

بررسی عوامل مختلف و اتمسفر محافظ روی خواص آلیاژ آلومینیوم در فرآیند بارریزی با روش سطح شیب‌دار خنک‌کننده

امین کلاه‌دوز^۱، سلمان نوروزی^{۲*}، محمد بخشی جویباری^۳ و سیدجمال حسینی‌پور^۴

دانشکده مهندسی مکانیک

دانشگاه صنعتی بابل

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۶/۲۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۱۰/۲۰)

چکیده

روش ریخته‌گری سطح شیب‌دار از فرآیندهای شکل‌دهی در حالت نیمه‌جامد می‌باشد که در آن، مذاب با دمای بارریزی مناسب روی سطح شیب‌دار خنک‌شونده به‌منظور ریز و غیردندریتی کردن ریزساختار ریخته می‌شود. پارامترهایی مانند طول و زاویه سطح شیب‌دار، دما و نرخ بارریزی و جنس و دمای قالب روی ریزساختار و مورفولوژی فازهای موجود در قطعه تولیدی تأثیرگذارند. در این تحقیق در ابتدا تأثیر عوامل مؤثر فرآیند بر ریزساختار و در ادامه، روابط مؤثر و حاکم در فرآیند سطح شیب‌دار و تأثیر آنها بر قطر میانگین دانه‌ها و سختی آلیاژ آلومینیوم A356 مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد که تأثیر هم‌زمان طول سطح شیب‌دار و نرخ بارریزی بر قطر میانگین دانه و سختی از دیگر عوامل بیشتر است. مزایای استفاده از اتمسفر محافظ در این روش، با استفاده از آزمون‌های مختلفی از جمله XRD و آلتراسونیک مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که به‌کارگیری از اتمسفر محافظ تأثیری روی اندازه دانه نداشته اما به‌دلیل کاهش میزان ناخالصی و تخلخل که در ریزساختار به‌وجود آمده، باعث افزایش شکل‌پذیری و استحکام آلیاژ به‌ترتیب به میزان ۱۷/۸ و ۲۸/۱ درصد شده‌است.

واژه‌های کلیدی: بارریزی نیمه‌جامد، سطح شیب‌دار خنک‌کننده، کنترل اتمسفر، XRD، تست التراسونیک

Study of Various Factors and the Protective Atmosphere on Aluminum Alloy Properties in Casting Process With Cooling Slope Method

A. Kolahdooz, S. Nourouzi, M. Bakhshi and S.J. Hosseinipour

Mechanical Engineering Department

Babol University of Technology

(Received: 11/September/2013; Accepted: 10/January/2014)

ABSTRACT

The cooling slope (CS) method is one of the forming processes in semi-solid state that the molten alloy with a suitable pouring temperature is poured on a cooling slope for achieving fine and non-dendritic structure. In this method, the parameters such as cooling slope length and angle, pouring temperature and rate, mold temperature were affected on microstructure and morphology of primary phases. In this paper, at first discusses the effect of these parameters on the final microstructure of A356 aluminum alloy and the effective equations in cooling slope process and their influence on the grain size diameter and hardness were examined. It was found that both cooling slope length and pouring rate on grain size diameter and hardness are more effective than other factors. The advantages of using the protective atmosphere with tests such as XRD and ultrasonic test are studied. The results shown that with using the protective atmosphere in cooling slope method don't have a significant effect on the grain size diameter. However, the strength and ductility of the alloy is increased 17.8 and 28.1% respectively, due to the reduction in the porosities and inclusions.

Keywords: Semisolid Casting, Cooling Slope, the Controlled Atmosphere, XRD, Ultrasonic Test

۱- دانشجوی دکتری: aminkolahdooz@stu.nit.ac.ir

۲- دانشیار (نویسنده پاسخگو): s-nourouzi@nit.ac.ir

۳- استاد: bakhshi@nit.ac.ir

۴- دانشیار: j.hosseini@nit.ac.ir

۱- مقدمه

فرایند شکل‌دهی نیمه‌جامد، فن‌آوری نسبتاً جدیدی در شکل‌دهی فلزات می‌باشد که با روش‌های معمول شکل‌دهی فلزات متمایز است که در آن از فلز مذاب (ریخته‌گری) و یا فلز جامد (فورج)، به‌عنوان مواد اولیه استفاده می‌شود. امروزه تحقیقات زیادی در زمینه شکل‌دهی نیمه‌جامد آلیاژهای مختلف انجام می‌شود. عمده این پژوهش‌ها روی آلیاژهای با نقطه ذوب پایین همانند آلیاژ آلومینیوم متمرکز شده‌اند. از مزایای این فرایند می‌توان به کاهش مصرف انرژی، کاهش انقباض حین انجماد و افزایش خواص مکانیکی نسبت به حالت ریخته‌گری معمولی اشاره کرد. از روش‌های ایجاد ساختار غیر دندریتی در حالت نیمه‌جامد می‌توان، هم‌زدن مکانیکی [۱ و ۲]، تلاطم الکترومغناطیسی [۳] و سطح شیب‌دار [۴ و ۵] را نام برد.

روش سطح شیب‌دار یکی از روش‌های شکل‌دهی نیمه‌جامد است که به‌دلیل برخورداری از فناوری ساده به‌ویژه در ریخته‌گری مداوم مورد توجه می‌باشد. در این روش، در اثر تماس مذاب با سطح شیب‌دار و انتقال حرارت زیاد، جوانه‌های جامد تشکیل می‌شود که این جوانه‌ها به‌دلیل تلاطم جریان مذاب و اعمال تنش برشی، از سطح جدا شده و داخل مذاب توزیع می‌شوند. این ذرات جامد پس از پراکنده شدن در توده مذاب در حال سرد شدن، ساختار غیردندریتی مورد نیاز را ایجاد می‌کنند [۶]. در روش سطح شیب‌دار، پارامترهای مختلفی از قبیل: مشخصه‌های سطح شیب‌دار، نرخ سرد شدن دوغاب^۱، دمای مذاب‌ریزی و دمای پیش‌گرم قالب، بر ریزساختار نهایی تأثیرگذار می‌باشد [۷ و ۸].

محققین زیادی برای رسیدن به ریزساختار غیردندریتی ریزتر به بررسی پارامترهای این روش پرداخته‌اند. بیروول^۲ [۶] نمونه‌هایی را با بارریزی آلیاژ آلومینیوم A۳۵۶ روی سطح شیب‌دار تهیه کرد. در این تحقیق گزارش شده است که افزایش دمای بارریزی نیازمند افزایش طول سطح خنک‌کننده است.

هاگا^۳ و همکاران [۹] به بررسی اثر دمای بارریزی و جنس قالب، بر ریزساختار شمش‌های تولید شده از آلیاژ آلومینیوم Al-۶Si% پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که با استفاده از سطح شیب‌دار استحکام کششی و درصد ازدیاد طول، در مقایسه با بارریزی ثقلی، ارتقاء یافت. موحدی و همکاران [۱۰] به بررسی

اثر زاویه سطح شیب‌دار بر ریزساختار نیمه‌جامد آلیاژ A۱۷۰۷۵ پرداختند. محققین مذکور در این پژوهش بیان داشتند که قطر متوسط و کرویت ذرات فاز اولیه تابع نرخ کرنش برشی و مدت زمان اعمال، سرعت سرد شدن و کسر حجمی فاز جامد در مخلوط نیمه‌جامد می‌باشد. نیلی احمدآبادی و همکاران [۱۱] به بررسی اثر دمای سطح شیب‌دار بر ریزساختار آلیاژ آلومینیوم A۳۵۶ پرداختند. آنها بیان داشتند که با انجام بارریزی به‌صورت پیوسته، دمای سطح افزایش می‌یابد. این افزایش دما باعث کاهش اثر خنک‌کنندگی سطح شیب‌دار و کاهش پدیده جداشدن ذرات جامد شده، در نتیجه مذاب تقریباً به‌صورت کامل وارد قالب شده که سبب می‌شود ساختار نهایی ساختاری غیر کرووی یا با کرویت کم باشد. تقوی و همکاران [۱۲] به بررسی اثر طول و زاویه سطح شیب‌دار خنک‌شونده با سامانه آب‌گرد بر ریزساختار آلیاژ آلومینیوم A۳۵۶ پرداختند. نتایج به‌دست آمده نشان داد که با افزایش زاویه سطح شیب‌دار، اندازه ذرات فاز جامد اولیه ابتدا کاهش یافته و مورفولوژی ذرات به مورفولوژی کرووی نزدیک‌تر می‌گردد. نوروزی و همکاران [۱۳] خواص ریزساختاری آلیاژ آلومینیوم را در فرآیند بارریزی روی سطح شیب‌دار بررسی کردند. آنان در مقاله خود به بررسی اثر دمای بارریزی و دمای قالب پرداخته‌اند. آن محققان اعلام داشتند که دمای بارریزی تأثیر زیادی در اندازه دانه‌های فاز اولیه خواهد داشت در صورتی که دمای قالب باعث بهبود میزان کرویت دانه‌های به‌وجود آمده می‌شود.

