A356 بر ریزساختار و خواص مکانیکی درپوش گیرینگس حلزونی و فلنج پمپ‌های گریز از مرکز پرداختند. در این تحقیقات، تاثیر متغیرهای شکل‌دهی نظیر کسر جامد، دما، فشار، سرعت پانچ و عملیات حرارتی بر

جدول ۲- متغیرهای مورد بررسی در فرآیند ریخته‌گری روی سطح شیب‌دار (در این تحقیق)

شرایط بارریزی	با خنک‌کننده	بدون خنک‌کننده
دمای بارریزی (°C)	۵۹۵، ۶۰۵، ۶۱۵	۵۹۵، ۶۰۵، ۶۱۵
طول سطح شیب‌دار (mm)	۲۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰	۲۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰

دهانه ۱۸۴mm و قطر قاعده پایین ۱۲۵mm است. جهت انجام فرآیند ریخته‌گری، قالب استوانه‌ای فولادی با قطر خارجی ۴۰mm، ارتفاع ۱۰۰mm، ضخامت ۵mm و شیب ۵ درصد ساخته شد. جهت جلوگیری از چسبیدن مذاب به سطح قالب، سطح داخلی قالب به وسیله اکسید زیرکونیم پوشش داده شد. جدول (۲)، متغیرهای مورد بررسی در این تحقیق برای فرآیند ریخته‌گری روی سطح شیب‌دار را نشان می‌دهد. در این آزمایش به دلیل تعداد کم و محدود بودن عوامل درگیر از طراحی آزمایشات به روش فاکتوریل کامل (عاملی کامل) استفاده شده است. با توجه به تعداد فاکتورهای تحت بررسی و سطوح انتخاب شده در هر فاکتور در کل هجده نمونه ریخته شده است.

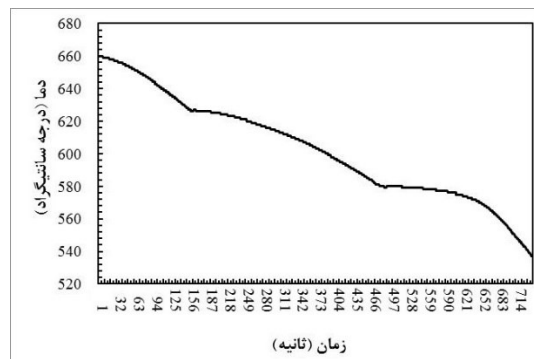
برای ارزیابی ریزساختار و سختی، قرص‌هایی از قطعات ریخته شده با ضخامت ۳۰mm از سمت کف قالب و به فاصله ۳۰mm از ابتدای آن برش زده شد. سپس به وسیله دستگاه تراش از نمونه فوق یک قطعه با قطر ۳۵ و ارتفاع ۲۵ میلی‌متر آماده شد. برای حکاکی نمونه‌ها از محلول ۵HF/۰٪ استفاده شد. زمان نگهداری در این محلول با توجه به نوع ساختار آلیاژ ۵ ثانیه در نظر گرفته شد. پس از مراحل فوق ریزساختارها توسط میکروسکوپ نوری صا ایران مجهز به دوربین دیجیتال و آنالیز تصویر، مورد ارزیابی قرار گرفتند. در ادامه قطر متوسط دانه‌ها که منظور در این مقاله میزان اندازه فاز آلفای اولیه است با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شده است [۲۲]:

$$D_{av} = \frac{\sum_1^N \sqrt{4A/N}}{N} \quad (1)$$

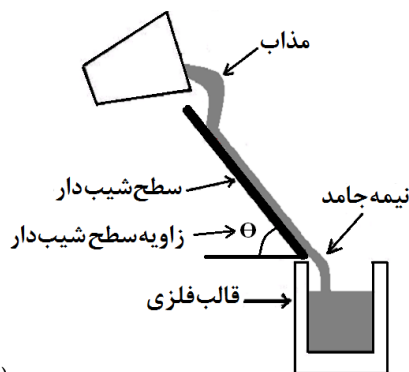
در این رابطه N تعداد و A مساحت هر دانه است. این مقادیر با استفاده از نرم افزار Image z به این صورت که برای هر نمونه، تعداد ۵ تصویر و در هر تصویر، تعداد ۳۰ دانه انتخاب شده بود، استخراج شده است.

جدول ۱- درصد وزنی عناصر تشکیل دهنده آلیاژ A۳۸۰

عنصر	Al	Zn	Mg	Mn	Cu	Fe	Si
مقدار	باقیمانده	۰/۳۲	۰/۰۷	۰/۰۳	۲/۵۵	۰/۲۵	۸/۴۲



شکل ۱- نمودار دما-زمان به دست آمده برای انجام آلیاژ آلومینیم A380



(الف)



(ب)

شکل ۲- (الف) شماتیک سطح شیب‌دار، (ب) دستگاه سطح شیب‌دار مورد استفاده و سیستم خنک‌کننده با سیال آب

آزمایشات در سه طول ۲۰، ۴۰ و ۶۰ سانتیمتر و در زاویه ثابت ۶۰ درجه انجام شد. همچنین دو حالت استفاده از سیستم خنک‌کننده و یا عدم استفاده از آن مورد توجه بوده است. عملیات ذوب توسط یک کوره الکتریکی با توان ۳Kw صورت پذیرفته است. بوته انتخاب شده جهت آزمایشات از جنس سیلیسیم کارباید و با ابعاد ارتفاع ۲۶۰mm، قطر

