



پژوهش‌نامه ریخته‌گری

مقاله پژوهشی:

بررسی خواص مکانیکی و امکان جایگزینی قطعات آهنگری شده با قطعات ریختگی آلیاژ آلومینیم ۶۰۶۱

میلاذ شادی^۱، حسن ثقفیان لاریجانی^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران

۲- استاد، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران

* نویسنده مکاتبه کننده: Email: saghafian@iust.ac.ir

چکیده:

هدف از انجام این پژوهش، افزایش خواص مکانیکی قطعات ریختگی آلیاژ آلومینیم ۶۰۶۱ و کاهش استفاده از فرآیند آهنگری با استفاده از جواهرها و تغییر سرعت سرد شدن است. به منظور تاثیر جواهرها با ثابت کردن پارامترهای متغیر، از آمیزان Al-5Ti-1B و جهت بررسی تاثیر سرعت سرد شدن از دو نوع قالب ماسه‌ای و فلزی استفاده شد. نتایج آنالیز تصویری نشان داد که کوچک‌ترین اندازه دانه با عدد ۴۷ میکرومتر مربوط به نمونه تولید شده در قالب فلزی با افزودن جواهرها است. همچنین نمونه فلزی با افزودن جواهرها نسبت به نمونه شاهد (قطعه مستقیم آهنگری شده از بیلت) ۲۲٪ افزایش سختی، ۲۱/۵٪ افزایش در استحکام کششی نهایی و ۲۳٪ افزایش ازدیاد طول داشته است. در ادامه به منظور استفاده از روش بهینه تعیین شده برای تولید قطعات، یک نوع قطعه با هندسه نمونه آهنگری (شاهد) با روش قالب فلزی با افزودن جواهرها تولید و به منظور رسیدن به ابعاد و خواص نهایی تحت عملیات آهنگری نهایی با پرس کم قرار گرفت. به این صورت قطعه تولیدی به روش ترکیبی ریخته‌گری و آهنگری نسبت به نمونه شاهد، ۲۷٪ افزایش سختی و ۳۳٪ افزایش استحکام کششی نهایی ایجاد کرده است و توانایی جایگزینی با نمونه شاهد را دارد.

تاریخ دریافت: ۰۵ شهریور ۱۴۰۲
تاریخ بازنگری: ۳۰ تیر ۱۴۰۳
تاریخ پذیرش: ۱۶ مرداد ۱۴۰۳

واژه‌های کلیدی:

آلومینیم ۶۰۶۱،
آهنگری،
جواهرزایی،
سرعت سرد شدن،
خواص مکانیکی.

ارجاع به این مقاله:

میلاذ شادی، حسن ثقفیان لاریجانی، بررسی خواص مکانیکی و امکان جایگزینی قطعات آهنگری شده با قطعات ریختگی آلیاژ آلومینیم ۶۰۶۱، پژوهش‌نامه ریخته‌گری، پاییز و زمستان ۱۴۰۳، جلد ۸، شماره ۲، صفحات ۹۹-۱۰۶.
شناسه دیجیتال: (DOI): 10.22034/fej.2024.413480.1184

۱- مقدمه

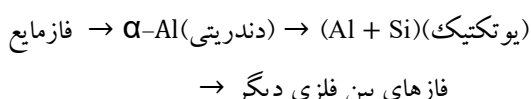
به دلیل هزینه تولید بالا، عدم در دسترس بودن تجهیزات برای آهنگری قطعات بزرگ و... محققان درصدد هستند تا با تغییر و اصلاح روش‌های ریخته‌گری سنتی و کنترل شرایط آن کیفیت قطعات ریختگی را افزایش دهند تا سهم آهنگری در تولید قطعات کاهش یابد [۳].

رویکردهای مختلفی جهت افزایش خواص مکانیکی قطعات آلومینیمی تولید شده به روش ریخته‌گری مطرح شده است. از جمله این رویکردها می‌توان به تغییر روش ریخته‌گری، افزودن جواهرها و بهسازی، عملیات حرارتی، افزایش سرعت سرد شدن، ارتعاش مکانیکی و... اشاره کرد. این موارد منجر به ساختار بهینه و مناسب جهت ایجاد خواص مکانیکی بالاتر می‌شود. یکی از

از پر مصرف‌ترین آلیاژهای کار شده آلومینیم می‌توان به آلیاژهای سری ۶۰۰۰ اشاره کرد که کاربردهای وسیعی در هواپیما، ساختمان‌سازی، وسایل نقلیه، کشتی‌ها، ابزارها، سیستم‌های انتقالی، هادی‌های الکتریکی و... دارند. آلیاژ آلومینیم ۶۰۶۱ با عناصر آلیاژی سیلیسیم و منیزیم از مهم‌ترین آلیاژهای این گروه با قابلیت آهنگری هستند. این آلیاژ دارای ۰/۴ الی ۰/۸ درصد سیلیسیم و ۰/۸ الی ۱/۲ درصد منیزیم است [۱ و ۲].

قطعات تولید شده به روش آهنگری به علت داشتن استحکام و ضریب اطمینان بالا و همچنین ساختار متالورژیکی مناسب، موارد استفاده بسیاری در کلیه زمینه‌های صنعتی پیدا کرده‌اند. امروزه

مقایسه با فرآیندهای ریخته‌گری ماسه احتیاج دارند. بنابراین می‌توان با کاهش مصرف جواهرزا و بهساز، مشکل قیمت و تخلخل به حداقل رساند [۱۲]. در پژوهشی تاثیر سرعت سرد شدن آلیاژ A356 با استفاده از قالب‌های ماسه‌ای با ضخامت‌های مختلف بررسی شد. با کاهش ضخامت قالب ماسه‌ای و در نتیجه افزایش نرخ سرد شدن، زمان انجماد (t_f) کاهش یافت [۱۳]. زمان انجماد به عنوان زمانی تعریف می‌شود که فاز مایع از طریق ساختار دندریتی (α -Al) و فاز یوتکتیک (Al + Si) به یک فاز جامد تبدیل می‌شود. فرآیند انجماد آلیاژ A356 به صورت زیر است:



هنگامی که ضخامت قالب کاهش یافت، دمای جواهرزنی α -Al و دمای یوتکتیک کاهش یافت [۱۴].

