



Statistical Approach on Microstructure and Hardness of Semi-Solid Cast Aluminum Alloy A380 Produced by Mechanical Vibration in Argon Gas Atmosphere

Nima Delshekasteh¹, Amin Kolahdooz^{2*}

1. MSc Student, 2. Assistant Professor,
Department of Mechanical Engineering, Khomeinishahr Branch, Islamic Azad University, Khomeinishahr/Isfahan, Iran.

Received 18 September 2018
Accepted 23 December 2018

Abstract:

Semi-solid processes are amongst the novel methods of producing materials. The first method of these processes is introduced around 30 years ago. These methods include forming of a semi-solid, semi-molten mixture which can be produced by using casting or mechanical forming techniques. The key point for using these fabrication processes is to create a non-dendrite structure in a semi-solid mixture. Some tools and devices have introduced in semi-solid casting until now for example cooling slopes, mechanical vibration device and melt mixers. These devices are usually used for the purpose of reducing the grain size and also increasing the mechanical properties of alloys. Also, some studies approved that using of the controlled atmosphere reduces the amount of impurities and porosities into the product. Therefore, in this paper, the effect of different conditions on A380 aluminum alloy is investigated using a mechanical vibrator that capable of controlling the atmospheric environment. In following, Taguchi statistical method was used to analyze the data and also reduce the number of experiments. The statistical results showed that the temperature parameter had the highest effect, equal to 64%, in this alloy. Also, the second level of this parameter, which is 625°C, was selected as the most appropriate level. Also, vibration frequency, with an effect of 32%, ranks the second position and vibration time with an effect of 3% is in the third place, which both perform best at their highest chosen level.

Keywords:

Semi-solid casting,
Taguchi statistical method,
Mechanical vibration,
Argon gas atmosphere.

Journal homepage: www.foundingjournal.ir

Please cite this article using:

Delshekasteh N., Kolahdooz A., Statistical approach on microstructure and hardness of semi-solid cast aluminum alloy A380 produced by mechanical vibration in argon gas atmosphere, in Persian, Founding Research Journal, 2019, 2(4) 275-286.
DOI: 10.22034/FRJ.2018.149185.1051

* 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



فصل‌نامه علمی پژوهشی

انجمن علمی ریخته‌گری ایران

پژوهش‌نامه ریخته‌گری

بررسی آماری ریزساختار و سختی آلیاژ آلومینیم نیمه جامد A380 تولید شده به روش ارتعاش مکانیکی در محیط گاز آرگون

نیما دل‌شکسته^۱، امین کلاه‌دوز^{۲*}

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

چکیده:

دریافت: ۱۳۹۷/۰۶/۲۷

پذیرش: ۱۳۹۷/۱۰/۰۲

فرآیندهای نیمه‌جامد، مشتمل بر شکل‌دهی مخلوطی نیمه‌جامد-نیمه‌مذاب بوده که یا با استفاده از روش‌های ریخته‌گری و یا شکل‌دهی مکانیکی، شکل‌های مختلف قطعه را می‌توان تولید نمود. نکته کلیدی این فرآیندهای ساخت مواد، ایجاد ساختاری غیردندریتی در مخلوط نیمه‌جامد است. در این تحقیق، با استفاده از یک دستگاه ارتعاش مکانیکی که قابلیت کنترل اتمسفر محیط را دارد، به بررسی تأثیر شرایط مختلف بر روی آلیاژ آلومینیم A380 پرداخته شده است. جهت تحلیل داده‌های آزمایش از روش آماری تاگوچی استفاده شده است تا بتوان تعداد آزمایش‌ها را کاهش داد. نتایج آماری نشان داد که متغیر دما بیشترین تأثیر که معادل ۶۴ درصد است را در ریخته‌گری نیمه‌جامد آلیاژ A380 آلومینیم دارد. همچنین دمای ۶۲۵°C، مناسب‌ترین دمای بارریزی انتخاب شد. فرکانس ارتعاش نیز با تأثیری در حدود ۳۲ درصد در جایگاه دوم و زمان ارتعاش با تأثیری در حدود ۳ درصد در جایگاه سوم قرار می‌گیرد که هر دو در بالاترین سطح خود بهترین عملکرد را دارند.

واژه‌های کلیدی:

ریخته‌گری نیمه‌جامد،
روش آماری تاگوچی،
ارتعاش مکانیکی،
محیط گاز آرگون.

۱- مقدمه

معلق موتور، منی‌فولد هوا، قالب‌های موتور و محفظه فیلتر پمپ نفت استفاده می‌شود [۵-۶]. انجماد دندریتی معمول‌ترین نوع انجماد در قطعات ریخته‌گری است. در این فرآیند از روی هر یک از جوانه‌های موجود در مذاب، یک شاخه ستونی جوانه‌زده و در جهات جلو و پهنا رشد می‌نماید و سپس بازوهای ثانویه‌ای از آن منشعب می‌شوند. این پدیده ادامه می‌یابد تا نهایتاً بازوها به هم پیوسته و یک شبکه کریستالی موسوم به دانه به وجود آید. در شرایط ایده‌آل که عمل مذاب‌رسانی به‌طور کامل انجام می‌شود، دانه حاصله کاملاً یکنواخت خواهد بود. اما تحت شرایط کارگاهی، اغلب انجماد دندریتی منجر به عدم مذاب‌رسانی کامل و به تبع آن ایجاد عیوب انقباضی در بین بازوهای دندریتی می‌شود. با توجه به مشکلات موجود در این نوع

ریخته‌گری نیمه‌جامد در دمایی که فلز را بین دماهای لیکوئیدوس و سالییدوس قرار می‌دهد، انجام می‌شود [۱]. به‌طور ایده‌آل، آلیاژ باید ۳۰ تا ۶۶٪ جامد بوده و همچنین باید ویسکوزیته کمی داشته باشد تا قابل استفاده باشد. برای رسیدن به این ویسکوزیته کم، ماده نیازمند یک شکل اولیه کروی احاطه شده توسط فاز مذاب است تا بتواند به راحتی در داخل قالب جریان داشته باشد [۲-۳]. محدوده دمایی امکان‌پذیر به ماده بستگی دارد و برای آلیاژهای آلومینیم ۵ تا ۱۰°C است، اما برای آلیاژهای مس با محدوده ذوبی باریک می‌تواند فقط چند درجه سانتی‌گراد باشد [۴]. ریخته‌گری نیمه‌جامد معمولاً برای تولید قطعات پیچیده آلیاژهای آلومینیم نظیر پایه‌های