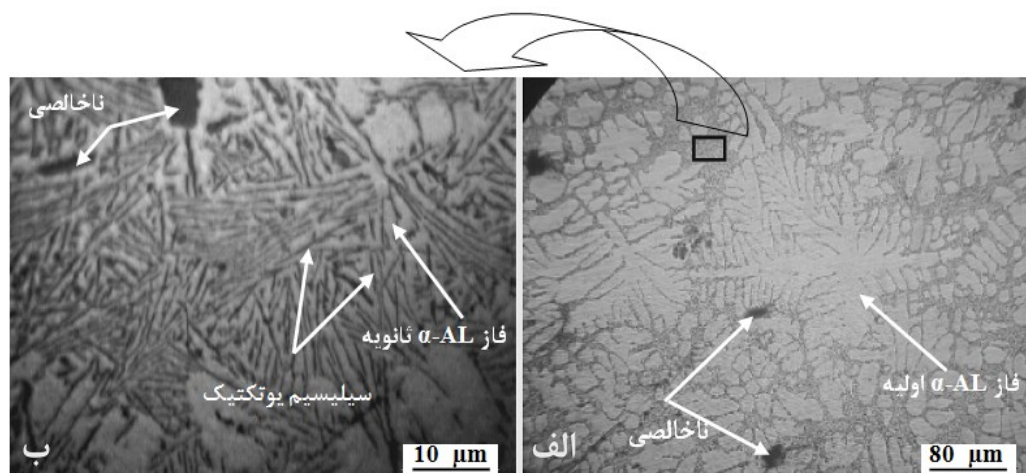
است. اما سیلیسیم در دماهای پایین، قابلیت حل شدن در آلومینیم را ندارد. با کاهش دما، سیلیسیم از فاز α اولیه به آلیاژ مذابی که در اطراف این فاز قرار دارد، منتقل می‌شود. انتقال سیلیسیم محلول از فاز α اولیه به فاز مذاب با ادامه کاهش دما، افزایش می‌یابد. افزایش بیش از اندازه سیلیسیم محلول در فاز مذاب باعث می‌شود که این فاز از سیلیسیم اشباع شود. در این حالت سیلیسیم اضافی با رسیدن به دمای یوتکتیک در ریزساختار شروع به جوانه‌زنی و رشد می‌نماید. تشکیل شدن فاز سیلیسیم یوتکتیک به طور طبیعی به صورت شاخه‌های سوزنی اتفاق می‌افتد. مابقی آلیاژ مذاب نیز بین شاخه‌های سیلیسیم یوتکتیک و دندریت‌های فاز α اولیه، منجمد شده و فاز α ثانویه را تشکیل می‌دهند. همچنین در ریزساختار شکل (۳) اثراتی از ناخالصی دیده می‌شود. منشا ناخالصی‌ها می‌تواند اکسید آلومینیمی باشد که هنگام ریختن، وارد مذاب شده است. همچنین ترکیباتی نظیر Al_2Cu و Al_2Fe_3 نیز می‌توانند منشا ناخالصی‌ها باشند.

در این مقاله، تاثیر طول سطح شیب‌دار بر قطر ذرات، سختی و تخلخل نمونه‌های ریخته‌شده در حالت‌های با عبور مایع خنک‌کننده و بدون آن مورد بررسی قرار گرفت. لازم به ذکر است که پس از بارریزی و در زمان انجماد نمونه‌ها در قالب هیچ‌گونه تنشی به نمونه‌ها وارد نشده و دمای قالب هم‌دمای محیط است (حدود $25^\circ C$). شکل (۴) تصاویر متالوگرافی نمونه‌های آزمایش بر اساس جدول (۳) را نشان می‌دهد. همچنین در این جدول نتایج عددی حاصل از آزمایشات به همراه سطوح تغییرات هر یک از متغیرهای مستقل نشان داده شده است.

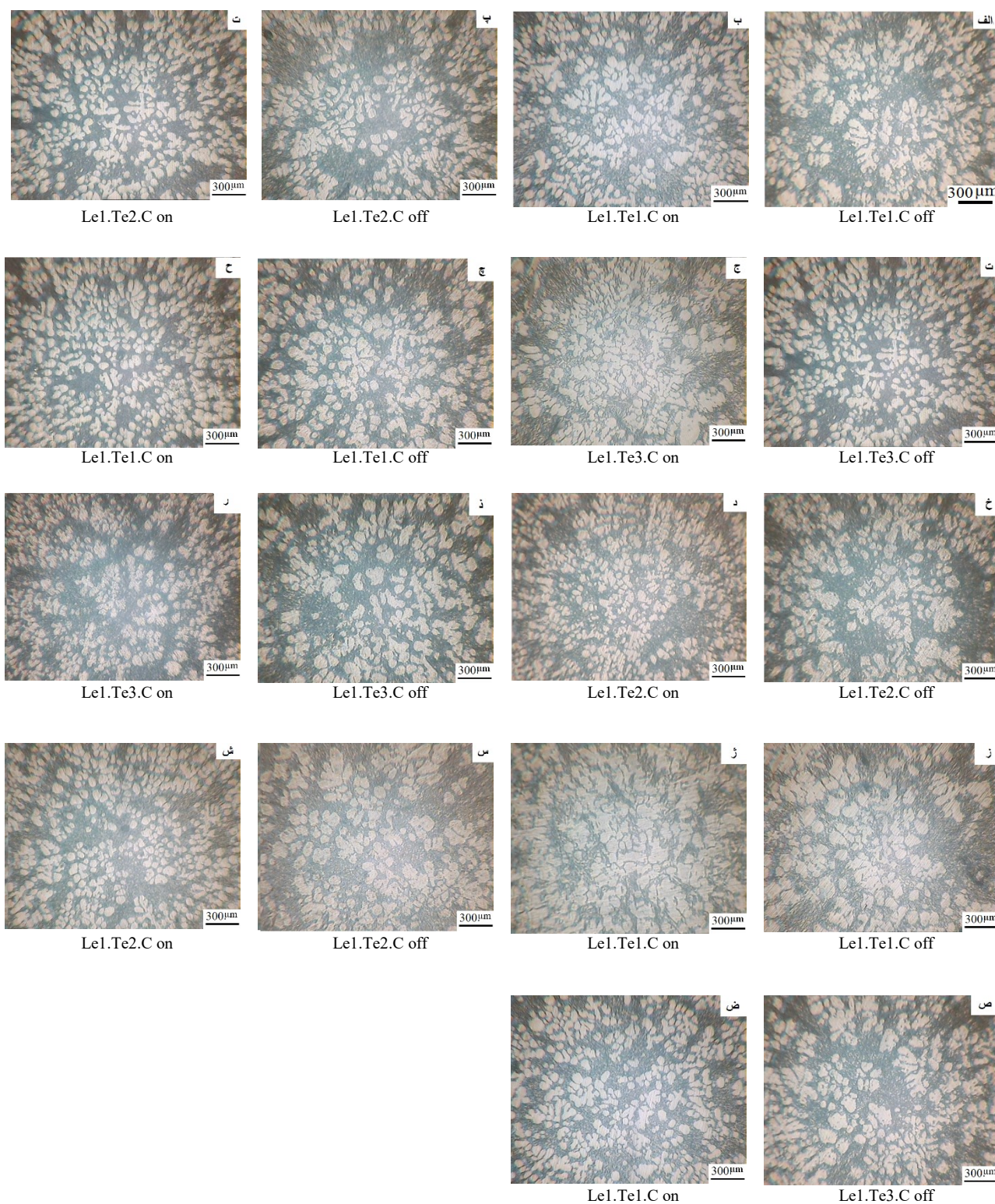
برای بررسی سختی، مطابق با استاندارد ASTM E23 به وسیله دستگاه سختی‌سنج دیجیتالی یونیورسال مدل کوپا UV1 از روش سختی‌سنجی برینل استفاده شد. سپس برای بررسی میزان تخلخل، حجم نمونه‌ها به وسیله ارلن مدرج و پیپت با دقت ۱CC اندازه‌گیری شد. همچنین وزن نمونه‌ها با ترازو با دقت ۰/۰۱ گرم سنجیده شد.