نیرومند و همکاران [۱۵] دریافتند در آلیاژ AS7U3G که با کاهش فاصله بازوهای ثانویه دندریتی از 3 ± 45 میکرومتر به 3 ± 17 میکرومتر استحکام تسلیم و استحکام کششی به ترتیب $16/5$ و $6/5$ درصد افزایش می‌یابند. استحکام کششی تا سرعت سرد شدن $8/4$ درجه سانتی‌گراد بر ثانیه افزایش قابل توجهی دارد ولی بعد از این مقدار شیب خط تقریباً ثابت می‌شود

۲- مواد و روش پژوهش

در این پژوهش شمش آلیاژ آلومینیم ۶۰۶۱ مطابق با ترکیب شیمیایی جدول ۱، در کوره آزمایشگاهی مدل AFE1200L ذوب شد. جهت پوشش دادن سطح مذاب، فلاکس پوششی FR Cover-11 و به منظور گاززدایی از FR degas N برای بررسی اثر جواهرزایی از آمیزان Al-5Ti-1B با ترکیب شیمیایی آمده در جدول ۲، استفاده شد. برای بررسی میزان بهینه مورد استفاده از این جواهرزا، درصدهای مختلفی استفاده و ریزساختار بررسی شد و در نهایت از بهینه‌ترین درصد آن ($0/3$ درصد وزنی) برای ادامه روند تحقیق استفاده شد. جهت بررسی سرعت سرد شدن دو نوع قالب فلزی فولادی و ماسه سیلیسی تهیه شد. آماده‌سازی ذوب برای هر چهار حالت: ۱- قالب ماسه‌ای + بدون جواهرزا، ۲- قالب ماسه‌ای + با جواهرزا، ۳- قالب فلزی + بدون جواهرزا و ۴- قالب فلزی + با جواهرزا به صورت جداگانه انجام پذیرفت. دمای کوره در حدود 10 ± 720 تنظیم شد. جهت سهولت بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی، نمونه‌های تولیدی با هندسه استوانه توپ‌ریخته‌گری شد. همچنین یک قطعه با جنس آلومینیم ۶۰۶۱ تولید شده به روش آهنگری به منظور

ساده‌ترین راه‌ها ایجاد ساختار ریزدانه با استفاده از جواهرزاها و افزایش سرعت سرد شدن با تغییر نوع قالب است [۴].

جواهرزایی بطور گسترده‌ای در تولید صنعتی انواع مختلف آلیاژهای آلومینیم، چه به صورت کار شده و چه به صورت ریختگی، بکار می‌رود. اندازه دانه ریز اغلب مطلوب است، چون علاوه بر بهبود خواص مکانیکی قطعات ریختگی، روی قابلیت ریختگی (مانند تغذیه‌گذاری، مقاومت به ترک گرم و تخلخل‌های گازی و انقباضی) تاثیر مثبت می‌گذارد [۵]. امروزه اکثراً از آمیزان‌های Al-Ti-B و Al-Ti به عنوان جواهرزا در آلیاژهای آلومینیم استفاده می‌شود. نقش بور (B) در جواهرزایی کاملاً پیدا نشده است، اما عنوان شده که ذرات بوراید باعث افزایش صافی سطح جواهرنه شده و سرعت انحلال جواهرزا در مذاب آلومینیم را کاهش می‌دهد، بنابراین قابلیت جواهرزایی بهبود می‌یابد. اما اگر به میزان زیادی وجود داشته باشد، به صورت ذرات آگلومره شده درآمد و تنه‌شین می‌شوند و یا به صورت آخال تاثیر منفی بر خواص قطعه می‌گذارد [۶]. افزایش دمای بارریزی سبب کاهش توان ریزدانه‌کنندگی می‌شود که علت آن را می‌توان به دلیل انحلال ذرات جواهرزا در مذاب دانست. همچنین تحقیقات مختلف نشان داده است که تاثیر جواهرزایی پس از بارریزی و ذوب مجدد در همه آمیزان‌ها اشاره شده به شدت کاهش می‌یابد [۷]. گزارش شده است منیزیم جواهرزنی آلیاژهای آلومینیم به وسیله آمیزان‌های تیتانیوم را تشویق می‌کند در صورتی که مس و روی مانعی برای این عمل هستند [۸]. عوامل مختلفی نظیر درجه حرارت مذاب، ترکیب شیمیایی آلیاژ، درجه حرارت بارریزی و... بر توان ریزکنندگی تاثیرگذار است. اگر زمان نگهداری افزایش یابد ممکن است سبب به هم پیوستن ذرات مواد جواهرزا (عموماً Ti_2) و تنه‌شین شدن آن‌ها در کوره نگهدارنده شود و به همین ترتیب اثر جواهرزایی کاهش یابد [۹]. گزارش شده است در آلیاژ آلومینیم ۶۰۶۱ با استفاده از جواهرزا Al-5Ti-1B کوچک‌ترین اندازه دانه با عدد ۶۵ میکرومتر در دمای ریخته‌گری $720^\circ C$ و بزرگ‌ترین آن در دمای $800^\circ C$ با عدد ۹۰ میکرومتر حاصل شده است [۱۰].