حسینی و همکاران [۱۴] نیز به بررسی عواملی همچون دمای بارریزی، زاویه و طول سطح شیب‌دار روی اندازه دانه و کرویت آلیاژ آلومینیوم پرداختند.

همان‌گونه که مشخص است تحقیقات صورت پذیرفته در این مسیر تنها به بررسی اثر یک یا دو عامل، به‌ویژه عواملی مانند طول و زاویه سطح شیب‌دار و یا دمای بارریزی پرداخته شده است. در تحقیق حاضر برای اولین بار از یک سطح شیب‌دار خنک‌شونده با قابلیت اعمال اتمسفر محافظ و بارریزی یکنواخت با نرخ بارریزی مختلف، استفاده شد. در گام نخست، تأثیر عوامل مختلف بر میزان اندازه دانه و سختی با استفاده از روش طراحی آزمایش مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت و در مرحله بعد، با به‌دست آوردن پارامترهای بهینه، خواص نمونه‌های ریخته‌شده در هوا و تحت اتمسفر گاز آرگون مورد بررسی قرار گرفت.

1- Slurry

2- Birol

3- Haga

۲- روش تحقیق

برای انجام این تحقیق، کارهای زیر صورت پذیرفت:

۲-۱- مواد و روش

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 بوتله‌ای از جنس کاربید سیلیسیم و توسط یک کوره مقاوم‌تی حرارت داده شد تا ذوب گردد، پس از آنکه آلیاژ مذاب به دماهای بارریزی مورد نظر رسید (جدول ۲) روی سطح شیب‌دار از جنس مس به طول ۷۰۰mm و عرض ۱۰۰mm جریان یافته و در انتها به درون قالب استوانه‌ای به قطر ۸۰mm و طول ۲۰۰mm هدایت شد.

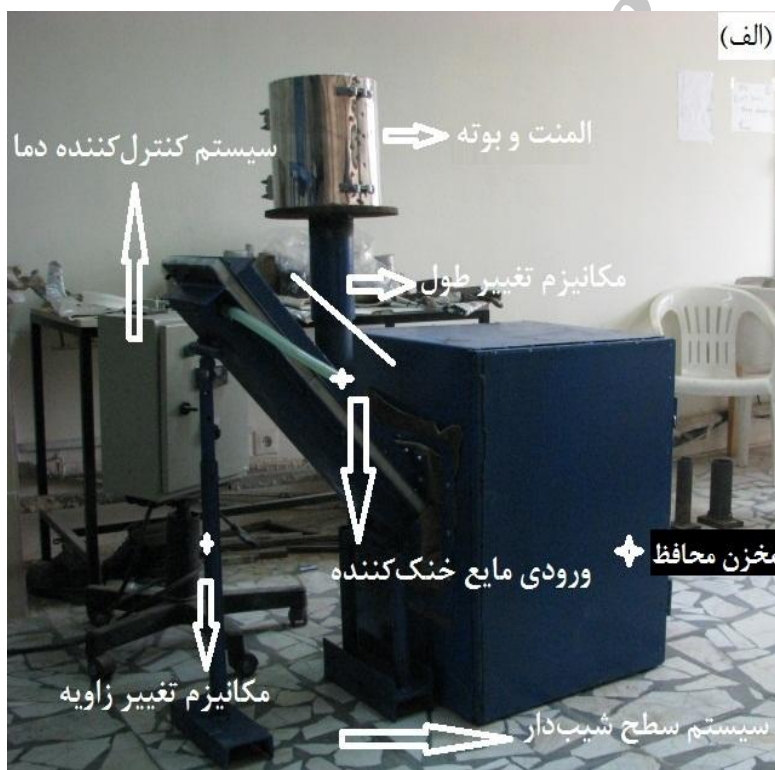
جدول (۱): ترکیب شیمیایی آلیاژ مورد استفاده (درصد وزنی).

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.

پارامتر	شرایط بارریزی	با سامانه خنک‌کننده
(A)	دمای بارریزی (°C)	۶۲۵، ۶۵۰، ۶۸۰
(B)	نرخ بارریزی (mm/s)	۸ (۱)، ۱۲ (۲)، ۲۰ (۳)
(C)	طول سطح شیب‌دار (mm)	۴۰۰، ۵۰۰، ۶۰۰
(D)	زاویه سطح شیب‌دار (درجه)	۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰

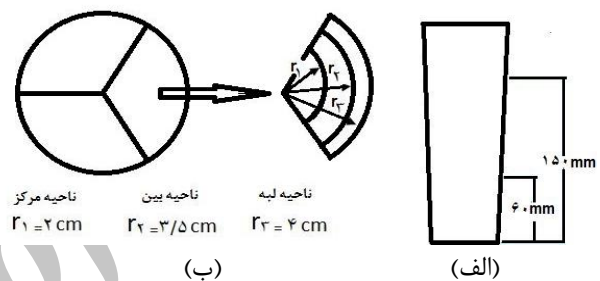
در شکل ۱ مجموعه سطح شیب‌دار مورد استفاده در این تحقیق نشان داده شده است. جهت مقایسه با نمونه‌های بارریزی شده روی سطح شیب‌دار یک نمونه با روش متداول بارریزی با دمای بارریزی ۶۸۰°C در قالب فلزی با دمای قالب ۲۵°C بارریزی شد و ریزساختار آن به عنوان مبنا در نظر گرفته شد. قابل ذکر است که جهت جلوگیری از چسبیدن مذاب به سطح قالب، سطح داخلی قالب به وسیله اکسید زیرکونیم پوشش داده شد.



شکل (۱): نمای بخش‌های مختلف دستگاه سطح شیب‌دار، (الف) مجموعه مونتاژ (ب) متعلقات سطح خنک‌کننده (ج) نمای بالایی از المنت و بوتله.

۲-۲- مشخصه‌یابی

جهت بررسی ریزساختار، عملیات تهیه و آماده‌سازی نمونه‌ها به این صورت بود که پس از اتمام بارریزی و خنک‌شدن قطعات در دمای محیط، دو برش در فاصله ۶۰ mm و ۱۵۰ mm از قسمت تحتانی آن انجام شد تا خواص ریزساختاری برای هر نمونه در شرایط یکسان مورد ارزیابی قرار بگیرد (شکل ۲). بدین منظور بعد از برش نمونه‌ها، گوشه‌های نمونه متالوگرافی به‌وسیله سوهان از حالت تیزی خارج گردیده و در ادامه سطح مورد نظر به‌وسیله سمباده‌های شماره ۱۸۰، ۳۲۰، ۶۰۰، ۸۰۰، ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ سمباده‌کاری شدند.



شکل (۲): شماتیک برش نمونه‌ها (الف) نمونه بارریزی شده (ب) قسمت‌هایی مشخص شده برای مطالعه ریزساختاری.

در مرحله بعد، نمونه‌ها به‌دقت شستشو می‌شوند تا تمام ذرات فلزی به‌جامانده از روی سطح خارج گردد. سپس عمل صیقل‌کاری با استفاده از خمیر الماسه ۰/۵ میکرون با دقت زیاد انجام شد و بعد از شستشوی کامل سطح، نمونه در مجاورت هوای گرم، خشک شدند. جهت حکاکی‌کردن نمونه‌ها، از محلول رنگی وک^۱ با ترکیب ۱۰۰ میلی‌لیتر آب، ۴ گرم $KMnO_4$ و یک گرم $NaOH$ استفاده گردید نمونه‌ها بعد از حکاکی با الکل شستشو شده و در مجاورت هوای گرم، خشک شدند. در انتها ریزساختار نمونه‌ها به‌وسیله میکروسکوپ نوری مورد مطالعه قرار گرفت. تصویر میکروسکوپی حاوی حدود ۲۰۰ دانه برای محاسبه قطر متوسط^۲ آنها توسط نرم‌افزار آنالیز تصاویر استفاده شد.