افزایش دما به 650°C ، اندازه دانه به میزان ۱۰ برابر بزرگ‌تر می‌شود. دماوندی و همکاران [۱۵] به بررسی اثر دمای بارریزی، ارتعاش مکانیکی و گرمایش مجدد بر ریزساختار و خواص مکانیکی آلیاژ ریختگی Al-A390 پرداخته‌اند. در کار تحقیقاتی ایشان، اثر گرمایش مجدد نمونه‌ها در سه دمای مختلف و در پنج زمان نگهداری مورد بررسی قرار گرفت. نتایج ایشان نشان داد که شمش ریخته‌گری شده در دمای بارریزی 750°C با دمای قالب 350°C و فرکانس ارتعاش قالب 60Hz از بالاترین مقدار سختی و استحکام کششی برخوردار است. همچنین ایشان اعلام نمودند که فرآیند گرمایش مجدد، موجب افزایش کرویت و کاهش اندازه سیلیسیم یوتکتیک شده، اما تأثیر قابل توجهی بر اندازه سیلیسیم اولیه نخواهد داشت. ژانگ و همکاران [۱۶] به بررسی متغیرهای فرآیند ریخته‌گری نیمه‌جامد آلیاژهای منیزیم تحت استخر حباب‌گاز، بر ریزساختار پرداختند. آنها با استفاده از لوله‌ای در داخل مذاب حباب‌های گاز SF_6 را با سرعت‌های مختلف تزریق کردند و بیان کردند که با ۵ برابر کردن سرعت تزریق گاز، میزان اندازه ذرات به‌اندازه 39% کاهش می‌یابد. باباخانی و همکاران [۱۷] به بررسی ارتعاشات مکانیکی بر مورفولوژی گرافیت و ریزساختار چدن نشکن پرداختند. ایشان اعلام نموده‌اند که اعمال ارتعاش به مذاب چدن نشکن در حالت انجامد باعث بهبود میزان کرویت شدن و افزایش تعداد گرافیت‌های کروی تا حدود دو برابر می‌گردد. اعمال ارتعاش همچنین باعث کاهش درصد پرلیت و افزایش درصد فریت نسبت به نمونه‌های ریخته‌گری شده در قالب‌های ماسه‌ای و فلزی می‌شود. احترامیان و همکاران [۱۸] به بهینه‌سازی سختی آلیاژ آلومینیم A380 در فرآیند شکل‌دهی نیمه‌جامد با استفاده از ارتعاش دهنده مکانیکی پرداختند. آنها بیان کردند که دمای مذاب بیشترین تأثیر را بر سختی دارد و افزایش زمان فرکانس باعث می‌شود دانه‌ها به سمت کروی شدن حرکت کنند. با حرکت ریزساختار به سمت کروی شدن سختی قطعه نیز افزایش یابد.

با مطالعه تحقیق‌های انجام شده در سال‌های اخیر مشاهده می‌شود که محققین از روش ارتعاش مکانیکی به‌صورت‌های مختلف جهت تولید قطعات با کیفیت بالا استفاده نموده‌اند. در این تحقیق هدف استفاده از روش ارتعاش مکانیکی جهت ریزساختار نمودن قطعات به همراه استفاده از گاز

ریخته‌گری تحقیقاتی از سال ۱۹۷۰ در این زمینه انجام شده است [۷-۹].

صفاری و همکاران [۱۰] به بررسی تأثیر اعمال ارتعاش مکانیکی روی سطح شیب‌دار بر ریزساختار کامپوزیت درجای Al-Mg₂Si پرداختند. آنها از فرآیند سطح شیب‌دار لرزان به‌منظور بهینه‌سازی ریزساختار کامپوزیت‌های Al-Mg₂Si حاوی ۱۵٪ و ۲۵٪ Mg₂Si استفاده کردند. نتایج ایشان نشان داد که ریخته‌گری روی سطح شیب‌دار با زاویه 45°C و در دمای 850°C که با فرکانس 40Hz مرتعش شده است باعث ریز شدن ساختار و بهبود مورفولوژی می‌شود. ژانگ و همکاران [۱۱] به بررسی شرایط خنک‌کننده بر ریزساختار نیمه جامد AZ91 تولیدشده با استفاده از ارتعاش فراصوتی پرداختند. ایشان بیان کردند که اگر دمای ارتعاش‌کننده در محدوده دماهای 590°C الی 605°C باشد، بهترین نتیجه حاصل می‌شود. در این محدوده دمایی، کسر حجمی جامد به میزان سه برابر افزایش یافته است. همچنین ایشان بیان نمودند که نرخ سردکنندگی باید بین ۲ تا ۳ درجه سانتی‌گراد در دقیقه باشد. هانگ و همکاران [۱۲] به بررسی و مطالعه نظری ماتریس کامپوزیتی منیزیم نیمه‌جامد Al₂Y/AZ91 که توسط ارتعاش فراصوتی جامد شده است، پرداختند. آنها بیان نمودند که بهترین دمای استفاده از ارتعاش فراصوتی 600°C است. نتایج ایشان نشان می‌دهد که با افزایش زمان ارتعاش، ابتدا قطر متوسط ذرات کاهش و سپس افزایش می‌یابد. همچنین فاکتور شکل نیز در ابتدا افزایش و بعد از ۹۰s کمی کاهش و بعد از ۱۲۰s به سمت تشکیل دانه‌های دندریتی پیش می‌رود. ژاوو و همکاران [۱۳] به بررسی ارتعاش و پالایش دانه‌ها در ریزساختار مخلوط نیمه‌جامد آلومینیم-سیلیسیم پرداختند. با بررسی قطعات به‌دست‌آمده اعلام نمودند که با افزایش میزان قدرت ارتعاش، ذرات اولیه آلومینیم ریزتر می‌شوند. ایشان قطر این ذرات را حدود $90\mu\text{m}$ گزارش کردند. همچنین ایشان اعلام نمودند که میزان قدرت ارتعاش مناسب برای این آلیاژ در حدود 20Hz است. چاوالیت و همکاران [۱۴] به بررسی ریخته‌گری نیمه‌جامد آلیاژ آلومینیم A356 با استفاده از ارتعاش مکانیکی پرداختند. ایشان اعلام نمودند که اندازه دانه‌های به‌دست‌آمده در این دمای 630°C برابر $309\mu\text{m}$ می‌شود. در ادامه ایشان به این نتیجه رسیده‌اند که با

جدول ۲- نحوه طراحی آزمایش بر اساس الگوریتم L9 تاگوچی

زمان ارتعاش (s)	فرکانس ارتعاش (Hz)	دمای بارریزی (°C)	آزمایش
۵	۲۰	۶۱۵	۱
۱۰	۴۰	۶۱۵	۲
۱۵	۶۰	۶۱۵	۳
۱۰	۲۰	۶۲۵	۴
۱۵	۴۰	۶۲۵	۵
۵	۶۰	۶۲۵	۶
۱۵	۲۰	۶۳۵	۷
۵	۴۰	۶۳۵	۸
۱۰	۶۰	۶۳۵	۹

جدول ۳- ترکیب شیمیایی آلیاژ A380 مورد تحقیق

عنصر	Si	Fe	Cu	Mn	Mg
درصد وزنی	۹/۲۴	۰/۷۴	۳/۲۸	۰/۲۴	۰/۱۵
عنصر	Zn	Ni	Pb	Al	
درصد وزنی	۰/۸۲	۰/۰۲	۰/۰۴	Balance	

برای ریخته‌گری نیمه‌جامد آلیاژ، ماشین ریخته‌گری مخصوصی طراحی و ساخته شده است که تصویر ماشین و مشخصات قالب آن در شکل (۲) نشان داده شده است. برای ذوب شمش‌های آلومینیم آلیاژ A380 از کوره مقاومتی با توان ۴۵۰۰ وات استفاده شده است. این کوره مجهز به یک سیستم کنترلی با ترموکوپل بوده که می‌تواند دمای مذاب را با دقت $\pm 3^{\circ}\text{C}$ تنظیم کند. در جدول (۳) ترکیب شیمیایی شمش‌های آلومینیم نشان داده شده است. پس از تنظیم دما و تشکیل نیمه‌جامد مورد نظر، بارریزی درون قالب در دو شرایط با استفاده یا بدون استفاده از گاز محافظ آرگون انجام شده است. قالب در حین بارریزی روی دستگاه ریخته‌گری نیمه‌جامد قرار دارد و تحت فرکانس و مدت معین شده ارتعاش می‌کند. بنابراین مطابق جدول (۲)، ۹ آزمایش در دو شرایط مختلف بارریزی (با یا بدون گاز آرگون) انجام شده است.

