

Research Paper

Surface modification of hypereutectic Al-17wt%Si alloy by friction stir processing

Alireza Hasani Arefi¹, *Mostafa Hajian Heidary², Seyyed Mostafa Moosavizadeh³, Bahman Koroji³

1- M.Sc. Student, Department of Materials and Chemical Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.

2- Assistant Professor, Department of Materials and Chemical Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.

3- Assistant Professor, Department of Materials Engineering, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran.

Citation: Hasani Arefi A, Hajian Heidary M, Moosavizadeh S.M, Koroji B. Surface modification of hypereutectic Al-17wt%Si alloy by friction stir processing. Metallurgical Engineering 2018; 20(4): 249-257 <http://dx.doi.org/10.22076/me.2018.67249.1139>

doi : <http://dx.doi.org/10.22076/me.2018.67249.1139>

ABSTRACT

The most important drawback of hyper-eutectic Al-Si alloys is the presence of coarse, primary, irregular and brittle silicon phases, which strongly weakens the material. Therefore, modifying the morphology, decreasing the size and uniforming the distribution of primary silicon phases are essential. The aim of this paper is to use friction stir processing (FSP) for modification of surface microstructure of hyper-eutectic Al-Si alloy. Also, the effect of processing parameters on microstructure and tribological properties was investigated by the light microscopy and microhardness measurements. For this reason, several plate-shaped samples were prepared by casting in both metallic and sand molds. It was observed that microstructure is uniformed, porosities are removed and silicon phases are finely distributed by friction stir processing, leading to improvement of microstructure and mechanical properties of the alloy. The results also showed when Mg added and cooling rate increased, particles' size changes from 33.09 to 21.05 μm , micro hardness increased from 53 to 69 HV, and microstructure morphology is modified.

Keywords: Aluminum alloy, Friction stir processing, Si particles.

■.....■

* **Corresponding Author:**

Mostafa Hajian Heidary, PhD

Address: Department of Materials Science and Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.

Tel: +98 (9125261775)

E-mail: Hajian@shahroodut.ac.ir

اصلاح ریزساختار سطحی آلیاژهای پریوتکتیک Al-17%Si ریختگی به روش فرایند همزن اصطکاکی

علیرضا حسنی عارفی^۱، *مصطفی حاجیان حیدری^۲، سید مصطفی موسوی زاده^۳، بهمن کروجی^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مواد مرکب، دانشکده مهندسی و علم مواد دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران.

۲- استادیار، دانشکده مهندسی و علم مواد دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران.

۳- استادیار، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران.

چکیده

مهم‌ترین محدودیت آلیاژهای هایپرئوتکتیک Al-Si حضور سیلیسیم اولیه درشت، نامنظم و ترد است که زمینه نرم آلومینیم را به آسانی دچار ترک و کارایی آلیاژ را تضعیف می‌کند؛ بنابراین، اصلاح مورفولوژی، کاهش اندازه ذرات و یکنواخت کردن توزیع سیلیسیم اولیه در این آلیاژها ضروری است. هدف از این مقاله، استفاده از فرایند همزن اصطکاکی برای اصلاح ریزساختار سطحی آلیاژهای هایپرئوتکتیک Al-17%Si ریختگی است. همچنین تأثیرات پارامترهای فرایند همزن اصطکاکی روی ریزساختار و مشخصات مکانیکی و تریبولوژیکی سطح اصلاح‌شده بررسی شده است. بدین منظور نمونه‌ای صفحه‌ای شکل در دو قالب فلزی و ماسه‌ای ریخته‌گری شد. فرایند همزن اصطکاکی با یکنواخت نمودن ریزساختار ریختگی، از بین بردن تخلخل‌ها و پخش ذرات سیلیسیم با اندازه ذرات مناسب و ریز، موجب بهبود ریزساختار و خواص مکانیکی (سختی) آلیاژ گردید. نتایج نشان داد که با افزودن منیزیم و بالابردن سرعت سرد کردن اندازه ذرات از ۳۳/۰۹ به ۲۱/۰۵ کاهش یافته است و مورفولوژی سیلیسیم اصلاح‌شده و سختی از ۵۳ به ۶۹ افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: آلیاژ آلومینیم، فرایند همزن اصطکاکی، ذرات سیلیسیم