۲-۳- طراحی آزمایش

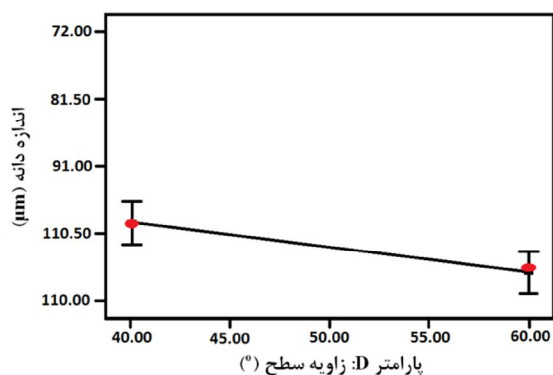
جهت تعیین شرایط بهینه سطح شیب‌دار خنک‌کننده به‌منظور ایجاد خواص ریزساختاری و مکانیکی مطلوب در قطعات ریخته

شده نهایی، دو روش مختلف در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است. در روش اول، آزمایشات در ۳ مرحله اجرا شد: در گام نخست برای بررسی تأثیر دمای بارریزی بر ریزساختار، ابتدا با انتخاب زاویه ثابت 50° و طول ثابت ۵۰۰ mm، بارریزی در دماهای ۶۸۰، ۶۵۰، ۶۲۵، ۶۱۵ و $600^\circ C$ صورت گرفت. با کاهش دمای بارریزی تا $625^\circ C$ ریزساختار از لحاظ اندازه دانه و میزان کرویت حالت مطلوبی پیدا کرد. با کاهش بیشتر دمای بارریزی (به زیر $625^\circ C$) روند بهبودی ریزساختار متوقف شد به‌طوری که در دمای $600^\circ C$ به‌دلیل انجماد بیش از حد، مخلوط مذاب-جامد به‌طور کامل قالب را پر نکرد. بنابراین بارریزی در دمای کمتر از $625^\circ C$ مناسب نمی‌باشد. برای بررسی بیشتر اثر دمای بارریزی با انتخاب زاویه ثابت 40° و طول ۴۰۰ mm، بارریزی در دماهای ۶۸۰، ۶۵۰ و $625^\circ C$ انجام شد. در گام دوم به‌منظور بررسی تأثیر متقابل طول و زاویه، بارریزی در زوایای 40° ، 50° و 60° در طول‌های ۴۰۰ و ۶۰۰ mm در دمای $650^\circ C$ انجام شد. برای بررسی تأثیر متقابل دمای بارریزی و زاویه بر ریزساختار، بارریزی با دمای $625^\circ C$ نیز در طول ۵۰۰ mm در زوایای 40° ، 50° و 60° صورت پذیرفت. در گام سوم به‌منظور بررسی تأثیر متقابل طول و زاویه بارریزی بر ریزساختار، بارریزی با دمای $650^\circ C$ در طول‌های مختلف در زوایای 40° و 50° انجام شد و به‌منظور بررسی تأثیر متقابل طول و دمای بارریزی بر ریزساختار، بارریزی در دمای $625^\circ C$ نیز در زاویه 50° در سه طول ۴۰۰، ۵۰۰ و ۶۰۰ mm انجام شد. با توجه به اینکه اثر متقابل پارامترها تأثیر زیادی روی فرآیند ایجاد نمود. در جهت تعیین شرایط بهینه و تأثیرات این عوامل روش طراحی فاکتوریل با سامانه سه نقطه‌ای جهت بهبود دقت مدل و بررسی انحنای آن به‌عنوان روش دوم مورد آزمایش قرار گرفت. از این مدل در جهت بررسی قابلیت تولید مجدد آلیاژ، بهبود خطای تصادفی آزمایش و بررسی غیرخطی بودن یا نبودن رفتار مدل، استفاده می‌شود. در ضمن طراحی فاکتوریل دو سطحی ساده‌ترین نوع طراحی فاکتوریل می‌باشد که با استفاده از دو سطح سبب کاهش تعداد شرایط آزمایش می‌گردد. با انتخاب طراحی با دو سطح و n فاکتور، داده‌های تحت پردازش بایستی هر یک در کنج یک فضای n بعدی قرار گیرند. تمامی آزمایش‌ها در حالت تصادفی انجام گرفت تا بتوان اثرات عوامل غیر قابل کنترل بر نتایج را به کمترین میزان ممکن کاهش داد. طراحی و تحلیل آماری آزمایش‌ها توسط نرم‌افزار MiniTab انجام شد.

1- Weck
2- Average Grain Size

۳- نتایج و بحث

زاویه سطح شیب‌دار از طریق تأثیرگذاری بر عواملی مانند: نرخ تنش‌برشی و زمان اعمال تنش‌برشی بر دوغاب نیمه‌جامد و کسر حجمی فاز جامد به هنگام اعمال تنش‌برشی، می‌تواند بر ریزساختار نهایی مؤثر باشد (شکل ۴). با افزایش زاویه، میزان تنش‌برشی و تلاطم ایجاد شده در مذاب، افزایش می‌یابد. افزایش میزان تنش‌برشی و سرعت جریان مذاب، موجب افزایش تغییر شکل پلاستیک، ذوب دندریت‌های رشد یافته روی سطح شیب‌دار در ناحیه ریشه و جدا شدن آنها از سطح و نیز شدت یافتن پدیده برخورد ذرات می‌شود که برای ایجاد ساختار ریز و غیردندریتی مناسب است. اما با افزایش نامناسب زاویه، مدت زمان اعمال تنش‌برشی و مقدار کسر جامد تشکیل شده روی سطح شیب‌دار کاهش یافته که این دو اثر می‌توانند باعث ایجاد ساختار نامناسب شوند. بنابراین در وضعیتی که سایر پارامترهای فرآیند سطح شیب‌دار ثابت در نظر گرفته می‌شود، قطر متوسط دانه‌ها تابعی از زاویه سطح شیب‌دار است.



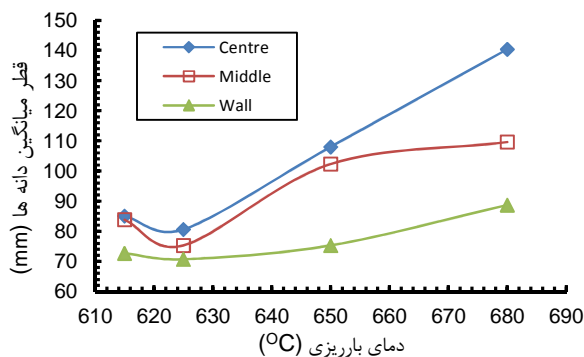
شکل (۴): اثر زاویه سطح شیب‌دار روی اندازه دانه در دمای بارریزی 680°C ، نرخ بارریزی 20 mm/s و طول سطح شیب‌دار 400 mm .

طول بارریزی از طریق تأثیرگذاری بر عواملی مانند زمان اعمال تنش‌برشی بر مخلوط مذاب- جامد و کسر حجمی فاز جامد به هنگام اعمال تنش‌برشی، بر ریزساختار نهایی تأثیرگذار است (شکل ۵). در طول‌های بارریزی کم، مدت تماس مذاب با سطح شیب‌دار کم بوده و مذاب سریع‌تر از روی سطح عبور کرده و عمدتاً به درون قالب هدایت می‌شود. به همین دلیل، مدت زمان اعمال تنش‌برشی بر مخلوط مذاب- جامد و تبادل حرارت برای ایجاد کسر جامد مناسب، کافی نمی‌باشد. بنابراین انتظار می‌رود که با افزایش طول بارریزی، انتقال حرارت میان مذاب و سطح

تغییر و اصلاح ریزساختار در فرآیند ریخته‌گری سطح شیب‌دار را می‌توان به پارامترهایی همچون کسر جامد مناسب، اعمال تنش‌برشی، مدت زمان اعمال تنش‌برشی و نرخ سردشدن در حالت نیمه‌جامد نسبت داد. برای رسیدن به ترکیب مناسبی از چهار پارامتر ذکر شده باید به شرایط بهینه‌ای از عوامل تأثیرگذار بر آنها همچون دمای بارریزی، دما و جنس قالب، مشخصات سطح شیب‌دار (طول، زاویه، جنس و سامانه خنک‌کاری) و فاصله نازل تا سطح دست یافت. در این تحقیق، برای بررسی اثر خنک‌کنندگی سطح شیب‌دار، مذاب با دماهای مختلف 680°C ، 650°C و 625°C در طول ثابت 500 mm و زاویه 50° روی سطح شیب‌دار با استفاده از سامانه آب‌گرد و با دمای آب 18°C ، ریخته‌گری شد [۱۵].

۳-۱- تأثیر مستقل پارامترها

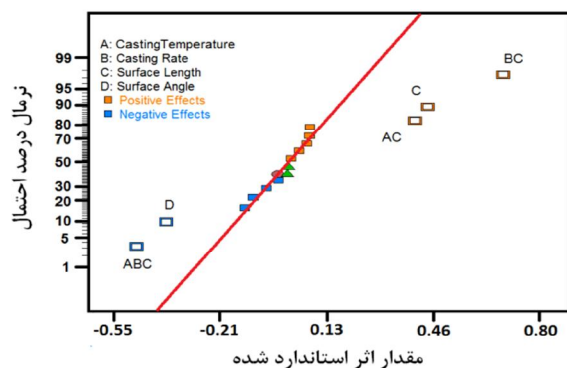
دمای بارریزی یکی از عوامل مهم و مؤثر در فرآیند سطح شیب‌دار است. شکل ۳ تأثیر این عامل را روی اندازه دانه‌ها نشان می‌دهد. می‌توان گفت تأثیر این پارامتر روی میزان کسر جامد ایجاد شده می‌باشد. اگر این دما خیلی کاهش یابد، باعث افزایش نامناسب کسر جامد می‌شود که به دنبال آن اندازه متوسط ذرات و درجه آگلومره شدن افزایش و میزان کرویت کاهش می‌یابد. برعکس، با افزایش بیش از حد دمای بارریزی، گرمایی که به سامانه تحمیل می‌شود بیشتر شده و مناطق جامد و خمیری روی سطح محدودتر شده و تدریجاً محو می‌شوند. بدین ترتیب، پدیده تشکیل ذرات جامد روی سطح و جدا شدن آنها بر اثر جریان و ریختن مخلوط نیمه‌جامد به درون قالب منتفی شده و مورفولوژی ذرات حاصل دندریتی خواهد بود. این مسأله اهمیت رسیدن به دمای بارریزی بهینه را نشان می‌دهد [۱۵].