سرعت سرد شدن روی ساختار نهایی قطعه ریختگی موثر است و افزایش آن منجر به کاهش اندازه دانه، کاهش فاصله بازوهای دندریتی و تغییر نسبت فازها (اجزای اولیه و اجزای یوتکتیک) می‌شود [۱۱]. بر اساس گزارشی که حدود دو دهه پیش ارائه شد، سرعت سرد شدن همه مشخصه‌های ریزساختاری شامل اندازه دانه، DAS و بهسازی سیلیسیم را بهبود می‌بخشد. عملاً شرایط سرد کردن بالا، متداول در ریخته‌گری با قالب دائمی و فرآیندهای تحت فشار به میزان کم‌تری جواهرزا و بهساز در

جدول ۱- ترکیب شیمیایی شمش آلومینیم ۶۰۶۱ (درصد وزنی)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn
۰/۵۴	۰/۲۳	۰/۲۶	۰/۰۰۸	۱/۰۵	۰/۰۱
Cr	Ni	Ti	V	B	Al
۰/۱۲	<۰/۰۰۲	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۰۰۹	پایه

جدول ۲- ترکیب شیمیایی جوانه‌زای بکار رفته (درصد وزنی)

Ti	B	Fe	Si	Al
۵	۱	۰/۱۲	۰/۰۴	پایه

می‌یابد و همچنین خواص مورد نیاز را تامین کرده و مشکلاتی مانند هزینه بالا آهنگری قطعات سنگین، عدم وجود پرس‌های سنگین برای قطعات بزرگ و... حل می‌شود.

۳- نتایج و بحث

شکل (۱) ریزساختار نمونه‌های تولید شده در شرایط مختلف را نشان می‌دهد. همانطور که از شکل (۱- الف) مشخص است سرعت سرد شدن نمونه‌ها در قالب ماسه‌ای به دلیل انتقال حرارت پایین، آهسته است و به این دلیل زمان کافی برای رشد دانه‌ها و ایجاد ساختار درشت فراهم است. اندازه دانه اندازه‌گیری شده در این نمونه ۱۵۳ میکرومتر است. شکل (۱-ب) ریزساختار نمونه ماسه‌ای با افزودن جوانه‌زا را نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است افزودن جوانه‌زا Al-5Ti-1B باعث کاهش اندازه دانه‌ها و تشکیل ساختار ریزتری نسبت به ریزساختار نمونه بدون جوانه‌زا شده است. مکانیزم ایجاد ساختار ریز با استفاده از جوانه‌زا Al-5Ti-1B، تشکیل ترکیبات بین فلزی مانند $AlTi_3$ و TiB_2 و AlB_2 است که به عنوان مکان‌های مستعد جوانه‌زایی عمل می‌کنند. نتایج به دست آمده از نرم افزارهای آنالیز تصویری نشان داد که عدد اندازه دانه نمونه ماسه‌ای با افزودن جوانه‌زا ۹۴ میکرومتر و عدد اندازه دانه نمونه ماسه‌ای بدون جوانه‌زا ۱۵۳ میکرومتر است. بدین ترتیب با استفاده از جوانه‌زا حدود ۳۸/۵٪ کاهش اندازه دانه صورت گرفته است. این کاهش اندازه دانه در ایجاد خواص مکانیکی بالاتر موثر است. افزایش دمای افزودن جوانه‌زا و زمان نگهداری جوانه‌زا در مذاب اثر عکس ایجاد می‌کند. شکل (۱-ج) نمونه فلزی بدون افزودن جوانه‌زا را نشان می‌دهد. در این نمونه به دلیل استفاده از قالب فلزی، سرعت سرد شدن بالاتر نسبت به نمونه‌های ماسه‌ای باعث ایجاد ساختار ریزدانه‌تری شد. با افزایش سرعت سرد شدن و کاهش اندازه و فاصله بین بازوهای دندردیتی، همچنین کاهش اندازه دانه، مشخصات ریزساختاری تغییر می‌کند و این امکان وجود دارد قطعات با کیفیت و خواص

مطالعه و مقایسه خواص متالورژیکی با نمونه‌های ریخته‌گری به عنوان نمونه شاهد تهیه شد. سطح نمونه‌ها پس از آماده‌سازی برای متالوگرافی، سنباده‌زنی و پولیش شد. و سپس توسط محلول Keller اچ شدند. تصاویر ریزساختاری با بزرگنمایی‌های مختلف تهیه شد. جهت اندازه‌گیری اندازه دانه از روش آنالیز تصویری با استفاده از نرم‌افزار Image J و MIP استفاده شد. جهت اندازه‌گیری اندازه دانه، از روش میانگین تقاطع خطی استفاده شد. در هر نمونه حدود ۱۰ مورد اندازه‌گیری صورت گرفت که میانگین این اندازه‌گیری‌ها ارائه شد. برای بررسی خواص مکانیکی نمونه‌ها، آزمون سختی‌سنجی و کشش تک محوره انجام شد. بررسی سختی سطحی قطعات با دستگاه سختی‌سنج Koopa صورت گرفت. جهت بررسی استحکام کششی نمونه‌های ریخته‌شده و نمونه شاهد آهنگری شده، از آزمایش کشش تک محوره استفاده شد. نمونه‌ها طبق استاندارد ASTM B557M تراشکاری شد. دستگاه SANTAM مدل SAF-50 برای آزمایش کشش انتخاب شد. پس از انجام آزمون‌های ذکر شده، یک نمونه با ریزترین دانه و خواص مکانیکی بالاتر به عنوان نمونه بهینه انتخاب شد. پس از تعیین بهترین حالت تولید نمونه از بین ۴ حالت؛ قالب ماسه‌ای و جوانه‌زا، قالب ماسه‌ای بدون جوانه‌زا، قالب فلزی با جوانه‌زا و قالب فلزی بدون جوانه‌زا، برای بررسی قابلیت آهنگری نمونه بهینه، یک قطعه با هندسه نمونه شاهد (آهنگری شده) ریخته‌گری شد تا پس از اعمال آهنگری بر آن قطعه نهایی حاصل شود. فرآیند آهنگری توسط دستگاه پرس پیچ ساخت کشور روسیه با ظرفیت پرس ۲۰۰ تن انجام شد. ابتدا قطعه تا محدوده دمای آهنگری آلایژ آلومینیم ۶۰۶۱ یعنی در بازه $430-480^{\circ}C$ گرم شد سپس در دستگاه تحت عملیات آهنگری قرار گرفت. بدین صورت که با دو بار پرس به ظرفیت ۲۰۰ و ۱۵۰ تن قطعه به ابعاد و خواص نهایی رسید. در این صورت با ترکیب روش ریخته‌گری و آهنگری سهم آهنگری در تولید قطعات کاهش