۱. مقدمه

ساختاری و بهبود مشخصات ریزساختاری این آلیاژها وجود دارد (۸-۱۱). همچنین از عملیات‌های حرارتی متفاوتی (پیرسختی) برای اصلاح مورفولوژی و تکتیک آلیاژ برای بهبود خواص مکانیکی استفاده می‌شود (۱۲و۵). هر چند که بعد از اجرای رویکردهای فوق، بهبود قابل توجهی در خواص مکانیکی آلیاژ دیده نشده است. هر دو رویکرد اصلاح شیمیایی و عملیات حرارتی نتوانسته‌اند به‌طور قابل توجهی تأثیرات حفرات ریختگی را حذف کنند و ذرات سیلیسیم را به‌طوریک نواخت باز توزیع کنند.

فرایند همزن اصطکاکی (FSP)^۲ یکفرایند حالت جامد است که از جوشکار همزن اصطکاکی که توسط مؤسسه جوشکاری بریتانیا (TWI) در سال ۱۹۹۱ ابداع شد به‌دست آمده است (۱۳و۱۴). فرایند FSP اساساً برای اصلاح ریزساختار سطحی آلیاژها استفاده می‌شود. ابزار مورد استفاده در FSP یک ابزار غیرمصرفی شامل شانه و پین است. ابزار ضمن چرخش حرارت ایجاد می‌کند، چرخش پین باعث همزدن مواد نرم می‌شود

2. Friction Stir Processing

آلیاژهای هایپرئوتکتیک Al-Si^۱ خواص جالبی نظیر مقاومت سایشی بالا، استحکام و سختی بالا و ضریب انبساط حرارتی پایینی از خود نشان می‌دهند. در نتیجه، از آن‌ها به‌طور گسترده‌ای در کاربردهای سایشی با نرخ بالا مانند پیستون‌ها، بلوکسیندرها و کمپرسورها استفاده می‌شود (۴-۱). متأسفانه زمانی که از روش ریخته‌گری معمولی استفاده می‌شود، تشکیل حفرات، ساختار درشتی و تکتیکی و ذرات Si اولیه و رفتار انقباضی نامناسب، عیوب اصلی مطرح در این آلیاژها هستند (۶-۱). این عیوب ریزساختاری خواص مکانیکی آلیاژهای هایپرئوتکتیک Al-Si را به‌طور قابل توجهی کاهش می‌دهند. خواص مکانیکی را می‌توان به‌وسیله شکستن ذرات درشت Si اولیه به ذرات ریز و از بین بردن تخلخل‌ها بهبود داد (۷). چندان رویکرد شیمیایی نظیر اصلاح تیغه‌های یوتکتیکی و ذرات Si اولیه و دانه‌های α-Al برای کاهش عیوب

1. Hypereutectic Alloys

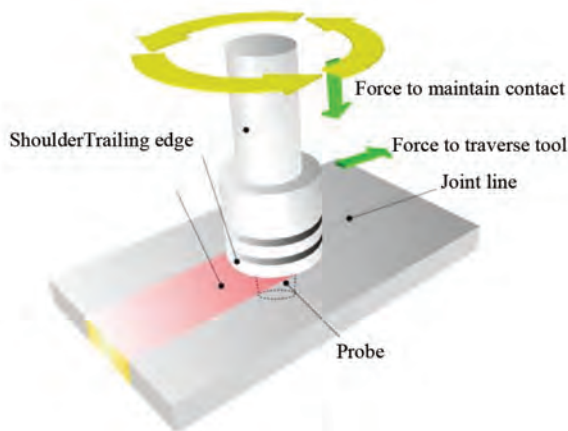
* نویسنده مسئول:

دکتر مصطفی حاجیان حیدری

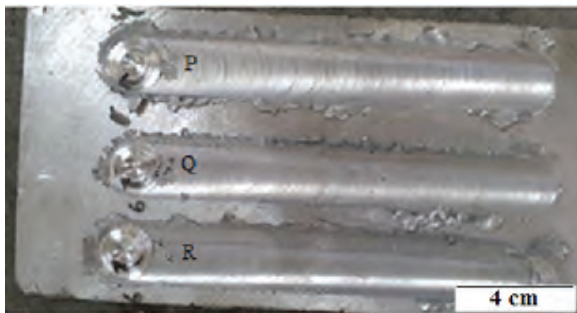
نشانی: شاهرود، دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده مهندسی و علم مواد.