برای بررسی ریزساختار نمونه‌های ریخته‌گری، از میکروسکوپ نوری صا ایران مجهز به دوربین دیجیتال استفاده شده است. برای حکاکی نمونه‌ها از محلول HF ۵٪ استفاده شد. زمان نگهداری در این محلول با توجه به نوع ساختار آلیاژ ۵ ثانیه در نظر گرفته شد. قطر متوسط دانه‌ها، که در این مقاله میزان اندازه فاز آلفای اولیه است، با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می‌شود [۲۱]:

آرگون جهت حذف تخلخل‌های ناشی از محیط به روی مخلوط نیمه‌جامد است. متغیرهای ورودی در این تحقیق دما، فرکانس ارتعاش و زمان ارتعاش هستند که پس از به دست آوردن خروجی‌های اندازه دانه و سختی با استفاده از نرم‌افزار مینی‌تب مورد تحلیل آماری قرار می‌گیرند. با تحلیل نمودارهای سیگنال به نویز و تحلیل‌های رگرسیون می‌توان مناسب‌ترین متغیرها را معرفی نمود تا محققین بتوانند در تحقیقات آتی از آنها استفاده کنند.

۲- مواد و روش تحقیق

در این تحقیق اثر سه متغیر اصلی دمای بارریزی، فرکانس ارتعاش و مدت زمان ارتعاش بر ریزساختار و سختی آلیاژ A380 مورد بررسی آماری با استفاده از نمودارهای سیگنال به نویز و تحلیل‌های رگرسیون قرار می‌گیرد. همچنین بررسی متالورژیکی این آلیاژ نیز صورت پذیرفته که به تفسیر آن در بخش نتایج پرداخته می‌شود. محدوده تغییرات آزمایش‌های صورت گرفته و سایر متغیرهای ثابت آزمایش‌ها در جدول (۱) ارائه شده است.

در جدول (۲)، نحوه طراحی آزمایش‌های این تحقیق نشان داده شده است [۱۹-۲۰]. برای اینکه تعداد آزمایش‌ها کاهش یابد با استفاده از روش آماری تاگوچی صورت آزمایش‌ها استخراج شد. در این تحقیق از الگوریتم L9 برای بررسی عاملی متغیرهای استفاده شده است که در آن از ۹ آزمایش برای بررسی اثر سه متغیر مستقل در سه سطح از تغییرات استفاده می‌شود.

قابل توجه است که از آنالیز دمایی مذاب برای به دست آوردن خطوط منحنی جامد و مذاب و انتخاب محدوده مناسب دمای بارریزی آلیاژ A380 استفاده شده است [۲۲]. بر این اساس محدوده دمایی 615°C تا 640°C برای بارریزی انتخاب شده است.

جدول ۱- متغیرهای تعریف شده

ردیف	متغیر	سطوح
۱	دمای بارریزی (°C)	۶۱۵، ۶۲۵، ۶۳۵
۲	فرکانس ارتعاش (Hz)	۲۰، ۴۰، ۶۰
۳	مدت زمان ارتعاش (s)	۵، ۱۰، ۱۵
۴	جنس قالب	فولاد
۵	مدت زمان سرد شدن در قالب	۳۰ دقیقه
۶	نوع گاز محافظ	آرگون

۳- نتایج و بحث

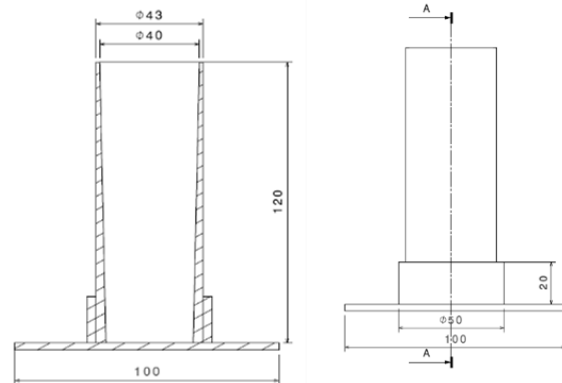
۳-۱- بررسی متالورژیکی ریزساختار و سختی

در این بخش به بررسی ریزساختار حاصل با استفاده از آزمایش‌ها مختلف پرداخته می‌شود. برای اینکه ساختار مناسب‌تری از نحوه تغییرات حاصله قابل‌درک باشد، در ابتدا تمامی نمودارها به صورت یکجا ارائه شده است و در ادامه بررسی هر بخش به صورت مجزا صورت خواهد گرفت. شکل‌های (۳)، (۴) و (۵) به ترتیب تصاویر ریزساختارهای به دست آمده را در دماها، فرکانس‌ها و زمان‌های مختلف نگهداری نشان می‌دهد. شکل (۶) نیز نمودار اثر اصلی این سه متغیر را بر اندازه دانه آلومینیم و سختی نشان می‌دهد.

اثر دما

اندازه دانه‌ها با افزایش درجه حرارت تا نقطه‌ای، ریز می‌شود و سپس با افزایش بیشتر آن و مذاب شدن کامل، درشت می‌شوند. در شکل (۳) قسمت (الف) مربوط به ریزساختار ایجاد شده در دمای 615°C ، قسمت (ب) دمای 625°C و قسمت (ج) دمای 635°C است. نمودار اندازه دانه مطابق شکل (۶-الف) بعد از اندازه‌گیری ۵ عکس در هر دما و مقایسه اندازه دانه‌ها بعد از محاسبه ۳۰ دانه در هر عکس و میانگین‌گیری از آن‌ها به دست آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در دمای 625°C ریزساختار کوچک‌تری ایجاد شده است. با توجه به تصاویر مربوط به ریزدانه‌ها مشاهده می‌شود که با افزایش درجه حرارت مذاب به 625°C قطعات به سمت ریزدانه شدن پیش می‌روند و همچنین با افزایش آن به 635°C ، ریزساختار مجدد به سمت درشت شدن پیش می‌رود که این نشان می‌دهد که دمای 625°C مناسب‌ترین دما است.