۳- نتایج و بحث

در شکل (۳)، ریزساختار آلیاژ A380 که در فرآیند ریخته‌گری ثقلی بدست آمده، نشان داده شده است. مطابق شکل (۳-الف)، دندریت‌های فاز α اولیه در این ریزساختار قابل مشاهده است. اگر آلیاژ آلومینیم A380 که در دمایی بالاتر از دمای ذوب کامل قرار دارد، به آرامی با از دست دادن حرارت وارد محدوده انجماد شود، در ابتدا جوانه‌های جامدی از فاز α -Al اولیه در زمینه آلیاژ مذاب تشکیل می‌شوند. تعداد جوانه‌های جامد فاز α اولیه که در زمینه آلیاژ مذاب معلق است، با کاهش بیشتر دما افزایش می‌یابد. با ادامه کاهش دما، تقریباً تشکیل جوانه‌های جدید متوقف شده و فقط اندازه جوانه‌های جامد قبلی بزرگ‌تر می‌شود. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، بزرگ‌تر شدن جوانه‌ها به صورت شاخه‌ای است. فرآیند اشاره شده، مکانیزم تشکیل دندریت‌های جامد فاز α اولیه در زمینه آلیاژ مذاب است. مطابق شکل (۳-ب)، در ریزساختار شاخه‌های سوزنی سیلیسیم یوتکتیک در زمینه‌ای از فاز α ثانویه پراکنده شده، قابل مشاهده است. آلیاژ A380 حاوی ۸/۴ درصد سیلیسیم است. هنگامی که این آلیاژ در حالت مذاب است، تمامی سیلیسیم به صورت محلول داخل آن



شکل ۳- تصاویر میکروسکپ نوری از ریزساختار نمونه ریخته‌گری شده ثقلی: (الف) دندریت‌های جامد فاز α اولیه، (ب) شاخه‌های سوزنی سیلیسیم یوتکتیک

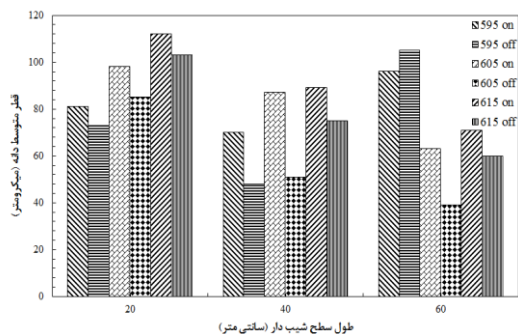


شکل ۴- تصاویر میکروسکپ نوری از ریزساختار نمونه‌های آزمایش بر اساس جدول (۳)

جدول ۳- جدول طراحی آزمایش، سطوح مختلف متغیرها و نتایج حاصل شده

ردیف	کد آزمایش بر اساس سطوح متغیرهای مستقل	متغیرهای مستقل مورد آزمایش و سطوح آن			متغیرهای وابسته (پاسخ)		
		دمای بارریزی (°C)	طول بارریزی (cm)	سیستم آب‌گرد	اندازه دانه (μm)	سختی (HB)	تخلخل (%)
۱	Le1.Te1.C off	۵۹۵	۲۰	off	۸۱	۸۷	۱۰
۲	Le1.Te1.C on	۵۹۵	۲۰	on	۷۳	۸۹	۱۷
۳	Le1.Te2.C off	۶۰۵	۲۰	off	۹۸	۸۴	۹
۴	Le1.Te2.C on	۶۰۵	۲۰	on	۸۵	۸۸	۷
۵	Le1.Te3.C off	۶۱۵	۲۰	off	۱۱۲	۸۲	۱۳
۶	Le1.Te3.C on	۶۱۵	۲۰	on	۱۰۳	۸۴	۱۰
۷	Le2.Te1.C off	۵۹۵	۴۰	off	۷۰	۹۱	۵
۸	Le2.Te1.C on	۵۹۵	۴۰	on	۴۸	۹۶	۶
۹	Le2.Te2.C off	۶۰۵	۴۰	off	۸۷	۸۵	۱۱
۱۰	Le2.Te2.C on	۶۰۵	۴۰	on	۵۱	۹۶	۹
۱۱	Le2.Te3.C off	۶۱۵	۴۰	off	۸۹	۸۵	۱۴
۱۲	Le2.Te3.C on	۶۱۵	۴۰	on	۷۵	۸۹	۱۰
۱۳	Le3.Te1.C off	۵۹۵	۶۰	off	۹۶	۸۵	۱۲
۱۴	Le3.Te1.C on	۵۹۵	۶۰	on	۱۰۲	۸۴	۹
۱۵	Le3.Te2.C off	۶۰۵	۶۰	off	۶۳	۹۴	۱۳
۱۶	Le3.Te2.C on	۶۰۵	۶۰	on	۳۹	۹۸	۱۰
۱۷	Le3.Te3.C off	۶۱۵	۶۰	off	۷۱	۹۱	۱۵
۱۸	Le3.Te1.C on	۶۱۵	۶۰	on	۶۰	۹۴	۱۳

در طول سطح شیب‌دار ۶۰cm، کسر جامد بیشتر از حد مطلوب است و این موارد عواملی هستند که مانع دستیابی به ساختار مناسب می‌شوند. برای تایید این مطلب می‌توان به مقاله رنجبرپور و همکاران [۱۶] اشاره نمود. ایشان به بررسی تاثیر دمای بارریزی و گرمایش مجدد آلیاژ آلومینیم A390 با استفاده از سطح شیب‌دار پرداخته‌اند. ایشان در مقاله خود با ارائه عکس‌هایی وابستگی دمای بارریزی و کسر جامد ایجاد شده بر روی سطح شیب‌دار را عامل تغییرات در اندازه دانه بیان نمودند.