تلفن: (۹۱۲۵۲۶۱۷۷۵) ۰۹۸+

پست الکترونیکی: Hajian@shahroodut.ac.ir



شکل ۱. شماتیکی از فرآوری همزن اصطکاکی



شکل ۲. شمش ریختگی FSP شده با ۳ سرعت $P=400\text{rpm}$, $Q=630\text{rpm}$, $R=1000\text{rpm}$

شماتیکی از نمونه که فرایند همزن اصطکاکی روی آن انجام شده در شکل ۲ آمده است. ماشین فرز استفاده شده مدل FP4M بود که مشخصات ابزار مورد استفاده در پژوهش و پارامترهای فرایند در جدول ۱ ارائه شد.

جدول ۱. مشخصات و پارامترهای دستگاه و نمونه‌ها

جنس ابزار	فولاد H13
قطر شانه	15mm
قطر پین استوانه‌ای	5mm
ارتفاع پین	4mm
زاویه ابزار با سطح قطعه	8°
سرعت‌های چرخش (rpm)	400, 630, 1000
سرعت حرکت پین	$16\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$

باید توجه داشت که Si به دلیل چگالی بالاتر به نیمه پایینی قالب می‌رود و در آن قسمت توزیع می‌شود و سطح نمونه دارای کمترین میزان Si خواهد بود. به همین جهت از سطح نمونه تهیه شده حدود 0.5mm توسط دستگاه تراش

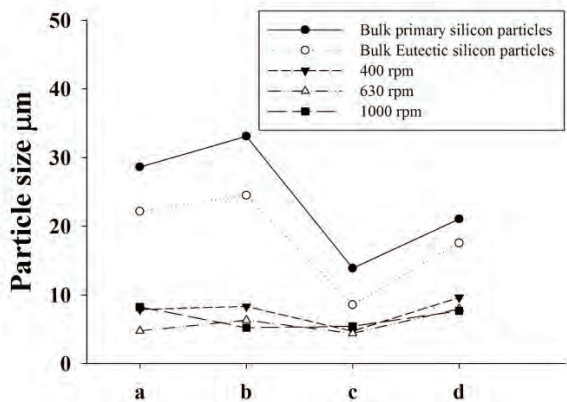
که این عمل با تغییر شکل پلاستیک شدید موضعی در این ناحیه همراه است که باعث حذف مؤثر حفرات ریختگی، اصلاح ذرات درشت سوزنی شکل Si در ساختاری و تکتیک و همچنین توزیع و شکستن ذرات Si اولیه در زمینه Al می‌شود که همگی باعث بهبود خواص مکانیکی آلیاژ می‌شوند (۱۷ و ۱۵). مشاهدات نشان داده‌اند که FSP یک ابزار مؤثر برای اصلاح ساختار ریختگی آلیاژهای Al-Si است. با وجود اینکه مطالعات زیادی روی اثر FSP بر مشخصات مکانیکی و ریزساختاری آلیاژهای ریختگی هایپریوتکتیک Al-Si انجام شده است (۲۲-۱۸)، گزارش‌های بسیار کمی در مورد بررسی اثر FSP بر مشخصات آلیاژهای هایپریوتکتیک Al-Si ریختگی وجود دارد، اگرچه تأثیرات FSP روی ویژگی‌های ریزساختاری و مکانیکی هنوز نیازمند تحقیقات بیشتری است (۴ و ۸ و ۲۵-۲۳).

بر این اساس، هدف از این مقاله استفاده از فرایند FSP برای اصلاح ریزساختار سطحی آلیاژهای هایپریوتکتیک Al-Si ۱۷٪ ریختگی است. همچنین تأثیر پارامترهای فرایند FSP نظیر سرعت چرخش و سرعت حرکت ابزار روی ریزساختار و مشخصات مکانیکی و تریبولوژیکی سطح اصلاح شده بررسی شده است.