شکل (۳): اثر دمای بارریزی روی اندازه دانه در نرخ بارریزی 20 mm/s و زاویه سطح شیب‌دار 60° [۱۵].

۳-۲- تأثیر پارامترها روی کمترین قطر میانگین دانه‌ها

بر اساس آزمایشات انجام گرفته و داده‌های خواسته شده در نرم‌افزار MiniTab، نمودار نرمال عوامل موجود بر کمترین قطر میانگین دانه‌ها به صورت شکل ۷ می‌باشد. در این نمودار هر چه یک اثر از خط دورتر باشد اثر بیشتری بر مدل دارا خواهد بود. پیشی گرفتن عامل واکنش هم زمان سه‌گانه ABC از عامل طول سطح شیب‌دار (C) در میزان تأثیر بر مدل قابل تامل است. علت این امر را با در نظر گرفتن نقش طول سطح شیب‌دار در تولید دوغاب نیمه جامد می‌توان توجیه کرد. نقش طول سطح شیب‌دار در کاهش دمای مذاب، ایجاد جوانه‌های اولیه و مدت زمان اعمال تنش بر مذاب تجلی می‌یابد.



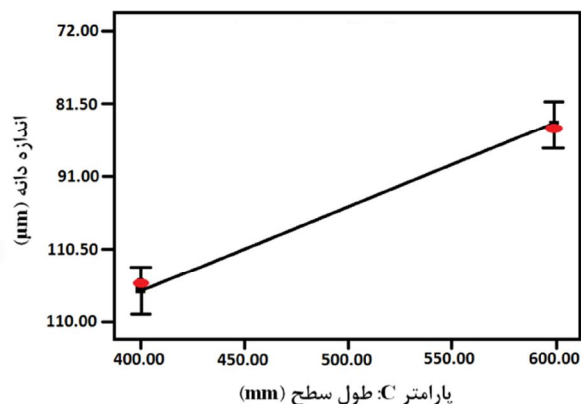
شکل (۷): نمودار تأثیر عوامل مختلف در محاسبه کمترین قطر میانگین دانه‌ها.

در جدول ۳ لیست عوامل مؤثر بر کمترین قطر میانگین دانه‌ها ارائه شده است. بیشترین تأثیر مربوط به واکنش هم‌زمان بین عوامل طول سطح شیب‌دار و نرخ بارریزی (BC)، واکنش هم‌زمان بین عوامل دمای بارریزی و نرخ بارریزی و طول سطح شیب‌دار (ABC)، طول سطح شیب‌دار (C)، واکنش هم‌زمان بین عوامل طول سطح و دمای بارریزی (AC) و زاویه سطح شیب‌دار می‌باشد.

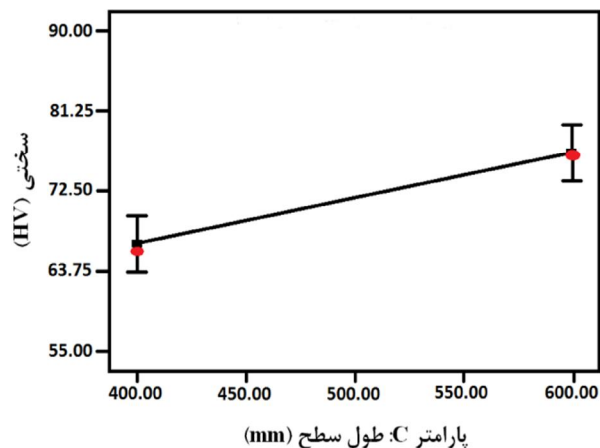
جدول (۳): لیست عوامل مؤثر بر کمترین قطر میانگین دانه‌ها.

پارامتر	درصد تأثیر بر اندازه دانه
واکنش هم زمان BC	۴۱/۴۵
واکنش هم زمان ABC	۱۸/۶۷
طول سطح شیب‌دار	۱۶/۳۵
واکنش هم زمان AC	۱۳/۱۴
زاویه سطح شیب‌دار	۷/۲۳

شیب‌دار و در پی آن امکان ایجاد کسر جامد مناسب افزایش یافته و در نتیجه میزان جوانه‌زنی ذرات افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش طول بارریزی، مدت زمان اعمال تنش برشی افزایش می‌یابد که خود عاملی مهم در افزایش میزان جدا شدن کریستال‌های فاز اولیه و افزایش میزان خردشدن ساختار دندریتی است. پیامد دو عامل مهم ذکر شده، کاهش اندازه ذرات فاز اولیه و نزدیک شدن هر چه بیشتر مورفولوژی آنها به مورفولوژی کروی، برای یک طول بهینه است. اما با افزایش بیش از حد طول تماس، به دلیل افزایش کسر جامد تشکیل شده روی سطح شیب‌دار و آگلومره شدن ذرات، اندازه ذرات افزایش و به دنبال آن اندازه دانه افزایش می‌یابد. در شکل ۶ تأثیر طول سطح شیب‌دار بر میزان سختی نشان داده شده است. روشن است که افزایش سختی هم‌زمان با کاهش اندازه دانه‌ها حادث می‌شود.

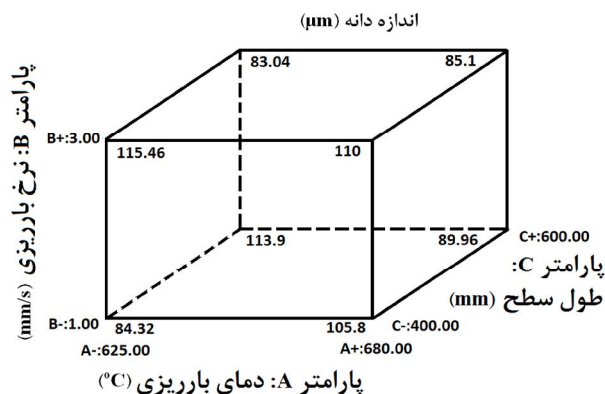


شکل (۵): اثر طول سطح شیب‌دار روی اندازه دانه در دمای بارریزی 680°C ، نرخ بارریزی 20 mm/s و زاویه سطح شیب‌دار 60° .



شکل (۶): اثر طول سطح شیب‌دار روی مقدار سختی در دمای بارریزی 625°C ، نرخ بارریزی 20 mm/s و زاویه سطح شیب‌دار 60° .

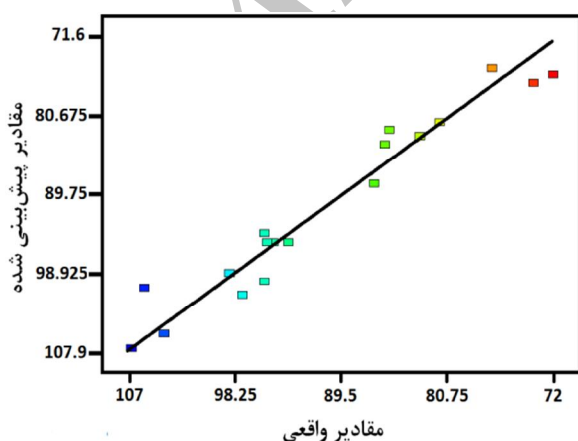
جوانه‌زنی کامل داشته باشد از روی سطح با طول کم عبور می‌کند که این امر باعث کاهش اثر سازوکار تبریدی سطح می‌گردد. با افزایش طول سطح شیب‌دار مشاهده می‌شود که اثر دمای بارریزی افزایش یافته و قطر میانگین دانه‌ها کاهش می‌یابد.