در واقع عواملی مانند زمان اعمال تنش برشی بر مخلوط مذاب- جامد و کسر حجمی فاز جامد به هنگام اعمال تنش برشی، بر ریزساختار نهایی تأثیرگذار است [۲۲]. اصلاح و تغییر مورفولوژی فاز اولیه در شمش‌های فرآوری شده در فرآیند ارتعاش مکانیکی به واسطه ایجاد کسر جامد مناسب است. هنگامی که آلیاژ مذاب با فوق‌گداز مناسب در درون قالب ریخته می‌شود، دمای آن به سرعت تا زیر دمای منحنی مایع افت می‌کند. در نتیجه کریستال‌های فاز اولیه بر روی دیواره قالب شکل گرفته و بر اثر تنش برشی ناشی



برش A-A

روبرو

(الف)



(ب)

شکل ۲- الف) نقشه‌های قالب (تصویر روبرو و برش قسمت A-A) (ب) ماشین ریخته‌گری نیمه جامد و دستگاه ارتعاش دهنده مکانیکی

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

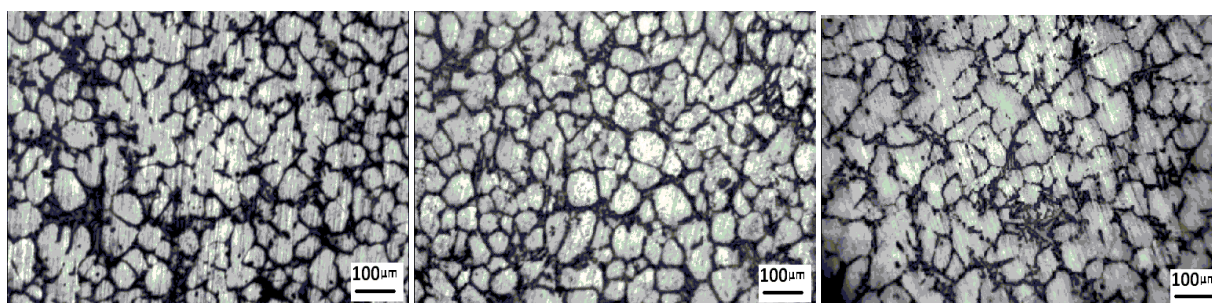
در این رابطه N تعداد و A مساحت هر دانه است. این مقادیر با استفاده از نرم‌افزار Image و به این صورت که برای هر نمونه ۵ تصویر و در هر تصویر ۳۰ دانه انتخاب شده بود، استخراج شده است.

آزمایش سختی مطابق با استاندارد ASTM E23 به وسیله دستگاه سختی‌سنج دیجیتالی یونیورسال مدل کوپا UV1 انجام گرفت. هر سختی‌سنجی حداقل با سه بار تکرار انجام شده است.

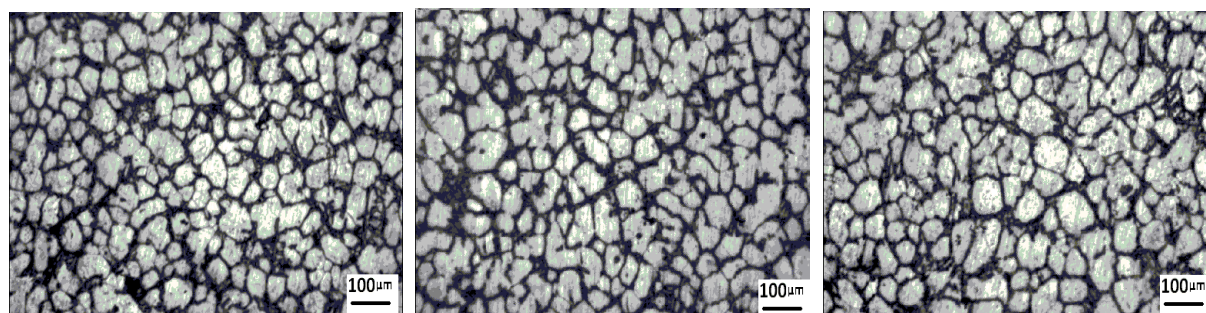
از آنالیز واریانس و رگرسیون برای تحلیل آماری متغیرها استفاده شده است. این آنالیزهای با استفاده از نرم‌افزار مینی تب ویرایش ۱۶ انجام شده است.

شده افزایش می‌یابد. این امر سبب افزایش میزان جوانه‌زنی 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 است [۱۸، ۱۶]. در دمای مذاب‌ریزی پایین‌تر، امکان انجماد سریع‌تر و بیش از حد مذاب وجود داشته و تشکیل یک لایه جامد پیوسته روی دیواره قالب سریع‌تر و در نتیجه جدایش ذرات از دیواره کمتر اتفاق می‌افتد.

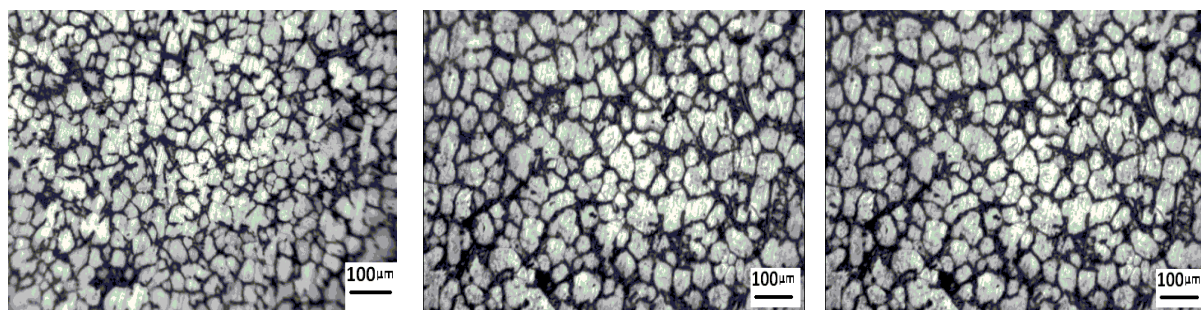
از ارتعاش قالب، کنده شده و به درون مذاب وارد می‌شوند. این ذرات به عنوان مکان‌های جوانه‌زنی مانع از شکل‌گیری ساختار دندریتی می‌گردند [۲۴، ۲۳]. در دمای مذاب‌ریزی 635°C ، میزان فوق‌گداز زیاد است لذا تعداد کریستال‌های جوانه‌زده و جدا شده از سطح برای ایجاد ساختاری شبه کروی کافی نیست. همچنین در دماهای مذاب‌ریزی بالا حجم مذاب بیشتر با دمای بالاتر در قالب وجود دارد که می‌تواند امکان انجماد ذرات دندریتی را افزایش دهد. با کاهش دمای مذاب‌ریزی به 625°C ، مقدار کسر جامد ایجاد