۲. مواد و روش تحقیق

در تهیه آلیاژهای هایپریوتکتیک ریختگی Al-Si از شمش آلومینیم خالص تجاری (شرکت ایرالکو) و شمش Al-50%Si استفاده شد. ذوب در کوره مقاومتی با دمای 750°C در بوتله‌های گرافیتی انجام شد. در حین آماده‌سازی، برای حفاظت سطح مذاب از مواد گاززدا و از فلاکس پوششی (شامل سدیم، پتاسیم و کلراید) استفاده شد. دمای بار ریزی 650°C انتخاب شد، که کمی بالاتر از دمای لیکوئید و سآلیاژ Al-17%Si (612°C) بود. دمای مذاب باز هم بالاتر برده شد تا جوانه‌زنی و همگنی بهتر و بیشتری حاصل شود لذا دمای مذاب 50°C بالاتر برده شد و پس از نگاه‌داشتن در آن دما مذاب در بیرون تا دمای بار ریزی سرد شده و همچنین از ۱٪ منیزیم برای بررسی عملیات کیفی روی مذاب و تفاوت آن با شمش‌هایی که فاقد منیزیم است استفاده شد. منیزیم در یک فویل پیچیده، توسط میله‌ای از جنس فولاد زنگ‌نزن درون مذاب فرستاده و همزده شد تا کاملاً همگن شود. سپس مذاب در قالب‌های فلزی و ماسه‌ای ریخته‌گری شد. بدین منظور نمونه‌هایی صفحه‌ای شکل به وزن ۶۰۰ گرم و ابعاد $10 \times 10 \times 20$ میلی‌متر از آلیاژ ۱۷ درصد وزنی سیلیسیم در دو قالب فلزی و ماسه‌ای تهیه شد.

صفحات ریخته‌گری شده برای انجام فرایند همزن اصطکاکی کف‌تراشی شدند تا به صورت کامل روی دستگاه فرز قرار گیرند. شماتیکی از فرایند همزن اصطکاکی در شکل ۱ آمده است.



شکل ۴. مقایسه اندازه ذرات در آلیاژ Al-17%Si که (a) قالب فلزی فاقد منیزیم، (b) قالب ماسه‌ای فاقد منیزیم، (c) قالب فلزی منیزیم‌دار، (d) قالب ماسه‌ای منیزیم‌دار

اندازه ذرات Si می‌شود. به‌طور کلی افزایش زمان نگهداری مذاب باعث افزایش اندازه ذرات Si می‌شود که در اینصورت با استفاده از به‌ساز شیمیایی یعنی عامل منیزیم و همچنین تأثیر زمان می‌توان اثر مخرب Si را از بین ببرد.

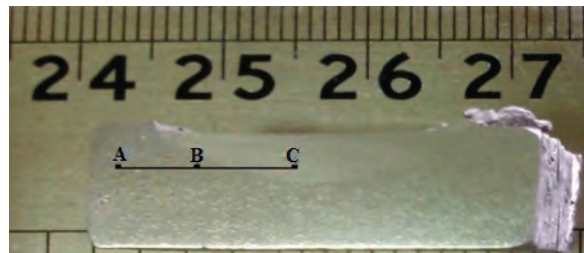
در قالب فلزی به خاطر سرعت سرد شدن سریع‌تر اجازه رشد سیلیسیم‌های اولیه کمتر داده شده‌است و ساختار آن نسبت به قالب ماسه‌ای از سیلیسیم‌هایی با اندازه کوچک‌تر تشکیل شده‌است. ولی در هر دو ساختار سیلیسیم‌های اولیه دارای مورفولوژی تیغه‌ای، گلبرگی و اشکال نامنظم با توزیع غیریکنواخت است که این در ساختار ریخته‌گری قالب ماسه‌ای واضح‌تر است.

با افزودن منیزیم مورفولوژی ذرات سیلیسیم اولیه از حالت تیغه‌ای و گلبرگی به چندوجهی منظم تبدیل شده‌است، و با افزودن Mg به مذاب ذرات Mg_2Si شروع به حل شدن کرده و اندازه Si کوچک و پراکنده می‌شود، که با کاهش دما در طول انجماد Mg_2Si به طور همگن در مذاب رسوب کرده و مکان جوانه‌زنی برای Si می‌شود و در نتیجه Si تمایل به رسوب روی سطح Mg_2Si خواهد داشت.