شکل (۹): نمودار مکعبی تأثیر واکنش هم‌زمان پارامترهای ABC بر کمترین مقدار اندازه دانه‌ها در زاویه سطح ۶۰°

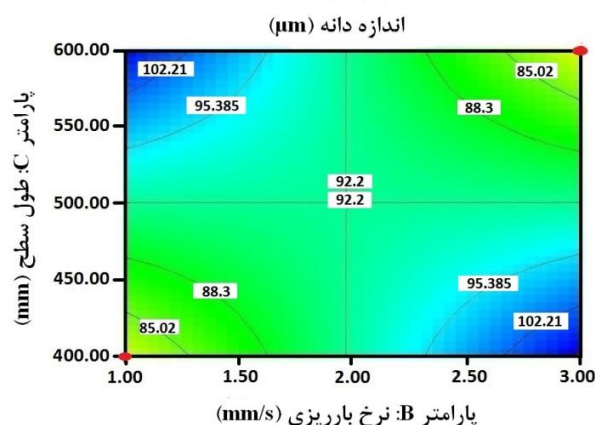
شکل ۱۰ نمودار میانگین اندازه دانه‌های محاسبه شده را بر حسب میانگین اندازه دانه‌های واقعی نشان می‌دهد. همان‌طور که در این نمودار مشخص است داده‌ها پراکندگی بسیار کمی نسبت به خط با شیب یک دارند. بنابراین می‌توان ادعا نمود که مدل ریاضی به‌دست آمده برای پاسخ میانگین اندازه دانه‌ها از دقت خوبی برخوردار است. رابطه (۱) رابطه میانگین قطر دانه‌ها را بر حسب عوامل ورودی سامانه حاصل از نرم افزار نشان می‌دهد.

$$Grain\ Size = 87.54 - 0.30ABC + 0.36BC + 0.19AC + 0.31C - 0.21D \quad (1)$$



شکل (۱۰): نمودار میانگین اندازه دانه‌ها.

تأثیر واکنش هم‌زمان طول سطح شیب‌دار و نرخ بارریزی دارای بیشترین اثر بر عدد اندازه دانه می‌باشد. با توجه به منحنی دوبعدی در شکل ۸ مشاهده می‌شود که در دو ناحیه بالا سمت راست و پایین سمت چپ از نمودار میزان اندازه دانه در نمای تأثیر دو عامل B و C به کمترین مقدار خود رسیده است.



شکل (۸): نمودار دوبعدی تأثیر برای واکنش هم‌زمان BC در رفتار کمترین قطر میانگین دانه‌ها در دمای ۶۲۵°C و زاویه سطح ۶۰°

با افزایش نرخ بارریزی و افزایش طول سطح شیب‌دار، میانگین اندازه دانه‌ها به کمترین مقدار خود رسیده که علت این امر را می‌توان در عبور سریع‌تر مذاب روی سطح و بنابراین کاهش احتمال انجماد مذاب روی آن به علت انتخاب نرخ بارریزی بالاتر و افزایش مدت زمان اعمال تنش بر سیال دانست. در این صورت، علاوه بر تشکیل کامل تعداد جوانه‌ها، سیر تشکیل دانه‌های غیر دندریتی به‌طور کامل انجام می‌گیرد. دومین عامل مؤثر بر اندازه دانه‌ها را واکنش هم‌زمان بین عوامل دمای بارریزی، نرخ بارریزی و طول سطح شیب‌دار تشکیل می‌دهد.

جهت بررسی چگونگی تأثیر تغییرات هم‌زمان این سه عامل بر این مدل، از نمودار مکعبی شکل ۹ استفاده شده است. همان‌طور که مشخص است، تأثیر عامل ABC بر اندازه دانه‌ها تأثیری منفی است (به‌علت آنکه این عامل در سمت چپ نمودار نرمال قرار گرفته است شکل ۷)، بدین معنی که با مثبت شدن واکنش ABC میزان اندازه دانه افزایش می‌یابد. در نرخ بارریزی ۲۰ mm/s و طول سطح ۴۰۰ mm، اثر دمای بارریزی به‌شدت کاهش می‌یابد. علت این امر را در اثر افزایش نرخ بارریزی بر عملکرد سطح شیب‌دار می‌توان جست و جو نمود. با افزایش نرخ بارریزی، سطح شیب‌دار عملکرد خوبی نداشته و مذاب قبل از آنکه فرصت کافی برای

است تماس بسیار کمتری با سطح شیب‌دار داشته و تنها و روی مذاب‌های منجمد شده روی سطح لغزیده است (کاهش اثر تبریدی سطح). با افزایش نرخ بارریزی و افزایش طول سطح شیب‌دار، باز هم میزان سختی به بیشترین مقدار خود رسیده است. علت این امر را می‌توان در عبور سریع‌تر مذاب روی سطح و بنابراین کاهش احتمال انجماد مذاب روی آن به علت انتخاب نرخ بارریزی بالاتر دانست.

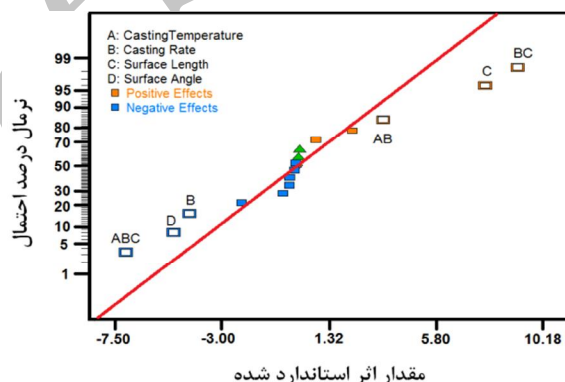
جدول (۴): لیست عوامل مؤثر بر بیشترین مقدار سختی.

عامل	درصد تأثیر بر سختی
واکنش هم‌زمان BC	۳۸/۲۴
واکنش هم‌زمان ABC	۲۱/۶۳
طول سطح شیب‌دار	۱۷/۵۳
زاویه سطح شیب‌دار	۸/۱۸
نرخ بارریزی	۵/۸۲
واکنش هم‌زمان AB	۴/۱۲

بنابراین علاوه بر تشکیل کامل تعداد جوانه‌ها، سیر تشکیل دانه‌های غیردندریتی به‌طور کامل انجام می‌گیرد. بنابراین هر دو سازوکار برشی و تبریدی به‌خوبی فعال هستند. دومین عامل مؤثر بر مقدار سختی، واکنش هم‌زمان بین عوامل دمای بارریزی، نرخ بارریزی و طول سطح شیب‌دار با ۲۱/۶۳ درصد می‌باشد. مانند آنچه که در مبحث کمترین میانگین اندازه دانه‌ها بیان شد، در اینجا نیز اثر عامل دمای بارریزی بسیار مهم می‌باشد. در طول سطح ۴۰۰ mm و نرخ بارریزی ۸ mm/s با افزایش دمای بارریزی مقدار سختی به شدت کاهش می‌یابد. با توجه به طول کم سطح شیب‌دار در این مورد، با افزایش دمای بارریزی در حین برخورد مذاب با سطح و جاری شدن بر آن، تعداد جوانه‌های اولیه ایجاد شده به شدت کاهش می‌یابد و همین امر موجب افزایش اندازه دانه‌ها و بنابراین کاهش سختی تا مقادیر ۶۹/۹۵ ویکرز می‌گردد. طول سطح شیب‌دار، پس از واکنش‌های هم‌زمان BC و ABC دارای بیشترین اثر روی مقدار سختی می‌باشد. این پارامتر در بررسی مقدار سختی شبیه به نتایج حاصل از بررسی میانگین اندازه دانه‌ها تأثیر کمتری یافته است که علت این امر با در نظر گرفتن مهمترین عوامل مؤثر بر سختی مانند عناصر آلیاژی، فازها و اندازه دانه قابل توجه می‌باشد. در این بین نقش طول سطح شیب‌دار در تولید مخلوط نیمه‌جامد و کاهش اندازه دانه‌ها و بنابراین افزایش سختی توجیه‌پذیر است. با توجه به محدوده

۳-۳- تأثیر پارامترها بر بیشترین میزان سختی

نمودار نرمال عوامل مؤثر بر میزان سختی به‌صورت شکل ۱۱ می‌باشد. نسبت به آنچه که در مبحث کمترین قطر دانه‌ها شرح داده شد و به‌علت رابطه مستقیم اندازه دانه‌ها و میزان سختی، حذف عامل واکنش هم‌زمان دوگانه AC و افزایش تأثیر عامل زاویه سطح شیب‌دار بر مدل قابل تأمل است. همچنین نرخ بارریزی نیز عاملی مؤثر تلقی شده و درصد تأثیر تقریباً برابری با عامل زاویه سطح شیب‌دار یافته است. جهت بررسی رفتار هر عامل در مدل سختی می‌بایست ابتدا شرایط متالورژیکی مؤثر بر سختی را بررسی کرد. مهمترین عوامل متالورژیکی مؤثر بر سختی شامل اندازه دانه و عناصر آلیاژی و فازهای موجود در ساختار می‌باشد. با توجه به یکسان بودن عناصر آلیاژی و فازها در همه نمونه‌ها، در اینجا فقط تأثیر اندازه دانه مورد بررسی قرار می‌گیرد. در اینجا تغییرات سختی اندازه‌گیری شده ± 1 ویکرز می‌باشد.



شکل (۱۱): نمودار تأثیر عوامل مختلف در محاسبه مقدار سختی.