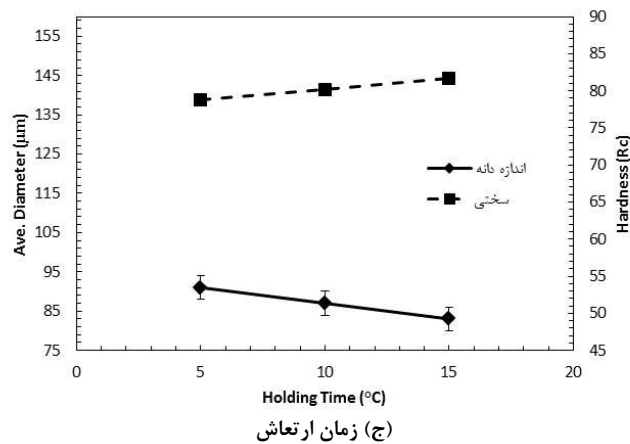
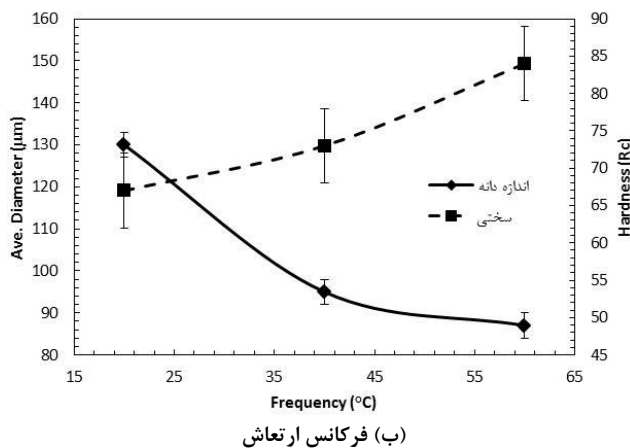
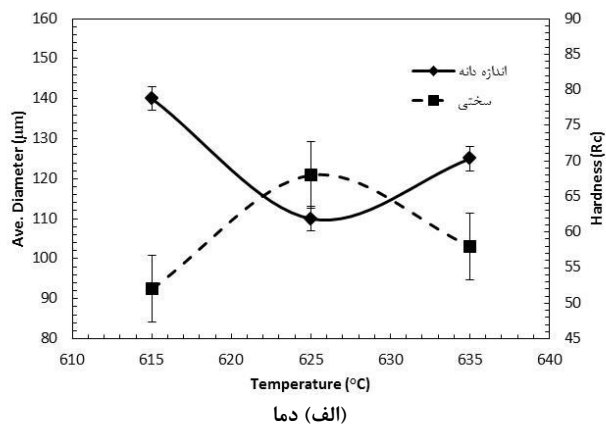
شکل ۳- اثر دمای بارریزی نیمه جامد بر ریزساختارها نمونه‌ها: (الف) 615°C (ب) 625°C (ج) 635°C



شکل ۴- اثر فرکانس ارتعاش بر ریزساختارها نمونه‌ها: (الف) ۲۰ هرتز (ب) ۴۰ هرتز (ج) ۶۰ هرتز



شکل ۵- اثر زمان ارتعاش بر ریزساختارها نمونه‌ها: (الف) ۵ ثانیه (ب) ۱۰ ثانیه (ج) ۱۵ ثانیه



شکل ۶- نمودار اثر اصلی سه متغیر (الف) دما، (ب) فرکانس ارتعاش و (ج) زمان ارتعاش بر اندازه دانه آلفا آلومینیم و سختی

اثر فرکانس

در این بخش از آزمایش‌ها با استفاده از دمای ۶۲۵°C که مناسب‌ترین دما در قسمت قبلی به دست آمد، به بررسی اثر ارتعاش در فرکانس‌های ۲۰، ۴۰ و ۶۰ هرتز پرداخته می‌شود. نتیجه تغییرات ریزساختاری در شکل (۴) نشان داده شده است. با توجه به نتایج تأثیر ارتعاش در بهبود دانه‌بندی کاملاً مشخص است. مکانیزم این تأثیر از شکستن بازوهای ساختار شاخه‌ای و ریز شدن ساختار تحت این

در ضمن سختی قطعات نیز با ریزدانه شدن و به دلیل افزایش میزان لایه‌های مرزی که باعث جلوگیری از جابجایی‌ها در ریزساختار می‌شود، افزایش می‌یابد. همان‌طور که در شکل (۶-الف) مشاهده می‌شود در دمای ۶۲۵°C، بیشترین مقدار سختی به دست آمده است.

اثر گاز محافظ آرگون

گاز محافظ آرگون یکی از عوامل کاهش میزان ناخالصی در فلز مذاب است. همان‌گونه که از نام آن مشخص است این گاز به‌صورت خنثی است و باعث کاهش درصد ناخالصی‌ها در ریخته‌گری می‌شود. آلومینیم فلزی است که بخصوص در حالت مذاب قابلیت واکنش شیمیایی و حلالیت فیزیکی با بسیار از عناصر را دارد [۱۸].

یکی از روش‌های اندازه‌گیری تخلخل با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی است. این دستگاه به کمک پرتوهای الکترونی، تصاویر اجسامی به کوچکی ۱۰ نانومتر را برای مطالعه تهیه می‌کند. این اطلاعات شامل توپوگرافی نمونه شامل خصوصیات سطح، مورفولوژی شامل شکل، اندازه و نحوه قرارگیری ذرات در سطح جسم است. با استفاده از این روش و نرم‌افزار Imag-J می‌توان مساحت قسمت‌های ناخالصی که به‌صورت توده‌های سیاه مشخص شده‌اند را بررسی نمود و نسبت به مساحت کل سطح درصد ناخالصی را قطعات را اندازه‌گیری نمود [۲۵].

کنترل این شرایط باعث کاهش میزان ناخالصی‌ها و حباب‌های گازی در قطعات می‌شود. برای اندازه‌گیری میزان تخلخل دو نمونه تحت شرایط گاز محافظ و تحت شرایط بدون گاز محافظ مورد آزمایش قرار گرفته است. در شکل (۷)، ریزساختار این دو نمونه نشان داده شده است.

در شکل (۸)، درصد تخلخل در دو نوع ریخته‌گری با استفاده از گاز آرگون و بدون استفاده از گاز آرگون نشان داده شده است. با توجه به درصدهای نشان داده شده و همچنین مقایسه ریزساختارها نتیجه می‌شود که گاز آرگون تنها در میزان تخلخل موجود در زمان ریخته‌گری نقش اساسی دارد و باعث کاهش اندازه دانه و یا افزایش سختی به مقدار قابل توجهی نمی‌شود.

۳-۲- بررسی آماری اثر گاز آرگون

در ادامه، تمامی آزمایش‌ها مجدد تحت شرایط گاز آرگون به عنوان گاز محافظ صورت پذیرفت. همان‌طور که گفته شد، شرایط آزمایش بر اساس جدول (۲) انتخاب شد. درنهایت، نمودار سیگنال به نویز برای خروجی‌ها که شامل اندازه دانه (شکل ۹) و سختی (شکل ۱۰) است، با استفاده از انتقال داده‌ها به نرم‌افزار مینی‌تپ به دست آمد.