شکل ۵- اثر طول بارریزی، دمای بارریزی و اعمال سیستم آب‌گرد بر اندازه دانه

۳-۱- اثر طول سطح شیب‌دار (طول بارریزی)

۳-۱-۱- ریزساختار

شکل (۵)، اثر طول سطح شیب‌دار، دمای بارریزی و استفاده از سیستم آب‌گرد بر اندازه دانه را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در دمای بارریزی ۵۹۵°C، با افزایش طول بارریزی در هر دو حالت استفاده و یا عدم استفاده از سیستم آب‌گرد، در ابتدا اندازه قطر دانه‌ها از مقدار ۷۳ و ۸۱ μm به ترتیب با سیستم آب‌گرد و بدون سیستم آب‌گرد، به مقدار ۴۸ و ۷۰ μm کاهش می‌یابد. اما در ادامه و با افزایش بیشتر طول بارریزی، افزایش ناگهانی قطر دانه‌ها به مقدار ۱۰۲ و ۹۶ μm حاصل می‌شود. دلیل این رویداد را می‌توان این گونه شرح داد که با افزایش بیش از حد طول بارریزی، اگر چه مدت زمان اعمال تنش برشی افزایش می‌یابد اما به علت افزایش بیش از حد کسر جامد و رخ دادن پدیده آگلومراسیون، قطر متوسط ذرات مجدداً شروع به افزایش می‌کند. بنابراین مشاهده می‌شود که ریخته‌گری در دمای ۵۹۵°C با طول بارریزی ۲۰cm، مدت زمان اعمال تنش برشی و کسر جامد ایجاد شده کم است. همچنین ریخته‌گری

آگلومره شدن ذرات، اندازه ذرات مجدداً افزایش می‌یابد [۲۳].

نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که در دماهای مختلف بارریزی، طول‌های مختلف بهینه برای سطح شیب‌دار وجود دارند که در آن‌ها می‌توان به ریزساختاری حاوی ذرات ریز کروی و مطلوب دست یافت. نتایج همچنین حاکی از این است که با افزایش دمای بارریزی برای رسیدن به ریزساختار مناسب باید از سطح شیب‌دار با طول‌های بلندتر استفاده کرد.

۳-۱-۲- سختی

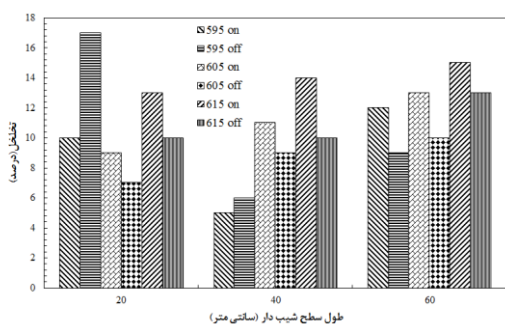
شکل (۶)، اثر طول سطح شیب‌دار، دمای بارریزی و استفاده از سیستم آب‌گرد بر سختی را نشان می‌دهد. در دمای 595°C و بدون سیستم خنک‌کننده، با افزایش طول از ۲۰ به ۴۰ سانتیمتر، افزایش میزان سختی از ۸۷ به ۹۱ برینل مشاهده می‌شود، اما در ادامه با افزایش بیشتر طول از ۴۰ به ۶۰ سانتیمتر مجدداً میزان سختی از ۹۱ به ۸۵ برینل کاهش پیدا می‌کند. دلیل این امر آن است که با افزایش طول از ۲۰ به ۴۰ سانتیمتر، افزایش مناسبی در کسر جامد و ریز شدن ریزساختار اتفاق می‌افتد. با ریز شدن ساختار و به دلیل افزایش بیشتر مرز دانه‌ها، سختی در نمونه‌ها افزایش می‌یابد. در ادامه و با افزایش بیشتر طول از ۴۰ به ۶۰ سانتیمتر، کسر جامد بوجود آمده در اسلاری از حد مناسب بیشتر شده که این امر باعث آگلومره شدن ذرات و رشد دانه‌های بزرگ و غیر کروی می‌شود. این امر، در نهایت منجر به کاهش خواص مکانیکی و سختی در نمونه‌ها می‌شود.

در دماهای 605°C و 615°C روند افزایش سختی با افزایش طول بارریزی مشاهده می‌شود. میزان سختی برای دمای 605°C از ۸۴، ۸۵ و ۹۴ برینل به میزان ۸۲، ۸۵ و ۹۱ برینل به ترتیب برای طول‌های ۲۰، ۴۰ و ۶۰ سانتیمتر مشاهده شد. دلیل این افزایش سختی، افزایش میزان کسر جامد با افزایش طول تماس و ایجاد ساختاری کروی و ریز است.

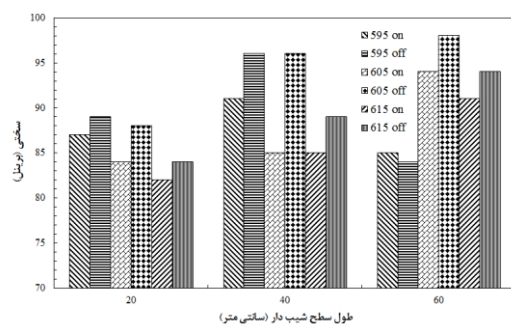
با توجه به شکل (۶) می‌توان بیان داشت که به جز در دمای 595°C ، افزایش میزان سختی با افزایش طول سطح شیب‌دار (در هر دمای ثابت) حاصل می‌شود. دلایل آن را می‌توان مربوط به ایجاد کسر جامد مناسب و وارد آمدن تنش برشی کافی به ذرات جامد درون مذاب برای شکستن بازوهای دندریتی عنوان نمود [۲۳]. در نهایت این موجب تشکیل ساختاری ریز و کروی با خواص مکانیکی مطلوب در نمونه‌ها می‌شود.