کاهش اندازه دانه مربوط به دو نمونه فلزی با جوانه‌زا و فلزی بدون جوانه‌زا است.

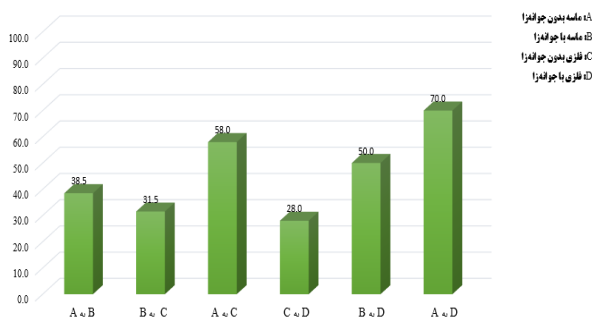
همانطور که مشاهده می‌شود با تغییر جنس قالب از ماسه‌ای به فلزی و به دنبال آن افزایش سرعت سرد شدن اندازه دانه‌ها در آلیاژ آلومینیم ۶۰۶۱ کاهش پیدا کرده است. همچنین افزودن جوانه‌زا اندازه دانه را کاهش داده است. اما همانطور که دیده می‌شود در نمونه‌های قالب فلزی سرعت سرد شدن تاثیر بیش‌تری داشته و جوانه‌زا در این نمونه‌ها مانند نمونه‌های ماسه‌ای کاهش اندازه دانه ایجاد نکرده است.

جدول ۳- تاثیر جوانه‌زا و سرعت سرد شدن بر اندازه دانه

آلیاژ آلومینیم ۶۰۶۱

نمونه‌ها	عدد اندازه دانه (μm)
ماسه‌ای + بدون جوانه‌زا	۱۵۳
ماسه‌ای + با جوانه‌زا	۹۴
فلزی + جوانه‌زا	۶۵
فلزی + با جوانه‌زا	۴۷

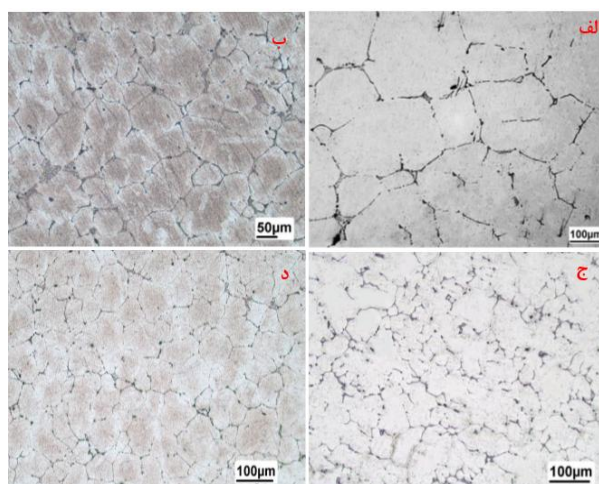
درصد کاهش اندازه دانه نمونه‌ها نسبت به هم



شکل ۲- نمودار میله‌ای درصد کاهش اندازه دانه نمونه‌های تولید شده نسبت به هم

شکل (۳) مقادیر سختی نمونه‌ها را نشان می‌دهد. بررسی نتایج حاصل از سختی‌سنجی نشان می‌دهد که با افزایش سرعت سرد شدن و افزودن جوانه‌زا سختی نمونه‌ها افزایش می‌یابد بدین صورت که سختی نمونه ماسه‌ای با افزودن جوانه‌زا نسبت به نمونه ماسه‌ای بدون افزودن جوانه‌زا، ۴۵ درصد افزایش داشته است. همچنین نمونه فلزی بدون افزودن جوانه‌زا نسبت به نمونه ماسه‌ای بدون جوانه‌زا حدود ۸۱ درصد افزایش سختی داشته که اثر افزایش سرعت سرد شدن در ایجاد ساختار ریزدانه و در نتیجه سختی بالاتر را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج سختی نمونه‌ها، نمونه فلزی با جوانه‌زا بیش‌ترین سختی را ایجاد کرده که نسبت به نمونه شاهد نزدیک به ۲۲ درصد افزایش سختی ایجاد کرده است. در صورتی که مقادیر Ti و B در ترکیب بیش‌تر از حالت