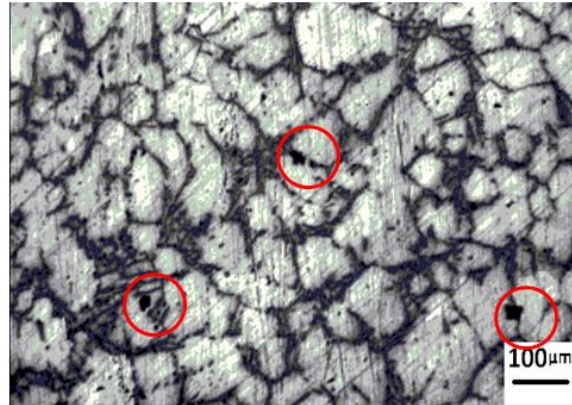
شکست حاصل می‌شود. شدت این تأثیرات خود متأثر از کسر جامد، زمان انجماد، شدت و مدت زمان ارتعاش است. بدیهی است که در کسر جامد بالا به علت دمای بارریزی و زمان انجماد محدود، نمونه‌ها مدت زمان کمی را تحت ارتعاش قرار می‌گیرند. همچنین در این حالت سرعت نوسانات ایجاد شده در مذاب به علت ویسکوزیته بالا کم است. درنهایت، تنش برشی اعمال شده، هم از نظر شدت و هم از نظر زمان، کاهش می‌یابد. با کاهش کسر جامد به علت زمان انجماد طولانی‌تر و همچنین تنش برشی مناسب، بازوهای بیشتری خرد شده و ساختار ریزتر می‌شود. با کاهش بیشتر کسر جامد به علت افزایش دمای بارریزی، مجدد نیروی تنش برشی در مذاب کاهش می‌یابد. همچنین به علت طولانی‌تر شدن زمان انجماد، دانه‌ها تمایل به رشد داشته و ساختار رزگلی شکل ایجاد می‌شود.

با افزایش فرکانس ارتعاش، مذاب با شدت بیشتری ارتعاش می‌کند و باعث حرکت لایه‌های نیمه‌جامد بر روی هم می‌شوند. در نتیجه قطعه نهایی با ریزساختار نهایی ریزتری حاصل می‌شود. نمودار اندازه دانه و نمودار سختی که در شکل (۶-ب) ارائه شده است، اثر این تغییرات را نشان می‌دهد [۱۸].

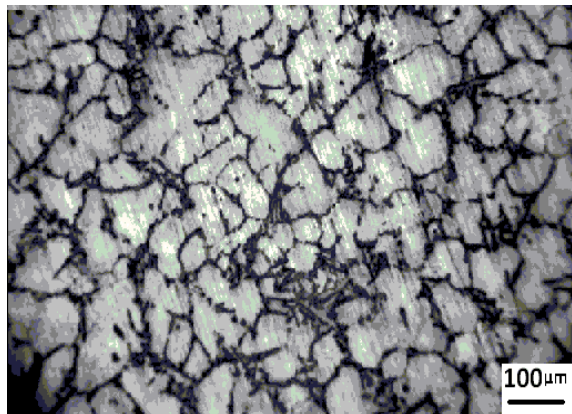
اثر زمان ارتعاش

با افزایش زمان فرکانس، مذاب تحت ارتعاش مدت زمان بیشتری باید قرار دارد بنابراین مذاب در حالت ارتعاش جوانه‌زنی و انجماد می‌کند انتظار می‌رود که با افزایش تعداد جوانه‌ها، ریزساختار به سمت ریزتر شدن پیش برود. در شکل (۵) ریزساختار مربوط به سه زمان ۵، ۱۰ و ۱۵ ثانیه در دمای 625°C و فرکانس ۴۰ هرتز نشان می‌دهد. نمودار اندازه دانه و نمودار سختی در شکل (۶-ج) نشان داده شده است. همان‌طور که در این نمودار نشان داده شده است، با افزایش زمان ارتعاش، به دلیل کاهش مقدار اندازه دانه، سختی افزایش می‌یابد. با مقایسه بین شیب منحنی‌ها در شکل (۶) مشخص است که اثر شدت فرکانس به نسبت بیشتر از اثر زمان ارتعاش است. در هر حال می‌توان گفت که شروع ارتعاش منجر به شکسته‌شدن بازوهای ساختار شاخه‌ای شده است و با شدت یافتن آن و همچنین افزایش زمان ارتعاش در شرایط دمایی مناسب این شکست ساختار بیشتر می‌شود.

و خطا در اندازه‌گیری باشد. مثلاً در سنجش سختی از میانگین ۵ نقطه استفاده شده است. طبیعتاً برای یک نمونه با یک بازه معقول، عددهای متفاوتی را می‌توان با این روش استخراج نمود و هیچ‌گاه نمی‌توان این عدد را به شکل مطلق بیان نمود. همچنین برای قطر دانه از روش میانگین قطر دانه‌بندی در یک محدوده از قطعه استفاده شده است که مشابه روش قبل اعداد حاصل مطلق هستند. در حد امکان سعی شده اعداد از محدوده‌های مشابه در قطعه استخراج شوند. به‌طور کلی نمودار سیگنال به نویز مربوط به سختی و قطر دانه‌ها به غیر از اختلاف کمی در نرخ تغییر شیب نمودار دارند، با یکدیگر هم‌خوانی داشته و می‌توان تفاسیر مربوط به نمودارهای قطر دانه را به سختی بسط داد.

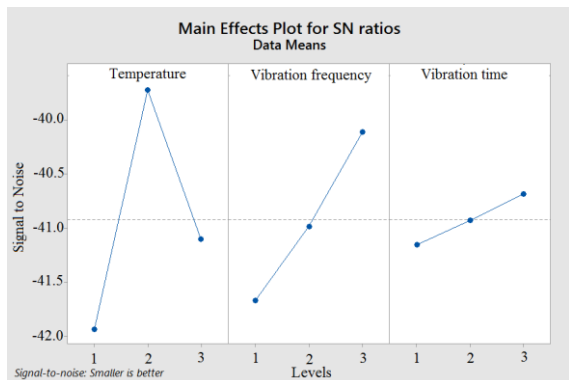


(الف)

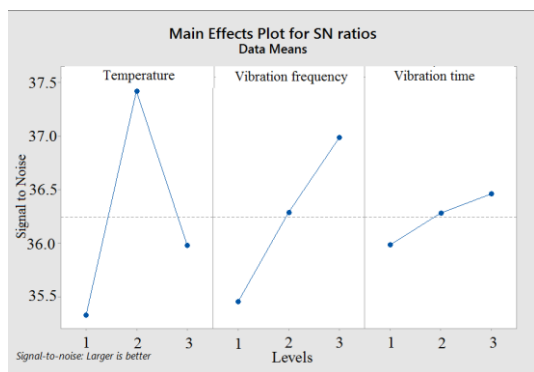


(ب)

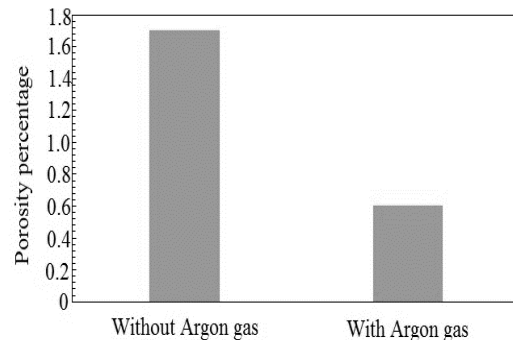
شکل ۷- ریزساختار آزمایش با فرکانس ۲۰ هرتز، دمای ۶۱۵ °C و زمان ۵S در دو محیط (الف) بدون گاز آرگون (ب) با گاز آرگون