همچنین نمودار شکل (۵) نشان می‌دهد که در دمای بارریزی 605°C ، با افزایش طول بارریزی از ۲۰ به ۴۰ و ۶۰ سانتیمتر، قطر ذرات اولیه به ترتیب از مقدار حدود ۹۸ به ۸۷ و $63\mu\text{m}$ در حالت عدم استفاده از سیستم آب‌گرد و از مقدار حدود ۹۸ به ۸۷ و $39\mu\text{m}$ در حالت استفاده از سیستم آب‌گرد کاهش می‌یابد. دلیل این رویداد آن است که با افزایش طول سطح شیب‌دار و افزایش مدت زمان اعمال تنش، به مذاب تنش بیشتری وارد شده که باعث افزایش کسر جامد به میزان مناسب و خرد شدن شاخه‌های دندریتی می‌شود. همچنین نتیجه مشابه با دمای قبلی برای دمای بارریزی 615°C حاصل شده است. به طوری که با افزایش طول بارریزی، قطر ذرات اولیه از مقدار حدود ۱۱۲ به ۸۹ و $71\mu\text{m}$ در حالت عدم استفاده از سیستم آب‌گرد و از مقدار حدود ۱۰۳ به ۷۵ و $60\mu\text{m}$ در حالت استفاده از سیستم آب‌گرد کاهش یافته است. دلیل این رویداد هم مطابق آنچه که قبلاً گفته شد، افزایش طول سطح شیب‌دار موجب افزایش تنش وارد شده به ذرات شده که باعث افزایش کسر جامد به میزان مناسب و خرد شدن شاخه‌های دندریتی می‌شود [۲۳].

طول شیب‌دار از طریق تاثیرگذاری بر عواملی مانند زمان اعمال تنش برشی بر مخلوط مذاب-جامد و کسر حجمی فاز جامد به هنگام اعمال تنش برشی، بر ریزساختار نهایی تاثیرگذار است. در طول‌های بارریزی کم، مدت تماس مذاب با سطح شیب‌دار کم بوده و مذاب سریع‌تر از روی سطح عبور کرده و به درون قالب هدایت می‌شود. این حالت به این معنا است که مدت زمان اعمال تنش برشی بر مخلوط مذاب-جامد و تبادل حرارت برای ایجاد کسر جامد مناسب، کافی نیست. بنابراین انتظار می‌رود که با افزایش طول شیب‌دار، انتقال حرارت میان مذاب و سطح شیب‌دار و به تبع آن امکان ایجاد کسر جامد مناسب افزایش یافته و در نتیجه میزان جوانه‌زنی ذرات افزایش یابد. همچنین با افزایش طول شیب‌دار، مدت زمان اعمال تنش برشی افزایش می‌یابد که خود عاملی مهم در افزایش میزان جداسدن کریستال‌های فاز اولیه و افزایش میزان خرد شدن ساختار دندریتی است. پیامد دو عامل فوق، کاهش اندازه ذرات فاز اولیه و نزدیک شدن هر چه بیشتر مورفولوژی آنها به مورفولوژی کروی، برای یک طول بهینه است. با افزایش بیش از حد طول تماس، به دلیل افزایش کسر جامد تشکیل شده بر روی سطح شیب‌دار و



شکل ۷- اثر طول سطح شیب‌دار، دمای بارریزی و استفاده از سیستم آب‌گرد بر درصد تخلخل



شکل ۶- اثر طول سطح شیب‌دار، دمای بارریزی و استفاده از سیستم آب‌گرد بر سختی

۳-۱-۳- تخلخل

همان‌طور که گفته شد به دلیل کاهش کمتر حجم ماده بعد از سرد شدن، تخلخل کمتری در قطعات تولید شده در حالت نیمه‌جامد در مقایسه با روش‌های ریخته‌گری معمولی مشاهده می‌شود. در بررسی‌های صورت گرفته مشاهده شد که هرچه کسر جامد کم شود و مخلوط به سمت فاز مایع پیش برود درصد تخلخل در نمونه‌ها بیشتر می‌شود. با توجه به ساختار مخلوط نیمه‌جامد می‌توان بیان نمود که هر چه دما افزایش یابد طول بازوهای ساختار بلندتر می‌شود. در این صورت هنگام انجماد حبس شدن گاز در بین این بازوها بیشتر می‌شود. همچنین طول زیاد بازوها یکی از عواملی است که سبب پر نشدن زوایا و گوشه‌های قالب از مذاب می‌شود. در ضمن در زمان بارریزی به علت سیلان مخلوط و تلاطم که به علت سیالیت بالا و ویسکوزیته کم مذاب بوجود می‌آید، مقدار بیشتری از هوا حبس می‌شود. این هوای حبس شده در بین بازوها محبوس شده و لذا باعث افزایش تخلخل می‌گردد. در دماهای پائین نظیر 595°C و کمتر نیز تخلخل بالا به علت انجماد سریع و همچنین عدم پر شدن گوشه‌ها اتفاق می‌افتد.

به‌طور کلی در مقایسه با روش‌های ریخته‌گری معمولی قطعات تولید شده در حالت نیمه‌جامد دارای تخلخل کمتر و خواص مکانیکی بهتری هستند. در روش ریخته‌گری نیمه‌جامد به دلیل انجام فرآیند در دماهای پائین‌تر کاهش حجم ماده کمتر است که این امر تخلخل کمتر در قطعات تولیدی می‌کند. همچنین به دلیل ایجاد یک الگوی یکنواخت در پرشدن محفظه‌های قالب در این روش، نمونه‌های تولیدی اغلب خواصی نزدیک به قطعات آهنگری شده را دارا هستند. این روش نسبت به روش آهنگری نیز دارای این حسن است که می‌توانند قطعاتی با هندسه پیچیده‌تری را تولید نمود [۲۵، ۲۴].