مکانیکی بالا تولید شود. در این نمونه اندازه دانه‌ها به ۶۵ میکرومتر رسیده است. این اندازه دانه نتیجه می‌دهد که نمونه قالب فلزی بدون جوانه‌زا نزدیک به ۳۱/۵٪ کاهش اندازه دانه نسبت به نمونه ماسه‌ای با جوانه‌زا داشته است که این موضوع اهمیت افزایش سرعت سرد شدن بر تغییرات ریزساختار را نشان می‌دهد. همچنین نمونه قالب فلزی بدون جوانه‌زا نسبت به نمونه ماسه‌ای بدون جوانه‌زا ۵۸٪ کاهش در اندازه دانه ایجاد شده است. شکل (۱-د) نمونه فلزی با افزودن جوانه‌زا را نشان می‌دهد. عدد اندازه دانه این نمونه به ۴۷ میکرومتر رسیده است. با توجه به عدد اندازه دانه‌ها، نمونه قالب فلزی با جوانه‌زا نسبت به نمونه قالب ماسه‌ای با جوانه‌زا ۵۰٪ درصد و نسبت به قالب ماسه‌ای بدون جوانه‌زا ۷۰٪ کاهش اندازه دانه داشته است که این تغییرات قابل توجه است. همچنین در نمونه قالب فلزی با جوانه‌زا نسبت به نمونه مشابه بدون افزودن جوانه‌زا حدود ۲۸٪ کاهش اندازه دانه ایجاد شده است. این تغییرات کم‌تر نسبت به بقیه نمونه‌ها نشان می‌دهد افزایش سرعت سرد شدن نقش مهم‌تری در تغییر ریزساختار دارد و افزودن جوانه‌زا سهم کم‌تری را به خود اختصاص می‌دهد. با توجه به این توضیحات انتظار می‌رود تغییرات کم‌تر دو نمونه قالب فلزی با جوانه‌زا و بدون جوانه‌زا با یکدیگر به علت غالب بودن سرعت سرد شدن و به دنبال آن کاهش سهم جوانه‌زایی در ریزدانگی باشد.



شکل ۱- تصویر ریزساختار نمونه‌های تولیدی به روش ریخته‌گری در بزرگنمایی برابر، (الف) ماسه‌ای بدون جوانه‌زا، (ب) ماسه‌ای با جوانه‌زا، (ج) فلزی بدون جوانه‌زا و (د) فلزی با جوانه‌زا

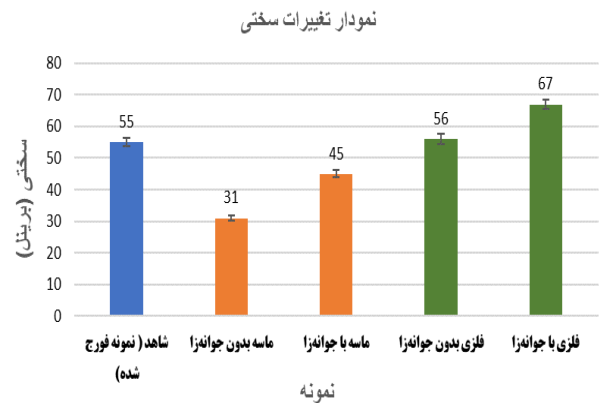
در جدول (۳) عدد اندازه دانه نمونه‌های تولید شده توسط فرآیند ریخته‌گری با شرایط مختلف، آورده شده است. همچنین در شکل (۲) درصد کاهش اندازه دانه نمونه‌ها نسبت به هم آورده شده است. بیش‌ترین کاهش اندازه دانه مربوط به دو نمونه فلزی با جوانه‌زا نسبت به ماسه‌ای با جوانه‌زا بود. همچنین کم‌ترین میزان

کم‌ترین استحکام کششی با مقدار 101 MPa مربوط به نمونه با ریخته‌گری ماسه‌ای بدون افزودن جوانه‌زا است. درصد تغییرات استحکام کششی نهایی بین بهترین نمونه (فلزی با جوانه‌زا) و بدترین نمونه (ماسه‌ای بدون جوانه‌زا) حدود ۷۳ درصد محاسبه شد. نتایج حاصل از آزمون کشش نشان داد، استحکام کششی نهایی نمونه ماسه‌ای با افزودن جوانه‌زا نسبت به نمونه مشابه بدون جوانه‌زا حدود ۲۲ درصد افزایش داشته است. همچنین استحکام کششی نهایی نمونه فلزی با افزودن جوانه‌زا نسبت به نمونه مشابه بدون جوانه‌زا حدود ۲۴ درصد افزایش داشته است. با توجه به مشاهدات ریزساختاری، علت افزایش استحکام نمونه‌ها به دلیل ایجاد ساختار ریزدانه است. افزودن جوانه‌زا به دلیل ایجاد مکان‌های جوانه‌زایی غیر همگن باعث ایجاد دانه و در نتیجه افزایش تعداد دانه و مرز دانه شد. همچنین تغییر روش ریخته‌گری از قالب ماسه‌ای به فلزی باعث افزایش سرعت سرد شدن آلیاژ و ایجاد ساختار ریزدانه شد. از آنجایی که استحکام کششی تابعی از ریزساختار است، با بهبود ریزساختار استحکام کششی افزایش یافت. نمودارهای شکل (۴) تغییرات خواص مکانیکی نمونه‌های تولیدی نسبت به نمونه شاهد (آهنگری) را نشان می‌دهد. نمونه تولیدی به روش فلزی با جوانه‌زا نسبت به نمونه ماسه‌ای بدون جوانه‌زا حدود ۴۵ درصد افزایش از دیاد طول داشته است. افزایش از دیاد طول معیاری در بهبود شکل‌پذیری نمونه می‌باشد. به طور کلی اصلاح ریزساختار تاثیر بسزایی در تغییر از دیاد طول و شکل‌پذیری دارد. همانطور که مشخص است بهترین نمونه (نمونه قالب فلزی با جوانه‌زا) نسبت به نمونه شاهد (آهنگری شده) ۲۳ درصد از دیاد طول و $21/5$ درصد استحکام کششی نهایی افزایش پیدا کرده است.