شکل ۹- نمودار سیگنال به نویز برای اندازه دانه



شکل ۱۰- نمودار سیگنال به نویز برای سختی



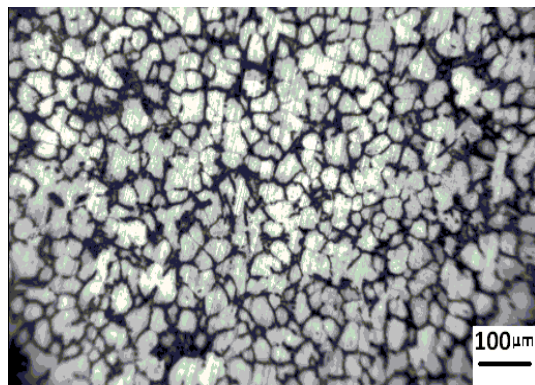
شکل ۸- نمودار تأثیر گاز محافظ آرگون بر درصد تخلخل

با توجه به نمودارهای به دست آمده، مشاهده می‌شود که سطح دوم متغیر دما بهترین سطح است. با کاهش آن، قطعه زودتر سرد می‌شود و زمانی برای ریز شدن دانه‌ها ندارد. همچنین افزایش دمای قطعه کار باعث می‌شود قطعه از حالت خمیری شدن خارج شده و در زمان ارتعاش

از نظر عددی، نتایج قطر دانه با میزان سختی رابطه عکس دارند. ولی زمانی که نمودار سیگنال به نویز آنها رسم می‌شود، نمای نمودارها می‌بایست مشابه یکدیگر باشند. با مقایسه نمودار شکل (۹) با نمودار شکل (۱۰)، مشخص می‌شود که نمای کلی دو نمودار با یکدیگر هم‌خوانی داشته اما در برخی از نقاط شیب تغییرات نمودارها با هم متفاوت هستند. این اختلاف می‌تواند ناشی از روش‌های اندازه‌گیری

جدول ۵- نتایج بهینه به دست آمده به همراه صحت‌گذاری

متغیر خروجی	واحد	تاگوچی	از آزمایش	درصد خطا
اندازه دانه	میکرومتر	۸۲/۵۵	۸۱/۳۲	۲/۶۷
سختی	راکول سی	۸۱/۵	۸۲/۷	۱/۴۱



شکل ۱۱- تصویر میکروسکوپ نوری قطعه به دست آمده با دمای ۶۲۵°C، فرکانس ارتعاش ۶۰Hz و زمان ارتعاش ۱۵s با گاز آرگون

با توجه به اطلاعات به دست آمده، آزمایش عملی در دمای ۶۲۵°C، فرکانس ارتعاش ۶۰Hz و زمان ارتعاش ۱۵s انجام شد و نتایج آن در جدول (۴) نمایش داده شده است. با توجه به نتایج هر دو روش مشخص است که نتایج به دست آمده از طراحی آزمایش‌های تاگوچی با آزمایش‌های عملی دارای خطای کمی در حدود ۱ تا ۳ درصد که این امر نشان‌دهنده صحت نتایج به دست آمده است.

در مقایسه دیگری آزمایش‌هایی بدون داشتن گاز محافظ نیز صورت پذیرفته است. نتایج این آزمایش‌ها نیز نشان می‌دهد که همانند شرایطی که از گاز آرگون استفاده می‌شود، سطح دوم متغیر دما بهترین سطح است. فرکانس و زمان اعمال فرکانس نیز دو متغیر دیگر هستند که با توجه به بررسی‌های انجام شده و آنالیز داده‌های آنها مشاهده می‌شود که هر دو در آخرین سطوح خود نتایج مطلوبی را به همراه دارند. با این تفاوت که تأثیر فرکانس ارتعاش نسبت به زمان ارتعاش بیشتر است. همچنین با مقایسه داده‌ها در دو گروه با استفاده از گاز آرگون و بدون استفاده از گاز آرگون، مشاهده می‌شود که تفاوت اندکی بین دو گروه نتایج است که به علت وجود ناخالصی و تخلخل در گروه دوم است که باعث شده در نتایج مربوط به ریزساختار و خواص مکانیکی تفاوت ایجاد شده و خطای بیشتری در زمان تحلیل حاصل شود. شکل (۱۲) ریزساختار حاصل از ریخته‌گری آلیاژ را در شرایط بدون

ساختار آن کمتر ریزدانه شود. بنابراین سطح دوم بهترین سطح برای دما است. فرکانس و زمان اعمال فرکانس نیز دو متغیر دیگر هستند. با توجه به بررسی‌های انجام شده و آنالیز داده‌های آنها مشاهده می‌شود که هر دو در آخرین سطوح خود نتایج مطلوبی را به همراه دارند. با این تفاوت که تأثیر فرکانس ارتعاش نسبت به زمان ارتعاش بیشتر است. علت این است که در فرکانس بالا شدت لرزش بیشتر می‌شود و قطعه سریع‌تر و با سرعت بالاتر لرزیده می‌شود و باعث می‌شود دانه‌بندی آن ریزتر شود. همچنین زمان فرکانس نیز باعث می‌شود که لرزش مدت زمان بیشتری بر قطعه اعمال شود تا کاملاً ریز دانه و سرد شود ولی نسبت به فرکانس ارتعاش تأثیر کمتری دارد. در جدول (۴) می‌توان تأثیر هر یک از متغیرها را مشاهده نمود.

جدول ۴- درصد تأثیر متغیرهای ورودی بر اساس آنالیز واریانس

متغیر خروجی	متغیر ورودی	درصد تأثیر
اندازه دانه	دما	۶۵/۴۳
	فرکانس ارتعاش	۳۰/۷۵
	زمان ارتعاش	۳/۶۷
	خطا	۰/۲۴
سختی	دما	۶۲/۴۵
	فرکانس ارتعاش	۳۳/۴۲
	زمان ارتعاش	۲/۹
	خطا	۰/۲۳

با توجه به جدول (۴)، مشاهده می‌شود که بیشترین تأثیر مربوط به دمای مذاب است. می‌توان نتیجه گرفت که انتخاب دمای مذاب یکی از عوامل مهم در تشکیل دانه‌بندی ریز است. همچنین بعد از دما به ترتیب فرکانس و زمان در جایگاه‌های بعدی از اهمیت بالایی برخوردار هستند.

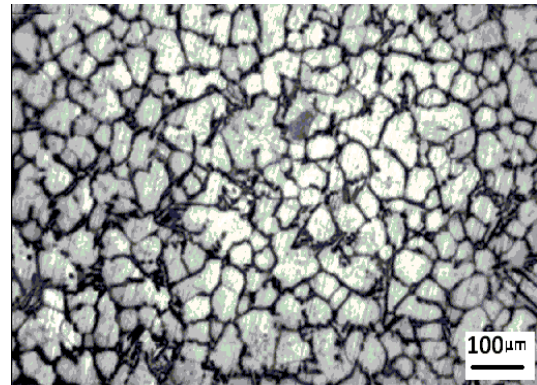
با توجه به متغیرهای مشخص شده، مشاهده می‌شود که سطح دوم دما و سطوح سوم فرکانس ارتعاش و زمان ارتعاش، مناسب‌ترین سطوح هستند که با انتخاب این متغیرها، اندازه دانه به صورت جدول (۵) مشاهده می‌شود. همچنین با انجام آزمایش عملی با متغیرهای به دست آمده می‌توان میزان خطای نتایج به دست آمده از آزمایش تاگوچی را به دست آورد.