شکل (۷)، اثر طول سطح شیب‌دار، دمای بارریزی و استفاده از سیستم آب‌گرد بر تخلخل را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در حالت بدون سیستم خنک‌کننده، در دمای 615°C و طول 60 cm بیشترین مقدار تخلخل حدود 15% درصد است. دلیل این رویداد، بالا بودن دمای مذاب و سیالیت است. مذاب با سیالیت بالا هنگام عبور از روی سطح و ورود به قالب دچار تلاطم بیشتری شده و امکان نفوذ گازها در آن بالا می‌رود. همچنین مذاب پس از عبور از سطوح با طول زیاد ممکن است به دلیل افزایش بیش از حد کسر جامد نتواند قالب را به طور کامل پر کرده و موجب ایجاد عیوب ریخته‌گری شود. کمترین میزان تخلخل نیز در دمای 595°C و طول 40 cm به دست آمد که می‌تواند ناشی از کم بودن دمای مذاب‌ریزی و سیالیت کم مذاب باشد. سیال با ویسکوزیته کم توان حلالیت گازهای کمتری در خود را دارد. با توجه به شکل (۷)، در حالت با سیستم خنک‌کننده بیشترین تخلخل در دمای 595°C و طول 20 cm به دست آمد. دلیل این میزان از تخلخل (17% درصد) خنک‌کنندگی بالای سطح و دمای پایین مذاب ریخته‌گری است. این امر باعث انجماد مذاب و عدم پر شدن کامل قالب شده است. همچنین در حالت با سیستم خنک‌کننده کمترین میزان تخلخل در دمای 595°C و طول 40 cm به دست آمد که به دلیل ایجاد کسر جامد و سیالیت مناسب مذاب است. با وجود کسر جامد مناسب میزان مذاب درون مخلوط نیمه‌جامد کاهش یافته و منجر به کاهش تخلخل می‌شود. در سایر نمونه‌ها و در هر دمای ثابت با افزایش طول سطح بارریزی افزایش میزان تخلخل مشاهده می‌شود. این رویداد مطابق آنچه گفته شد، می‌تواند به دلیل مسیر طولانی‌تر ورود مذاب به قالب و امکان تلاطم بیشتر در طول مسیر و در نتیجه زمان بیشتر برای نفوذ گازها در مذاب باشد.

۲-۳- اثر خنک‌کنندگی سطح شیب‌دار

۳-۲-۱- ریز ساختار

با توجه به شکل‌های (۴) و (۵)، تغییر ریزساختار با تغییر در وضعیت خنک‌کاری کاملاً مشهود است. به عنوان مثال در طول ۲۰ cm، قطر متوسط ذرات فاز آلفای اولیه از مقدار حدود ۱۱۲، ۹۸ و $81 \mu\text{m}$ به ترتیب به ازای دماهای بارریزی ۶۱۵، ۶۰۵ و 595°C در شرایط سطح شیب‌دار بدون سیستم خنک‌کننده، به مقدار حدود ۱۰۳، ۸۵ و $73 \mu\text{m}$ در شرایط سطح شیب‌دار با سیستم آب‌گرد کاهش می‌یابد. 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 خنک‌کنندگی سطح شیب‌دار می‌شود. این امر پدیده رشد 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 آلفای اولیه درشت‌تر ایجاد می‌شود.

با افزایش میزان خنک‌کنندگی سطح شیب‌دار، رشد 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 ذرات فاز آلفای اولیه شکل می‌گیرد. نکته قابل ذکر این است که کاهش بیش از اندازه دمای سطح شیب‌دار همچنین می‌تواند موجب انجماد بیش از حد بر روی سطح شیب‌دار و پر نشدن قالب شود. در طول بارریزی ۶۰ cm، ابتدا کاهش قطر دانه‌ها مشاهده می‌شود، به طوری که قطر متوسط ذرات فاز اولیه از مقدار حدود ۷۱ و $63 \mu\text{m}$ به ترتیب به ازای دماهایی بارریزی ۶۱۵ و 605°C در شرایط سطح شیب‌دار بدون سیستم خنک‌کننده، به مقدار ۶۰ و $39 \mu\text{m}$ در شرایط سطح شیب‌دار با سیستم آب‌گرد کاهش می‌یابد. اما در همین طول بارریزی با کاهش بیشتر دمای بارریزی به 595°C افزایش اندازه قطر ذرات به مقدار $96 \mu\text{m}$ برای

حالت بدون سیستم آب‌گرد و $102 \mu\text{m}$ با سیستم آب‌گرد مشاهده شد. دلیل این امر، آن است که با کاهش بیش از حد دمای بارریزی و با افزایش بیش از حد طول تماس، به دلیل افزایش کسر جامد تشکیل شده بر روی سطح شیب‌دار و آگلومره شدن ذرات، اندازه ذرات افزایش می‌یابد. در دمای 595°C و طول ۶۰ cm بر خلاف انتظار با ریخته‌گری با سیستم خنک‌کننده افزایش قطر متوسط دانه‌ها مشاهده شد. دلیل آن می‌تواند بلند بودن طول بارریزی و کم بودن دمای مذاب باشد که منجر به سرد شدن مذاب در طول مسیر و افزایش بیش از حد کسر جامد و آگلومره شدن ذرات و دور شدن از شرایط مطلوب می‌شود. در نتیجه ساختاری با ذرات فاز آلفای اولیه درشت‌تر ایجاد می‌شود.

۳-۲-۲- سختی

با توجه به نتایج ارائه شده در جدول (۳)، ریزساختارهای ارائه شده در شکل (۴) و تحلیل‌های ارائه شده در بخش ۳-۱، می‌توان تاثیر خنک‌کنندگی سطح شیب‌دار بر سختی را از سایر متغیرهای مستقل تفکیک کرد.