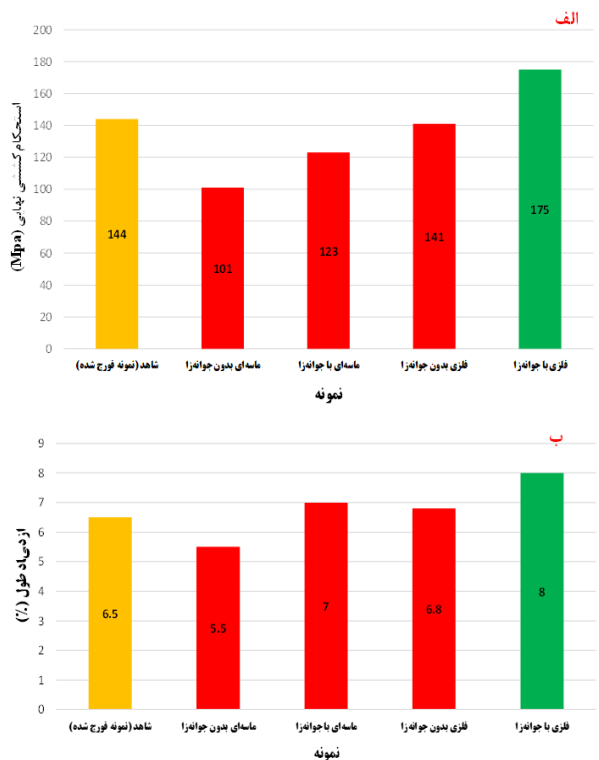
به منظور بررسی قابلیت آهنگری نمونه بهینه، یک قطعه با هندسه نمونه شاهد با روش قالب فلزی با افزودن جوانه‌زا تولید شد. سپس قطعه با صرف پرس خیلی کم نسبت به روش آهنگری مستقیم از بیلت، آهنگری شده و به ابعاد و خواص نهایی رسید. بدین ترتیب ترکیبی از روش ریخته‌گری و فرآیند آهنگری قطعه با کیفیت نمونه شاهد و با هزینه کم‌تر تولید شد. شکل (۵) قطعه تولید شده به روش ترکیبی ریخته‌گری و آهنگری به همراه تصویر رادیوگرافی را پس از اعمال آهنگری نشان می‌دهد. همانطور که از شکل مشخص است، پس از انجام ریخته‌گری و اعمال فرآیند آهنگری با پرس پایین بر نمونه تولیدی، قطعه موردنظر با ویژگی ظاهری سالم و فاقد عیوب ظاهری در ابعاد نهایی ساخته شد.

در شکل (۶) نمونه تولیدی به روش ترکیبی ریخته‌گری (قالب فلزی با جوانه‌زا) و آهنگری با نمونه شاهد که از بیلت آلومینیم

بهینه باشد به دلیل برهمکنش احتمالی مکان‌های جوانه‌زایی با عناصر آلیاژی Si و Mg، باعث افزایش اندازه دانه به دلیل کاهش تعداد هسته‌های جوانه‌زایی می‌شود و سختی کاهش یابد. همانطور که از نمودارهای شکل (۴) مشخص است، با افزایش سرعت سرد شدن و انجام فرآیند ریزدانگی، خواص مکانیکی نمونه‌ها بهبود یافت. به طوری که نمونه تولید شده در قالب فلزی با افزودن جوانه‌زا بیش‌ترین استحکام کششی را با مقدار 175 MPa ایجاد کرده است. بدین ترتیب این نمونه بهترین نمونه از بین نمونه‌های تولیدی است که خواص نزدیک به نمونه شاهد و بلکه بهتر از آن دارد.



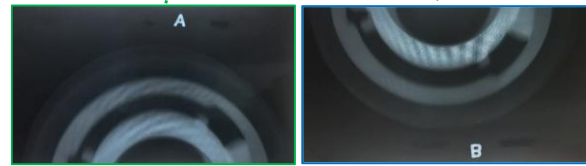
شکل ۳- نمودار تغییرات سختی برای نمونه‌های ریخته‌گری و نمونه شاهد



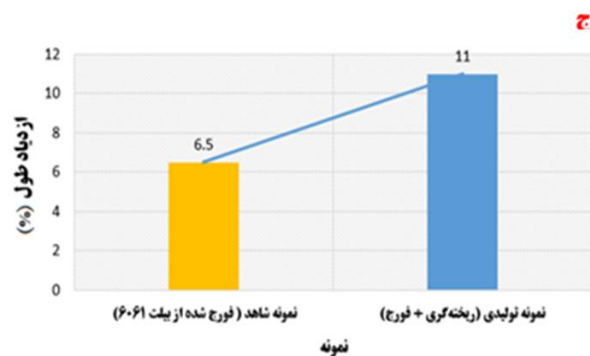
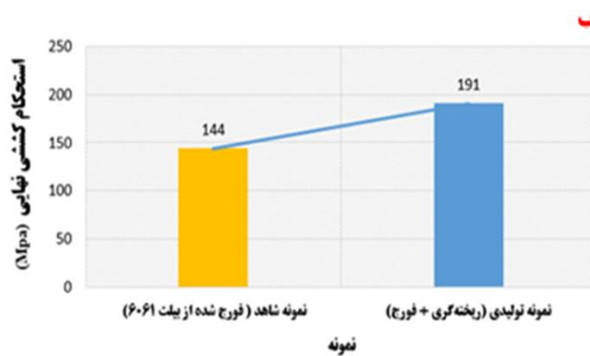
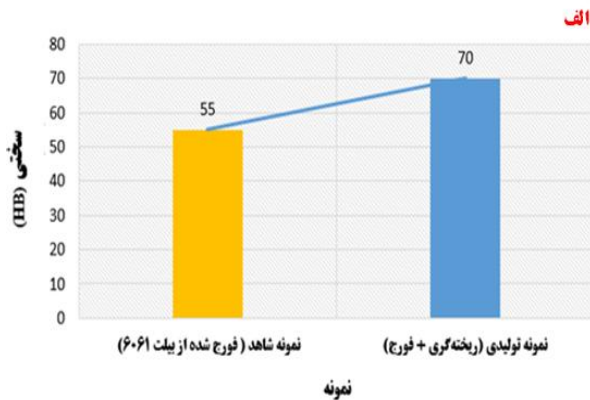
شکل ۴- نمودار تغییرات خواص مکانیکی برای نمونه‌های تولیدی و شاهد، الف) استحکام کششی نهایی و ب) از دیاد طول