در جدول ۴ لیست عوامل مؤثر بر بیشترین مقدار سختی ارائه شده است. بیشترین تأثیر مربوط به واکنش هم‌زمان بین عوامل طول سطح شیب‌دار و نرخ بارریزی، واکنش هم‌زمان بین عوامل دمای بارریزی و نرخ بارریزی و طول سطح شیب‌دار، طول سطح شیب‌دار، زاویه سطح شیب‌دار، نرخ بارریزی و واکنش هم‌زمان بین عوامل دمای بارریزی و نرخ بارریزی می‌باشد.

پارامتر واکنش هم‌زمان طول سطح شیب‌دار و نرخ بارریزی بیشترین اثر را بر مقدار سختی با سهم مشارکت ۳۸/۲۴٪ دارا می‌باشد. با افزایش طول سطح علاوه بر آنکه احتمال افزایش مذاب منجمد شده روی سطح افزایش می‌یابد، سطح شیب‌دار به‌علت رخداد تمامی فرایندهای نیمه‌جامد شدن در ابتدای سطح به‌خوبی عمل نمی‌کند. بنابراین مذابی که خود را به انتهای سطح رسانده

دارد. به طوری که این واکنش‌ها منجر به ایجاد ترکیبات مختلفی می‌گردد. اکسیژن هوا و همچنین ازت موجود در آن مهمترین منشأ وجود ترکیبات غیرفلزی در مذاب آلومینیوم هستند. تمام عناصر حاصل از این واکنش‌ها جامد بوده و تحت تأثیر قانون استوکس در مذاب شناور می‌باشند و به صورت ناخالصی در قطعه ظاهر می‌شوند. هیدروژن نیز تنها گاز قابل حل در آلومینیوم مذاب می‌باشد که از طریق بخار آب و یا موجود در هوا می‌تواند با مذاب واکنش دهد. به دلیل آنکه حلالیت هیدروژن در حالت آلومینیوم جامد بسیار کم است، گازهای خارج شده از حلالیت به صورت حباب و تخلخل در قطعه ریخته شده، موجبات کاهش شدت خواص مکانیکی را به دنبال دارد.

همان‌طور که مشخص است کنترل این شرایط باعث کاهش میزان ناخالصی‌ها و حباب‌های گازی در نمونه تولیدی می‌گردد. از آنجا که بر اساس تحقیقات صورت پذیرفته، تاکنون تأثیر اتمسفر محافظ در روش سطح شیب‌دار خنک‌کننده مورد بررسی قرار نگرفته بود بنابراین در این تحقیق تأثیر اتمسفر گاز آرگون بر میزان تخلخل و ناخالصی‌های موجود در آلیاژ مورد بررسی قرار گرفت. همچنین بررسی شد که این میزان ناخالصی‌ها تا چه اندازه بر میزان خواص مکانیکی آلیاژ تولیدی در شرایط بهینه تأثیر خواهند داشت. بدین منظور آزمایشات مختلفی روی نمونه‌های تولیدی در شرایط بهینه در دو حالت در هوا و تحت اتمسفر محافظ صورت پذیرفت.

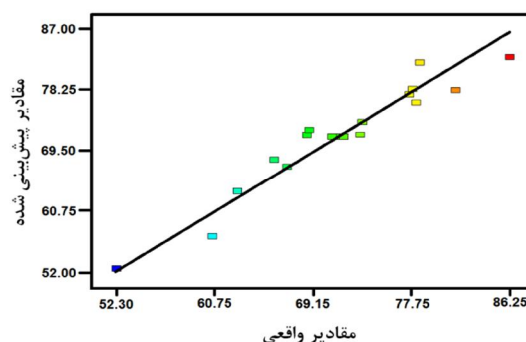
بررسی میزان تخلخل: شکل ۱۳ نمونه‌ای از تخلخل به وجود آمده در زمینه ساختار را نشان می‌دهد که با استفاده از نرم‌افزار Material Plus 4.1 مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. در شکل ۱۳ نحوه محاسبه و پیدا شدن مکان‌های مورد نظر که با رنگ قرمز متمایز شده و با نشانگر مشخص شده است را نشان می‌دهد. همچنین خروجی پارامترهای ارائه شده در نرم‌افزار درج شده‌اند.

برای بررسی میزان تخلخل نمونه از دو روش هیدرواستاتیک و آلتراسونیک استفاده شده است. روش اول، روش هیدرواستاتیک یا استفاده از قانون ارشمیدس می‌باشد. هرگاه تمام یا قسمتی از یک جسم در سیالی غوطه‌ور شود، به وسیله سیال نیرویی برابر با وزن سیال جابه‌جا شده به جسم وارد می‌شود و در نتیجه جسم سبک‌تر می‌شود. وزن سیال هم حجم جسم که معادل با مقدار سبک شدن وزن جسم است را نیروی ارشمیدس می‌نامند. وزن واقعی (W) برابر است با وزن جسم در خلأ، که معمولاً با وزن جسم در هوا برابر است و وزن ظاهری (W'') برابر با وزن جسم در سیال است.

دمایی انتخاب شده در تعیین مقادیر دمای بارریزی، سطح شیب‌دار در کاهش دمای مذاب و ایجاد جوانه‌های اولیه موفق عمل کرده است. همچنین با افزایش طول سطح شیب‌دار میزان سختی به دلیل افزایش مدت زمان توقف مذاب روی سطح افزایش یافته است. با افزایش این زمان فرصت کافی برای کاهش دمای مذاب و ایجاد کامل جوانه‌های اولیه فراهم می‌آید. با اینکه مهم‌ترین وظیفه سطح شیب‌دار، اعمال تنش بر مذاب می‌باشد که این امر سبب کاهش اثر این پارامتر بر مقدار سختی می‌شود، بایستی توجه داشت که با افزایش طول سطح، عواملی نظیر نرخ بارریزی و دمای بارریزی نیز بایستی به گونه‌ای تغییر کنند که امکان عبور کامل مذاب در طول‌های زیاد از روی سطح و بنابراین عملکرد کامل سطح شیب‌دار فراهم آید.

شکل ۱۲ نمودار مقادیر سختی محاسبه شده را بر حسب عدد سختی واقعی نشان می‌دهد. همان‌طور که در این نمودار مشخص است داده‌ها پراکندگی بسیار کمی نسبت به خط با شیب یک دارند. بنابراین می‌توان ادعا نمود که مدل ریاضی به دست آمده برای پاسخ عدد اندازه دانه از دقت خوبی برخوردار است. رابطه (۲) رابطه مقدار سختی بر حسب عوامل ورودی سامانه حاصل از نرم‌افزار را نشان می‌دهد.

$$\text{Hardness} = 68.78 - 3.76ABC + 2.96AB + 5.15BC + 4.18C - 3.38D - 1.89B. \quad (2)$$



شکل (۱۲): نمودار تغییرات مقدار سختی.

۳-۴- مقایسه حالت بهینه بارریزی در هوا و تحت اتمسفر محافظ

در تمامی تحقیقات انجام گرفته در زمینه سطح شیب‌دار، بررسی روی خواص نمونه‌های تولیدی در شرایط ریخته‌گری در هوا بوده است. بنابراین لازم است توضیح مختصری در ارتباط با رفتار گاز و فلز ارائه گردد. آلومینیوم فلزی است که به خصوص در حالت مذاب قابلیت واکنش شیمیایی و حلالیت فیزیکی با بسیار از عناصر را

روش دوم برای محاسبه میزان تخلخل استفاده از آزمون فراصوتی یا آلتراسونیک بود. دستگاه مورد استفاده در این تحقیق، نوع پالس اکو بود. این روش بیشتر از همه و به طور عام در آزمایش مواد بکار گرفته می شود. فرستنده و گیرنده موج در یک طرف قطعه قرار گرفته و حضور عیب در قطعه با دریافت یک اکو قبل از اکو برگشتی مشخص می گردد. در بیشتر حالات همان پراب فرستنده نقش دریافت کننده را هم ایفا می نماید.

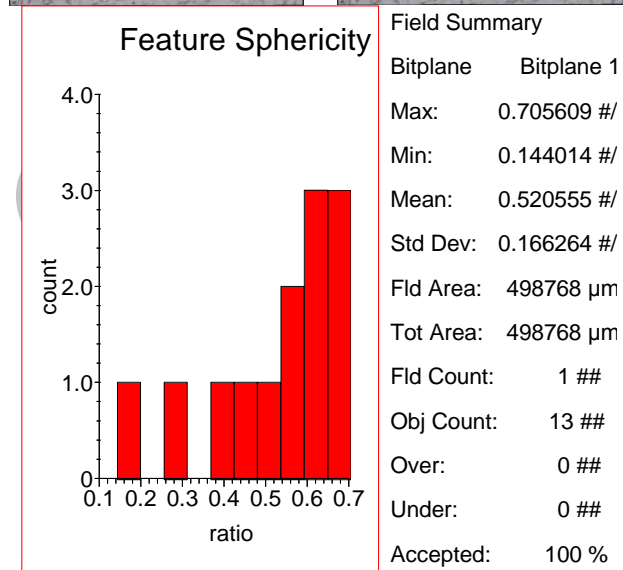
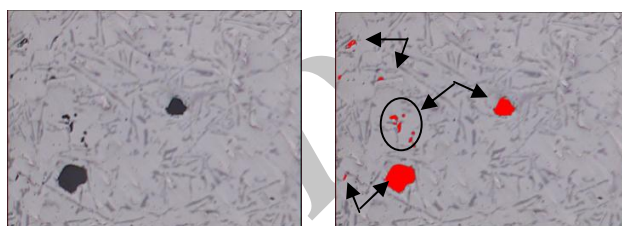
برای انجام آزمایش مربوطه در ابتدا هر دو نمونه مورد نظر (نمونه ریخته شده در هوا و تحت گاز آرگون) را به صورت شکل ۱۵ به چهار بخش تقسیم نموده تا بتوان میزان تخلخل را در محدوده کوچک تری به دست آورد. بعد از آن با استفاده از پراب هر بخش به صورت مجزا و در نواحی مربوط به آن مورد ارزیابی قرار گرفت.