مشاهده شده است که کاهش قطر ذرات سبب افزایش میزان سختی شده و به این دلیل همواره نمودارهای سختی و اندازه دانه از یکدیگر پیروی می‌کنند. در نمودار اندازه دانه (شکل ۵) کمینه این مقدار نیز در دمای 605°C و طول بارریزی ۶۰ cm و 595°C با طول بارریزی ۴۰ cm حاصل شد و این در حالی است که در شکل (۶) سختی در این دو دما دارای بیشینه مقدار و به ترتیب ۹۸ و HB ۹۶/۴ است. در سایر نقاط نیز این موضوع مشاهده می‌شود، لذا هماهنگی بین نتایج سختی و قطر دانه در این قسمت مشاهده شده و علل افزایش یا کاهش سختی را می‌بایست در تغییرات ریزساختار ناشی از اعمال سیستم آب‌گرد جستجو نمود.

می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از سیستم خنک‌کننده سطح شیب‌دار در یک طول بارریزی ثابت، باعث افزایش مناسب کسر جامد، دور شدن ریزساختار از حالت دندریتی و ریز دانه شدن ذرات می‌شود که این خود سبب افزایش میزان سختی شده است [۲۳].

در دمای بارریزی 595°C با طول بارریزی ۶۰ cm بر خلاف انتظار با استفاده از سیستم خنک‌کننده کاهش جزیی میزان سختی از ۸۵ به ۸۴ برینل مشاهده شد. دلیل این تغییر کوچک، می‌تواند بلند بودن طول بارریزی و کم بودن دمای مذاب باشد. این حالت منجر به سرد شدن سریع مذاب در

ریخته‌گری به ساختاری با ذرات ریز با شکل گل‌بوته‌ای و کروی تغییر می‌یابد.

۲- ریزساختار نمونه‌های تولید شده در فرآیند سطح شیب‌دار در این تحقیق از نظر اندازه و مورفولوژی ذرات فاز جامد اولیه تحت تاثیر طول بارریزی و خنک‌کنندگی سطح شیب‌دار قرار دارد.

۳- در طول‌های بارریزی زیاد، ریسک انجماد بیش از حد مذاب روی سطح شیب‌دار و حتی پر نشدن قالب افزایش می‌یابد. با افزایش بیش از حد طول بارریزی و با افزایش مقدار کسر جامد تشکیل شده بر روی سطح شیب‌دار، احتمال رخ دادن پدیده آگلومراسیون افزایش یافته و نتیجه آن افزایش قطر متوسط ذرات است. همچنین در طول‌های بارریزی کم، حجم مذاب بیشتر با دمای بالاتر وارد قالب می‌شود که می‌تواند حرارت لازم را برای ذوب مجدد همان مقدار کم ذرات جامد وارد شده به قالب را فراهم نماید.

۴- با تجهیز سطح شیب‌دار به سیستم آب‌گرد، میزان کسر جامد ایجاد شده بر روی سطح افزایش یافته و ریزساختار نمونه‌های به دست آمده در دماهای مختلف بارریزی در مقایسه با حالت بدون آب‌گرد دارای ذرات فاز اولیه ریزتری است.

۵- در شرایط مورد تحقیق، طول بارریزی ۶۰ cm، در دمای ۶۰۵°C مناسب‌ترین حالت ریخته‌گری برای این آلیاژ تعیین شد. در این طول بارریزی، ضمن برخورداری از کمترین قطر دانه (۳۲ μm)، بیشترین مقدار سختی یعنی ۹۸ HB حاصل می‌شود.

۶- بیشترین تخلخل به میزان ۱۷ درصد در طول بارریزی ۲۰ cm و دمای ۵۹۵°C و با سیستم خنک‌کننده سطح اتفاق افتاد. با اینکه هرچه کسر جامد کم شود و مخلوط به سمت فاز مایع پیش برود، درصد تخلخل در نمونه‌ها بیشتر می‌شود. اما باید توجه داشت که افزایش بیش از حد کسر جامد باعث افزایش نامناسب ویسکوزیته و کاهش زیاد سیالت مذاب ورودی به قالب و در نتیجه ایجاد عیوب ریخته‌گری و انقباضی می‌شود.

طول مسیر و افزایش بیش از حد کسر جامد و گل‌بوته‌ای شدن ذرات و دور شدن ریزساختار از شرایط مطلوب باشد. در نتیجه‌ی ایجاد کسر جامد نامناسب و انجماد بیش از حد و رخ دادن پدیده آگلومراسیون ساختاری با ذرات فاز اولیه درشت‌تر ایجاد می‌شود که منجر به کاهش میزان سختی می‌شود.

۳-۲-۳- تخلخل

مطابق شکل (۷)، نتایج بیان‌گر این است که هرچه کسر جامد کم شود و مخلوط به سمت فاز مذاب پیش برود، درصد تخلخل در نمونه‌ها بیشتر می‌شود. با توجه به ساختار مخلوط نیمه‌جامد و همان‌طور که در قسمت پیشین بحث شد، در دماهای بالا، طول بازوهای ساختار افزایش می‌یابد. این امر سبب حبس شدن گاز در بین بازوها شده و همچنین عاملی برای پر نشدن زوایا و گوشه‌های قالب می‌شود. در ضمن در زمان بارریزی به علت سیلان مخلوط و تلاطم که به دلیل سیالیت بالا (ویسکوزیته کم) است، مقدار بیشتری از هوا حبس می‌شود. این مقدار از هوای حبس شده در بین بازوها باعث افزایش تخلخل می‌گردد. در دماهای پائین نظیر ۵۹۵°C و کمتر نیز به علت انجماد سریع و همچنین عدم پر شدن گوشه‌ها تخلخل بالا اتفاق می‌افتد. بیشترین تخلخل به میزان ۱۷ درصد در طول سطح ۲۰ cm و دمای ۵۹۵°C و با سیستم خنک‌کننده سطح اتفاق افتاده است که دلیل آن افزایش بیش از حد کسر جامد و در نتیجه افزایش ویسکوزیته و کاهش سیالت مذاب ورودی به قالب است. این امر باعث ایجاد عیوب ریخته‌گری و تخلخل در نمونه شده است.

کمترین تخلخل به میزان ۵ و ۶ درصد در طول ۴۰ cm و دمای ۵۹۵°C به ترتیب بدون سیستم خنک‌کننده و با سیستم خنک‌کننده است. در اکثر نمونه‌ها، کاهش میزان تخلخل با استفاده از سیستم خنک‌کننده مشاهده می‌شود که به دلیل ایجاد کسر جامد مناسب و کروی شدن و ریز شدن دانه‌بندی است. همچنین کوتاه‌تر شدن زمان سیالیت مذاب باعث کاهش حلالیت گازها در آن شده که نتیجه آن کاهش تخلخل است.