نمونه تولیدی حاصل شد و در مقایسه با نمونه شاهد نیز خواص بهتری ارائه کرده است، اطمینان حاصل می‌شود که در صورت تولید قطعه استورز با آلیاژ آلومینیم ۶۰۶۱ به روش ترکیبی ریخته‌گری (با شرایط خاص) و آهنگری (با رویکرد کاهش سهم آهنگری در تولید)، امکان جایگزینی آن با نمونه مشابه که در چندین مرحله از بیلت آلومینیم ۶۰۶۱ آهنگری شده است، وجود دارد. به این ترتیب تولید قطعات با اندازه‌های بزرگ‌تر که به دلیل نیاز به دستگاه‌های پرس سنگین و هزینه بالا با مشکلاتی مواجه شدند، به روش ترکیبی ریخته‌گری و آهنگری قابلیت تولید دارند. به این صورت که هندسه و خواص اولیه قطعه توسط روش ریخته‌گری با شرایط خاص تولید و سپس برای رسیدن به ابعاد و خواص نهایی با میزان پرس کم آهنگری شوند.

۶۰۶۱ به طور مستقیم آهنگری شده و تراش خورده است، مشاهده می‌شود. همانطور که مشخص است از لحاظ ظاهری نمونه تولیدی مشابه نمونه شاهد است و پس از فرآیند تراشکاری آماده استفاده می‌باشد. در ادامه به منظور اطمینان بیش‌تر، خواص مکانیکی نمونه تولیدی بررسی شده است.



شکل ۵- قطعه تولید شده به روش ترکیبی ریخته‌گری در قالب فلزی با افزودن جوانه‌زا و آهنگری به همراه تصویر رادیوگرافی



شکل ۷- نمودار مقایسه خواص مکانیکی نمونه تولیدی و شاهد: (الف) سختی (ب) استحکام کششی نهایی و (ج) ازدیاد طول



شکل ۶- قطعه استورز آلومینیم ۶۰۶۱، (الف) تولید شده به روش آهنگری و تراش خورده (نمونه شاهد) و (ب) تولید شده به روش ترکیبی ریخته‌گری و آهنگری

شکل (۷) نمودارهای مقایسه خواص مکانیکی قطعه تولید شده (ریخته‌گری + آهنگری) با نمونه شاهد (آهنگری شده از بیلت کار شده ۶۰۶۱) را نشان می‌دهد. همانطور که از شکل (۷-الف) مشخص است سختی نمونه تولیدی نسبت به نمونه شاهد حدود ۲۷ درصد افزایش داشته است که این نشان می‌دهد انجام فرآیند ریخته‌گری در قالب فلزی و افزودن جوانه‌زا به واسطه افزایش در سرعت سرد شدن و جوانه‌زایی عناصر جوانه‌زا Ti و B در نمونه سختی افزایش پیدا کرده است. همچنین در صورت انجام عملیات حرارتی رسوب‌سختی روی نمونه تولیدی افزایش سختی بیش‌تری ایجاد خواهد شد. شکل (۷-ب) مقایسه استحکام کششی نمونه‌ها را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل استحکام کششی نهایی نمونه تولیدی نسبت به نمونه شاهد حدود ۳۳ درصد افزایش داشته است. همچنین در شکل (۷-ج) افزایش ۶۹ درصدی ازدیاد طول نسبی نمونه تولیدی نسبت به نمونه شاهد را نشان می‌دهد. با توجه به این که بهبود خواص مکانیکی در

- [10] Elsharkawy E., Shafy M., Mahdy A., Kandil A., The microstructure and mechanical behavior of aluminum alloy 6061 with the addition of Al-5Ti-1B and Al-5Ti-0.25C grain refiner masrer alloys, Journal of Al Azhar University Engineering Sector, 2011, 16(20) 966-978.
- [11] Eskin D., Du Q., Ruvalkaba D., Katgerman L., Experimental study of structure formation in binary Al-Cu alloys at different cooling rates, Materials Science and Engineering A, 2005, 405(1-2) 1-10.
- [12] Narayanan L.A., Literature Review on 319 Alloys, Report for NSERC/FORD/ University of Windsor, McGill University, Montreal, 1994.
- [13] Jeon J.H., Bae D.H., Effect of cooling rate on the thermal and electrical conductivities of an A356 sand cast alloy" Journal of Alloys and Compounds, 2019, 808, 151756.
- [14] Porter D.A., Easterling K.E., Sherif M., Phase Transformations in Metals and Alloys, Revised Reprint, CRC press, 2009.
- [۱۵] نیرومند ب.، لشنی‌زند م.، مالکی ع.، تعیین ثابت‌های رابطه‌ها - پیچ اصلاح شده و ارتباط خواص مکانیکی با ریزساختار آلیاژ AS7U3G، مواد پیشرفته در مهندسی، ۱۳۹۷، ۳۷ (۴) ۹۱-۱۰۰.