به طور کلی اضافه کردن منیزیم به طور آشکاری سیلیسیم اولیه را ریز می‌کند و لبه‌ها و گوشه‌های آن را از بین می‌برد که در شکل ۵ مشهود است.

در حین فرایند FSP ناحیه فرایند تحت یک تغییر شکل پلاستیکی شدید قرار می‌گیرد و یک تبلور مجدد دینامیکی در آن ایجاد می‌شود که در نتیجه ریزساختاری همگن و هم‌محور حاصل خواهد شد که منجر به ایجاد مقاومت به ضربه و استحکام مکانیکی بالاتر می‌گردد لذا فرایند FSP به ابزاری مؤثر برای بهبود ریزساختار و خواص مکانیکی ورق‌ها و قطعات ریختگی تبدیل شده‌است.

تماس ابزار در حال چرخش با سطح قطعه موجب



شکل ۳. تصویر میکروسکوپی سطح مقطع برش خورده که شامل ۳ ناحیه (A) فلز پایه (B) تحت تأثیر حرارت و (C) ناحیه همزده‌شده

برداشته شد و نمونه‌ها به ابعاد ۲۵ mm از انتهای ناحیه FSP شده انتخاب و توسط دستگاه برش جدا شد. نمونه‌ها توسط سمباده‌هایی با شماره‌های مختلف (۸۰-۸۰۰) سنباده‌زنی شدند و سپس با دستگاه پولیش به سطحی صاف و آینه‌ای رسانده شدند. ریزساختار نمونه‌ها با میکروسکوپی نوری Olympious بررسی شد.

سختی‌سنجی از نمونه‌ها با استفاده از ریزسختی‌سنج و یکرز در چند ناحیه از نمونه‌ها با نیروی اعمال شده ۱۰۰۰ gf و زمان ۱۵ s انجام شد.

۳. نتایج و بحث

در شکل ۳ برش عرضی سطح مقطع ناحیه همزده‌شده و فلز پایه قابل مشاهده است.