۴- نتیجه‌گیری

۱- با استفاده از سطح شیب‌دار، در اثر تنش‌برشی اعمال شده بر دوغاب نیمه‌جامد آلیاژ آلومینیم A۳۸۰، ساختار دندریتی فاز آلفای اولیه مشاهده شده در نمونه متداول

مراجع

- [1] Fan Z., Semisolid metal processing, International Materials Reviews, 2002, 47, 1-37.
[2] Taghavi F., Ghassemi A., Study on the effects of the length and angle of inclined plate on the thixotropic

ایران و انجمن ریخته‌گری ایران، سمنان، دانشگاه سمنان، دانشکده

مهندسی مواد و متالورژی، ۱۳۹۲.

- [18] Botkan M., Nourouzi S., Kolahdooz A., Effect of isothermal stirring parameters on microstructure of Al-A356 alloy, *Steel Metal Research, Special Issue of Metal Forming*, 2012, 775-778.
- [19] Hu Z., Wu G., Xu J., Mo W., Li Y., Liu W., Zhang L., Ding W., Quan J., Chang Y., Dry wear behavior of rheo-casting Al-16Si-4Cu-0.5Mg alloy, *Transaction of Nonferrous Metal Society of China*, 2016, 26, 2818-2829.
- [20] Kolahdooz A., Nourouzi S., Bakhshi M., Hosseinipour, S.J., Experimental investigation of thixoforging parameters effects on the microstructure and mechanical properties of the helical gearbox cap, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2014, 28(10) 4257-4265.
- [21] Kazemi A., Nourouzi S., Kolahdooz A., Gorji A., Experimental investigation of thixoforging process on microstructure and mechanical properties of the centrifugal pump flange, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2015, 29(7) 2957-2965.
- [22] Zhao Z., Chen Q., Near-liquidus forging, partial remelting and thixoforging of an AZ91D+ Y magnesium alloy, *Journal of Alloys and Compounds*, 2009, 485(1) 627-636.
- [23] Kolahdooz A., Aminian S., Effects of important parameters in the production of Al-A356 alloy by semi-solid forming process, *Journal of Materials Research and Technology*, 2018, in press.
- [24] Damavandi E., Nourouzi S., Rabiee S. M., The Effect of Pouring Temperature, Mechanical Vibration and Partial Remelting on Microstructure and Mechanical Properties of Al-A390 Alloy, in Persian, *Founding Research Journal*, 2018, 2(1) 39-53.
- [25] Jiang J., Atkinson H., Wang V., Microstructure and mechanical properties of 7005 aluminum alloy components formed by thixoforging, *Journal of Materials Science and Technology*, 2017, 33(4) 1-19.
- microstructure of A356 aluminum alloy, *Materials and Design*, 2009, 30(5) 1762-1767.
- [3] Vogel Y., Zhang K., The formation of rosette phase structural evolution during the reheating and semi-solid casting of AlSi7Mg alloy, *Journal of materials processing technology*, 2003, 137, 195-200.
- [4] Hellawel T., Stjohn D.H., Steiberg T., The shear behavior of partially solidified Al-Si-Cu alloys, *Materials Science and Engineering A*, 2000, 286, 18-29.
- [5] Mullis A.M., Growth induced dendritic bending and rosette formation during solidification in a shearing flow, *Acta Materialia*, 1999, 47, 1783-1789.
- [6] Salarfar S., Akhlaghi F., 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.
- [7] Liu D., Atkinson H.V., Kapranos P., Jirattitichareoan W., Jones, H., Microstructural evolution and tensile mechanical properties of thixoforged high performance aluminium alloys, *Material Science Engineering A*, 2003, 361, 213-224.
- [8] Birol Y., Cooling slope casting and thixoforging of hypereutectic A390 alloy, *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, 20, 200-203.
- [9] Sajjadi S.A., Ezatpour H.R., Torabi-Parizi M., Comparison of microstructure and mechanical properties of A356 aluminum alloy/Al₂O₃ composites fabricated by stir and compo-casting processes, *Materials & Design*, 2012, 36, 106-111.
- [10] Kolahdooz A., Nourouzi S., Bakhshi-Jooybari M., Hosseinipour S.J., Experimental investigation of the effect of temperature in semisolid casting using cooling slope method, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 2016, 30(4) 316-325.
- [11] Kalpakjian S., Schmid S.R., *Manufacturing Processes for Engineering Materials*, Fourth Edition, Pearson Education, 2004.
- [12] Ahmadabadi N., Pahlevani, M., Babaghorbani, F., Effect of slope plate variable and reheating on the semi-solid structure of ductile cast iron, *Tsinghua Science and Technology*, 2008, 13(2) 147-151.
- [13] Kolahdooz A., Nourouzi S., Bakhshi M., Gorji A., Effective of remelting process Al alloys produced with cooling slope method, 11th National Conference on Manufacturing Engineering, Tabriz University, 2010.
- [14] Nourouzi S., Ghavamodini S.M., Baseri H., Kolahdooz A., Botkan M., Microstructure evolution of A356 aluminum alloy produced by cooling slope method, *Advanced Materials Research*, 2012, 402, 272-276.
- [15] Nourouzi S., Baseri H., Kolahdooz A., Ghavamodini S.M., Optimization of semi-solid metal processing of A356 aluminum alloy, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2013, 27(12) 3869-3874.
- [16] Ranjbarpour H., Nourouzi S., Hosseinipour S.J., Effect of Pouring Temperature and Partial Remelting on Microstructure and Wear Properties of A390 Alloy in Slope Cooling Casting, in Persian, *Founding Research Journal*, 2017, 1(1) 37-46.
- [۱۷] آقاکریمی ح.، غلامی پور ر.، شهری ف.، بایگان م.، بررسی اثر پارامترهای ریخته‌گری نیمه‌جامد به روش همزدن مکانیکی بر ریزساختار و خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیم ۳۱۹. دومین همایش بین‌المللی و هفتمین همایش مشترک انجمن مهندسی متالورژی