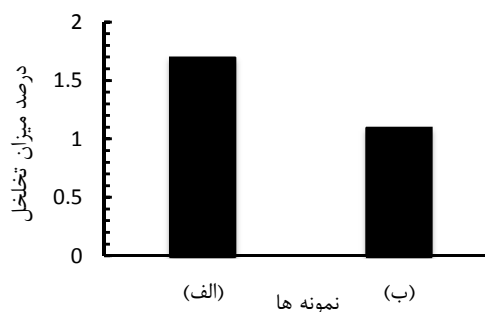
شکل (۱۵): نحوه اندازه گیری تخلخل در بخش های مختلف قطعه با روش آلتراسونیک.

شکل ۱۶ نتایج حاصل از میزان حجم تخلخل در شکل اکو برگشتی را برای هر دو نمونه و در ناحیه شماره ۴ نشان می دهد. همان گونه که مشخص است میزان تخلخل در نمونه ریخته شده در هوا بیشتر از میزان تخلخل در نمونه ریخته شده تحت گاز آرگون می باشد. هر چه میزان تخلخل کمتر باشد عدد به دست آمده از اکو برگشتی که در بالای صفحه نمایشگر نشان داده می شود کمتر خواهد بود و همان طور که در شکل مشاهده می شود این مقادیر به ترتیب برابر ۱۰/۹ و ۹/۵ می باشد.

با داشتن روابط بین این دو می توان میزان تخلخل را محاسبه نمود. در شکل ۱۴ میزان تخلخل در نمونه بارریزی در روی سطح شیب دار تحت گاز آرگون و نمونه ریخته شده در هوا را نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود با کنترل محیط، می توان میزان تخلخل به وجود آمده در نمونه ها را به میزان بیش از ۳۵٪ کاهش داد. برای صحت آزمایی آزمایش ارشمیدس، آزمایش آلتراسونیک نیز روی نمونه ها صورت پذیرفت.

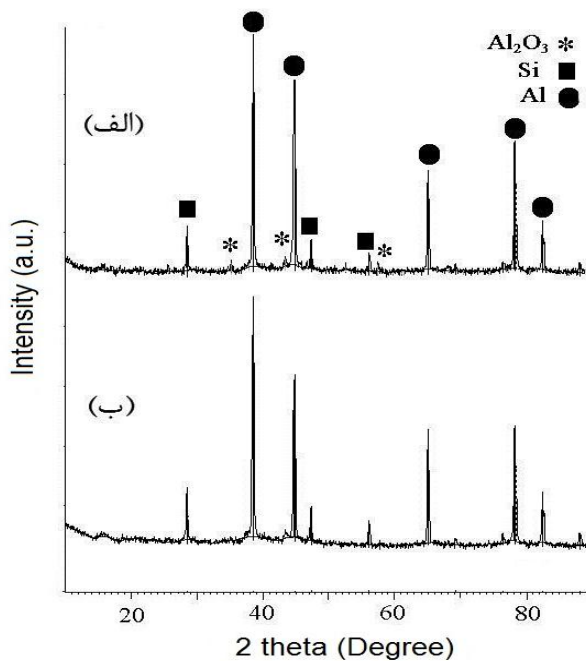


شکل (۱۳): نمونه ای از مکان و اندازه برخی از تخلخل هایی که در نمونه ها مشاهده شده است.



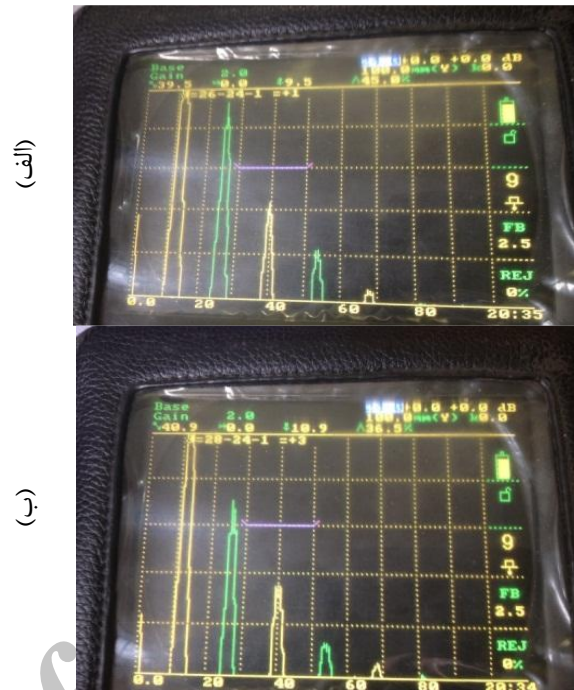
شکل (۱۴): مقایسه میزان تخلخل نمونه ریخته شده (الف) در هوا (ب) تحت گاز آرگون.

بررسی نمونه‌ها با XRD: شکل ۱۸ نشان‌دهنده نتیجه آزمایش تفرق اشعه ایکس برای حالت‌های نمونه ریخته‌شده در هوا و تحت گاز آرگون می‌باشد. به دلیل وجود سه پیک مرتبط با فاز آلومینا با قطعیت می‌توان به حضور این فاز در ترکیب این آلیاژ اشاره کرد. از طرف دیگر پیک‌های مرتبط با ترکیبات ناخالصی دیگر مانند اکسیدمنیزیم و اکسید بور در کل نمونه‌ها مشاهده نمی‌شود. این امر می‌تواند به دلیل عدم حضور این نوع از فازها در آلیاژ باشد و یا مقادیر آنها به حدی است (کمتر از ۰.۴٪) که با استفاده از تحلیل تفرق اشعه ایکس قابل شناسایی نمی‌باشد. از طرف دیگر با توجه به وجود فاز آلومینا در آلیاژ ریخته‌شده در هوا انتظار می‌رود که خواص مکانیکی نهایی قطعه تغییر یابد. همچنین عدم وجود این فاز در آلیاژ ریخته‌شده تحت اتمسفر محافظ، می‌تواند دلیلی بر طراحی مناسب دستگاه و کنترل دقیق اتمسفر توسط گاز آرگون باشد.



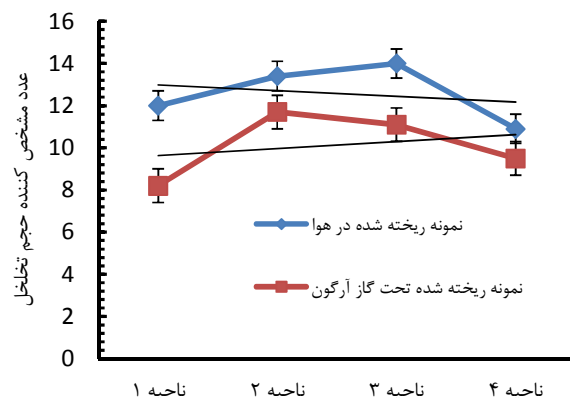
شکل (۱۸): نمودار XRD برای نمونه ریخته‌شده (الف) در هوا، (ب) تحت اتمسفر گاز آرگون.

بررسی خواص کششی نمونه‌ها: شکل ۱۹ نشان‌دهنده استحکام کششی نهایی، استحکام تسلیم و درصد ازدیاد طول در نمونه ریخته‌شده تحت اتمسفر گاز آرگون (شکل ۱۹-الف) و نمونه ریخته‌شده در هوا (شکل ۱۹-ب) می‌باشد. استحکام تسلیم



شکل (۱۶): شکل موج برگشتی در آزمایش آلتراسونیک در محدوده ۴ از نمونه‌ها برای نمونه ریخته شده (الف) در هوا (ب) تحت گاز آرگون.