۴- نتیجه‌گیری

- (۱) اصلاح و بهبود روش‌های ریخته‌گری، امکان افزایش خواص مکانیکی قطعات را ایجاد می‌کند.
- (۲) افزودن مقادیر بهینه از آمیزان Al-5Ti-1B در دما و زمان مشخص تاثیر بسزایی در جوانه‌زایی آلومینیم ۶۰۶۱ و ایجاد ریزساختار ریزدانه دارد.
- (۳) تاثیر جوانه‌زایی در کاهش اندازه دانه در نمونه ماسه‌ای ۳۸/۵٪ و در نمونه قالب فلزی ۲۸٪ گزارش شد. همچنین تاثیر سرعت سرد شدن با تغییر جنس قالب ۵۸٪ است.
- (۴) جهت کاهش سهم آهنگری در تولید قطعات، یک نوع قطعه به نام استورز که به روش آهنگری ساخته می‌شد، با شرایط نمونه بهینه این پژوهش تولید گردید و سپس تحت عملیات آهنگری با پرس کم قرار گرفت. با ترکیب روش ریخته‌گری و آهنگری، سهم آهنگری مستقیم در تولید این قطعه کاهش یافت.
- (۵) سختی و خواص مکانیکی قطعه استورز تولید شده به روش ترکیبی ریخته‌گری و آهنگری، به ترتیب حدود ۲۷٪ و ۳۳٪ نسبت به نمونه شاهد (قطعه مستقیم آهنگری شده) افزایش داشته است. بنابراین قطعه مذکور توانایی جایگزینی با نمونه مشابه تولید شده به روش آهنگری مستقیم از بیلت آلومینیم ۶۰۶۱ را دارد. بدین ترتیب مشکل عدم وجود پرس‌های سنگین برای قطعات بزرگ‌تر و هزینه بالا تولید مستقیم قطعات به روش آهنگری، با این روش انجام شده در این پژوهش قابل حل است.

مراجع

- [1] MacKenzie D.S., Totten G.E., Handbook of Aluminum, Vol. 1, Physical Metallurgy and Processes, 2003.
- [2] Alshmiri Faraj D.F., Hainsworth S., Rapidly solidified aluminium-high silicon alloys, M.Sc. Thesis, 2010.
- [3] Rasmussen W.M., Aluminum Casting Technology, 2th Edition, AFS, 1993.
- [4] Mohanty P.S., Gruzleski J.E., Mechanism of grain refinement in aluminum, Acta Metallurgica et Materialia, 1995, 43(5) 2001-2012.
- [5] Crossley F.A., Mondolfo L.F., Mechanism of grain refining in aluminum and aluminum alloys, Trans. AIME, Journal of Metals, 1951, 3(12) 1143-1148.
- [6] Sigworth G. K., Kuhn T.A., Grain Refinement of aluminum casting alloys, International Journal of Metalcasting, 2007, 1, 31-40.
- [7] Sigworth G.K., Kaufman M., Rios O., Howell J., Development program on natural aging alloys, AFS Transactions, 2004, 112, 387-407.
- [8] Spittle J.A., Grain refinement in shape casting of aluminum alloys, International. J. Cast Metals Research, 2006, 19, 210-222.
- [9] Sigworth G.K., Easton M.A., Barresi J., Kuhn T.A., Grain refining of Al-Si casting alloys, Light Metals, 2007, 691-697.

IRANIAN FOUNDRYMEN'S
SOCIETY

Founding Research Journal

Research Paper:

Investigating the Mechanical Properties and Possibility of Replacing Forged Parts with Cast Parts of 6061 Aluminum Alloy

Milad Shadi¹, Hasan Saghafian^{2*}

1. M.Sc. Student, School of Materials Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.
2. Professor, School of Materials Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

* Corresponding author: Email: saghafian@iust.ac.ir

Paper history:

Receive Date: 27 August 2023
Revise Date: 20 July 2024
Accept Date: 06 August 2024

Keywords:

Aluminum 6061,
Forging,
Nucleation,
Cooling rate,
Mechanical properties.

Abstract:

The purpose of this research is to increase the mechanical properties of 6061 aluminum alloy cast parts using nucleating agent and changing the cooling rate. In order to determine the nucleate effect, the master alloy Al-5Ti-1B was used, and two types of sand and metal molds were used to investigate the effect of cooling rate. The results of the image analysis showed that the smallest grain size with a number of 47 micrometers corresponds to the sample produced in a metal mold with the addition of germinating agent. Also, the metal sample with the addition of germinating agent had a 22% increase in hardness, a 21.5% increase in final tensile strength and a 23% increase in elongation compared to the control sample (a straight piece forged from a billet). In the continuation, in order to use the optimal method determined for the production of parts, a type of part with the geometry of the forging sample (control sample) was produced using the metal mold method with the addition of a germinating agent and in order to achieve the final dimensions and properties under the final forging operation with a low press. it placed. In this way, compared to the control sample, the production part produced by the combined method of casting and forging has a 27% increase in hardness and a 33% increase in final tensile strength, and it has the ability to replace the control sample.

[Please cite this article using:](#)

Milad Shadi, Hasan Saghafian, Investigating the mechanical properties and possibility of replacing forged parts with cast parts of 6061 aluminum alloy, in Persian, Founding Research Journal, 2024, 8(2) 99-106.

DOI: 10.22034/frj.2024.413480.1184

Journal homepage: www.foundingjournal.ir