ارتعاش و زمان ارتعاش در بالاترین سطح خود ۶۰ هرتز و ۱۵ ثانیه بهترین عملکرد را در رسیدن به ساختاری ریزتر و قطعه‌ای با سختی بالاتر دارند.

مراجع

- [1] Jayesh B.P., Liu Y.Q., Guosheng Sh., Zhongyun F., Rheo-processing of an alloy specifically designed for semi-solid metal processing based on the Al-Mg-Si system, *Materials Science and Engineering A*, 2008, 476, 341-349.
- [2] Davies G.J., *Solidification and Casting*, Wiley, University of Michigan, 1973.
- [3] 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
- [4] Vinarcik E. J., *High Integrity Die Casting Processes*, John Wiley & Sons, 2002.
- [5] Kirkwood D.H., Suery M., Kapranos P., Atkinson H.V., Young K. P., *Semi-Solid Processing of Alloys*, Springer Series in Materials Science, Cambridge, MA, 2009.
- [6] 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.
- [7] Spencer D.B., PhD Thesis, MIT, Cambridge, MA, 1971.
- [8] Kolahdooz A., Nourouzi S., Bakhshi M., Hosseinipour, S.J., Investigation of the controlled atmosphere of semisolid metal processing of A356 aluminium alloy, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2013, 28(10) 4267-4274.
- [9] Fan, Z., *Semisolid Metal Processing*, International Materials Reviews, 2002, 47, 1-37.
- [۱۰] صفاری، ش.، اخلاقی، ف.، بررسی تاثیر اعمال ارتعاش مکانیکی روی سطح شیب‌دار بر ریزساختار کامپوزیت در جای $Al-Mg_2Si$. دومین همایش بین‌المللی و هفتمین همایش مشترک انجمن مهندسی متالورژی ایران و انجمن ریخته‌گری ایران، ۱۳۹۲، سمنان، دانشگاه سمنان، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی.
- [11] Zhang L., WU G., Wang S.H., Ding W.J., Effect of cooling condition on microstructure of semi-solid AZ91 slurry produced via ultrasonic vibration process, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2012, 22, 2357-2363.
- [12] Huang W., Yan H., Preparation and theoretic study of semi-solid $Al_2Y/AZ91$ magnesium matrix composites slurry by ultrasonic vibration, *Journal of Rare Earths*, 2014, 32, 573-580.
- [13] Zhao J.W., Wu S.S., Xie L.Z., An P., Mao Y.W., Effects of vibration and grain refiner on microstructure of semisolid slurry of hypoeutectic Al-Si alloy, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2008, 18, 842-846.
- [14] Chaowalit L., Songwid P., Julathep K., Metallurgical structure of A356 aluminum alloy solidified under mechanical vibration: An investigation of alternative

استفاده از گاز آرگون نشان می‌دهد. با مقایسه این شکل با شکل (۱۱) و همچنین نتایج آزمون سختی مشاهده می‌شود که در شرایط استفاده از گاز آرگون، ریزساختار ریزتر و سختی بیشتری حاصل می‌شود که علت آن را می‌توان عدم ایجاد ناخالصی در قطعه بیان نمود. با اینکه تفاوت‌ها بسیار ناچیز هستند، ولی توصیه می‌شود که در هنگام ریخته‌گری از گازهای محافظ استفاده شود تا بتوان از ورود ناخالصی‌ها و ایجاد تخلخل و همچنین واکنش فلز مذاب با اتمسفر اطراف جلوگیری نمود.



شکل ۱۲- تصویر میکروسکوپ نوری قطعه به دست آمده با دمای $625^{\circ}C$ ، فرکانس ارتعاش 60Hz و زمان ارتعاش ۱۵S بدون گاز آرگون

۴- نتیجه‌گیری

- ۱- با توجه به آزمایش‌های عملی و روش آماری تاگوچی و تحلیل داده‌های به دست آمده در دو گروه استفاده از گاز آرگون و بدون استفاده از گاز آرگون نتیجه می‌شود که استفاده از گاز آرگون باعث کاهش میزان تخلخل به وجود آمده در مذاب می‌شود.
- ۲- مهم‌ترین و تأثیرگذارترین متغیر در ریخته‌گری نیمه‌جامد آلیاژ آلومینیم A380 تحت گاز آرگون متغیر دما است. بررسی سطوح مختلف این متغیر نتایج نشان می‌دهد که دمای $625^{\circ}C$ یکی از سطوح مناسب این متغیر برای این نوع ریخته‌گری است. همچنین با افزایش دما از 625 به $635^{\circ}C$ اندازه دانه به میزان ۱۸ درصد افزایش و سختی به میزان ۱۶ درصد کاهش می‌یابد.
- ۳- با مشاهده تأثیرات فرکانس و زمان نیز مشاهده می‌شود که فرکانس ارتعاش در جایگاه دوم و زمان ارتعاش در جایگاه سوم قرار دارند. متغیرهای فرکانس

- [19] Montgomery D.C., Design and Analysis of Experiments, Five Edition, Singapore, John Willy & Sons (Asia), 2004.
- [20] Pouskouleli G., Wheat T.A., Statistical design for material and process optimization, CIM, 1992, 85, 130-136.
- [21] 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.
- [22] 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) 39-51.
- [23] Birol Y., Semi-solid processing of the primary aluminum die-casting alloys A356, Journal of Alloys and Compounds, 2009, 473, 133-138.
- [24] 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.
- [25] Rouquerol F., Rouquerol J., Sing K.S.W., Adsorption by Powder and Porous Solids, Academic press, 1999, 1-25.
- semi-solid casting routes, Journal of Material and Design, 2009, 30, 3925-3930.
- [15] 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.
- [16] Zhang Y., Wu G.H., Liu W.C., Zhang L., Pang S., Ding W.J., Effects of processing parameters on microstructure of semi-solid slurry of AZ91D magnesium alloy prepared by gas bubbling, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25, 2181-2187.
- [۱۷] باباخانی ا، عبداللهی م، ضیایی س.م.ر، بررسی تأثیر ارتعاشات مکانیکی بر مورفولوژی گرافیت و ریز ساختار چدن نشکن، سومین همایش مشترک انجمن علمی ریخته‌گری ایران و انجمن مهندسی مواد و متالورژی ایران، ۱۳۸۸، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران.
- [18] Ehteramian Haghighi S., Kolahdooz A., Karimian M., The parameters investigation and hardness optimization of A380 aluminum alloy produced by mechanical vibrator, in Persian, Journal of Solid Mechanics in Engineering, 2016, 9(3) 409-418.