در شکل ۱۷ مقدار میانگین این مقادیر را برای هر دو نمونه در هر ۴ ناحیه نشان داده است. همان‌گونه که در شکل و با استفاده از نشانگر میانگین مشخص است میزان حجم کلی تخلخل در قطعه ریخته شده در هوا بیشتر از قطعه ریخته شده تحت اتمسفر گاز آرگون می‌باشد. نتایج آزمایش آلتراسونیک در راستای نتایج حاصل از آزمون ارشمیدس، کاهش میزان تخلخل را در نمونه‌ها با استفاده از اتمسفر محافظ را نشان می‌دهد.



شکل (۱۷): میانگین مقادیر به دست آمده در آزمایش آلتراسونیک.

۱- بهترین ریزساختار با دمای بارریزی 625°C ، طول و زاویه سطح شیب‌دار به ترتیب 500 mm و 50° به دست آمد. با کاهش دمای بارریزی به 625°C ، تشکیل و جدا شدن دانه‌ها روی سطح افزایش می‌یابد و در نتیجه از هم‌گسستگی و خرد شدن هر چه بیشتر ساختار دندریتی را خواهیم داشت. در این صورت ریزساختار دندریتی به ریزساختاری با دانه‌های ریز و نزدیک به شکل کروی تغییر می‌کند

۲- استفاده از روش طراحی آزمایش با بکارگیری نرم‌افزار MiniTab در جهت بهینه‌سازی فرآیند و یافتن رابطه‌های حاکم در داشتن کوچک‌ترین اندازه دانه و بیشترین مقدار سختی کاملاً مؤثر بوده و نشان داد که پارامترهای واکنش هم‌زمان تأثیر بیشتری را بر مقادیر خروجی نسبت به بررسی مجزای هر یک از عوامل دارند. در این میان پارامتر واکنش هم‌زمان طول سطح شیب‌دار و نرخ بارریزی و واکنش هم‌زمان سه‌گانه دمای بارریزی، طول سطح شیب‌دار و نرخ بارریزی دارای بیشترین تأثیر بر خروجی مورد نظر را داشتند. نتایج حاصل نشان داد که با مثبت شدن پارامتر اول و منفی شدن پارامتر دوم، اندازه دانه ریزتر و سختی بالاتری را خواهیم داشت.

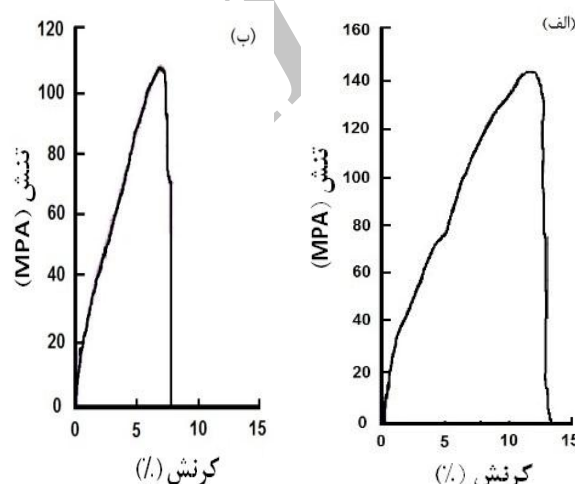
۳- مقادیر بهینه شده از نظر بالاترین سختی، کمترین مقدار اندازه دانه شامل نرخ بارریزی $8\text{ میلی‌متر بر ثانیه}$ ، طول سطح 400 mm ، زاویه سطح 40° درجه و دمای بارریزی 625°C با میزان مطلوبیت $0/897$ می‌باشد.

۴- نتایج نشان داد که استفاده از سامانه اتمسفر محافظ روی اندازه دانه تأثیر زیادی نداشته اما به دلیل کاهش میزان ناخالصی و تخلخل که در ریزساختار به وجود آمده است باعث بهبود افزایش شکل‌پذیری و استحکام آلیاژ به ترتیب بیش از $17/5$ و 28 درصد می‌شود.

۵- مراجع

1. Nourouzi, S., Kolahdooz, A., and Botkan, M. "Behavior of A356 Alloy in Semi-Solid State Produced by Mechanical Stirring", Adv. Mat. Res., Vol. 402, pp. 331-336, 2012.
2. Botkan, M., Nourouzi, S., and Kolahdooz, A., "Effect of Isothermal Stirring Parameters on Microstructure of Al-A356 alloy", st. res. Int., special features of Metal Forming, pp. 775-778, 2012.
3. Flemings, M.C. "Behavior of Metal Alloys in the Semisolid State", Met. Trans., Vol. 13, No. 4, pp. 957-981, 1991.
4. Kund, N.K. and Dutta, P. "Numerical Simulation of Solidification of Liquid Aluminum Alloy Flowing on Cooling Slope", Trans. Nonferrous Met. Soc. China, Vol. 20, No. 3, pp. s898-s905, 2010.

نمونه‌ها به روش Offset تعیین شد. میزان استحکام تسلیم، استحکام کششی نهایی و درصد ازدیاد طول در آلیاژ آلومینیوم A356 ریخته‌شده در هوا به ترتیب $39/5$ ، $110/4$ مگاپاسگال و $3/35\%$ می‌باشد. این مقادیر برای نمونه ریخته‌شده تحت گاز آرگون به ترتیب برابر با 60 ، 145 مگاپاسگال و $6/93\%$ گزارش می‌شود. علت کاهش شدید خواص مکانیکی در نمونه ریخته‌شده در هوا را می‌توان در عواملی مانند وجود بیش از اندازه میزان تخلخل و همچنین ناخالصی‌هایی مانند اکسید آلومینیوم (که در نتایج آزمون XRD هم وجود آنها اثبات شد) در ساختار بیان نمود.



شکل (۱۹): نمودار تغییرات تنش بر حسب کرنش برای نمونه ریخته‌شده (الف) تحت گاز آرگون، (ب) در هوا.

۴- نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این تحقیق حاکی از آن است که ریزساختار تولید شده توسط فرآیند سطح شیب‌دار از نظر اندازه و مورفولوژی دانه‌های فاز جامد اولیه تحت تأثیر دما و نرخ بارریزی، دما، زاویه و طول سطح شیب‌دار قرار دارد. در تمامی کارهای قبلی صورت گرفته در این زمینه، پارامترها به صورت مجزا و یا در بازه‌ای محدود مورد آزمایش قرار گرفته شده بود که تأثیر تمامی پارامترها و همچنین اثرات متقابل آنها را به درستی نشان نمی‌داد. در این تحقیق سعی بر آن شد تا تمامی متغیرها به صورت واقعی و نه در شرایط آزمایشگاهی مورد آزمایش قرار بگیرد تا بتواند در تولید قطعات صنعتی مؤثر واقع شود. در این صورت نتایج به این صورت ارائه می‌شود.

11. Nili-Ahmadabadi, M., Pahlevani, F., and Babaghorbani, P. "Effect of Slope Plate Variable and Reheating on the Semi-Solid Structure of Ductile Cast Iron", *Tsin. Sci. and Tech.*, Vol. 13, No. 2, pp. 147-151, 2009.
12. 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", *Mat. & des.*, Vol. 30, No. 5, pp. 1762-1767, 2009.
13. Nourouzi, S., Ghavamodini, S.M., Baseri, H., Kolahdooz, A., and Botkan, M. "Microstructure Evolution of A356 Aluminum Alloy Produced By Cooling Slope Method", *Adv. Mat. Res.*, Vol. 402, No.1, pp. 272-276, 2012.
14. Hosseini, S.S., Nourouzi, S., Hosseinipour, S.J., and Kolahdooz, A., "Effect of Slope Plate Variable and Pouring Temperature on Semi-Solid Microstructure of A356 Aluminum Alloy", *st. res. Int., Special Features of Metal Forming*, pp. 779-782, 2012.
15. Nourouzi, S., Bakhshi-Jooybari, M., Kolahdooz, A., and Hosseinipour, S.J. "Effect of Temperature on The Microstructure of Semi-Solid Casting in Cooling Slope Method", *Aerospace Mechanics Journal*, Vol. 9, No. 3, pp. 55-65, 2013, (In Persian).
5. Haga, T. and kapranos, P. "Billetless Simple Thixoforming Process", *J. mat. Proc. Tech.*, Vol's. 130-131, pp. 581-586, 2002.
6. Birol, Y. "A357 Tixoforming Feedstock Produced by Cooling Slope Casting", *J. Mat. Proc. Tech.*, Vol. 186, No. 6, pp. 94-101, 2006.
7. 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", In: 8th Int. Conf. on Semisolid Proc. of All. & Comp., Cyprus, 2004.
8. 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.
9. Haga, T. and Suzuki, Sh. "Casting of Aluminum Alloy Ingots for Tixoforming Using a Cooling Slope", *J. Mat. Proc. Tech.*, Vol. 118, No. 1-3, pp. 169-172, 2001.
10. Movahedi, M., Karimi, A., and Nia-Manesh, H. "Effect of Angle of Inclined Plate on the microstructure of 7075 Aluminum Alloy", In: 10th Cong. of Iranian Ins. of Mat. & Met. Eng., Mashhad, Iran, 2006, (In Persian).

Archive of SID