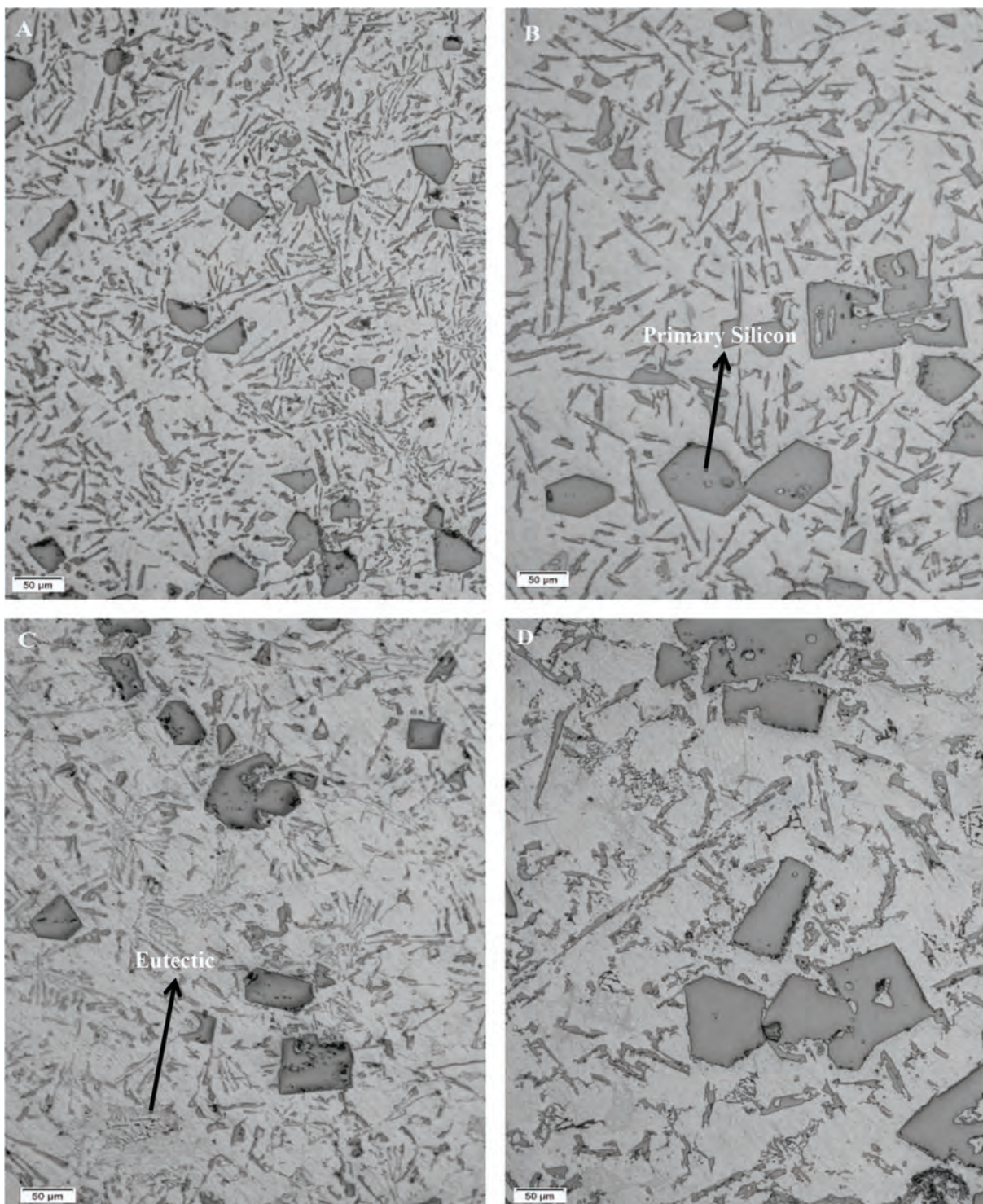
در فرایند همزن اصطکاکی تماس ابزار در حال چرخش با سطح قطعه موجب ایجاد اصطکاک و تولید حرارت می‌شود. افزایش سرعت چرخش پین و یا کاهش سرعت حرکت طولی باعث افزایش حرارت ورودی می‌شود. حرارت ورودی بالا و چرخش ابزار سبب نرم‌شوندگی فلز و تغییر شکل پلاستیک شدید و همزدن و مخلوط شدن مواد اطراف پین شده و حرکت طولی موجب می‌گردد مواد همزده‌شده از جلو پین به پشت انتقال یابد.

مشاهدات تجربی نشان داده که در سرعت چرخش ثابت، افزایش سرعت حرکت طولی، به دلیل شارش کم مواد و گرمای ورودی کم، می‌تواند سبب ایجاد حفره و ناپیوستگی شود.

بررسی ساختار

در شکل ۴ میزان کاهش اندازه متوسط ذرات رسم شده است، همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود در آلیاژ Al-17%Si ذرات سیلیسیم اولیه و تیغه‌های یوتکتیک سیلیسیم با تغییر قالب ماسه‌ای به قالب فلزی و افزودن منیزیم به آلیاژ، خرد شده که باعث بهبود خواص مکانیکی خواهد شد.

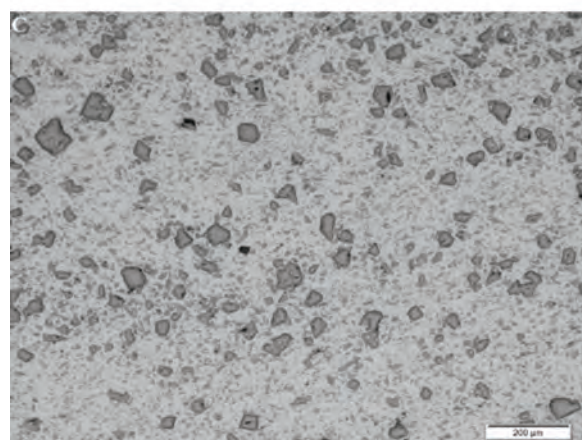
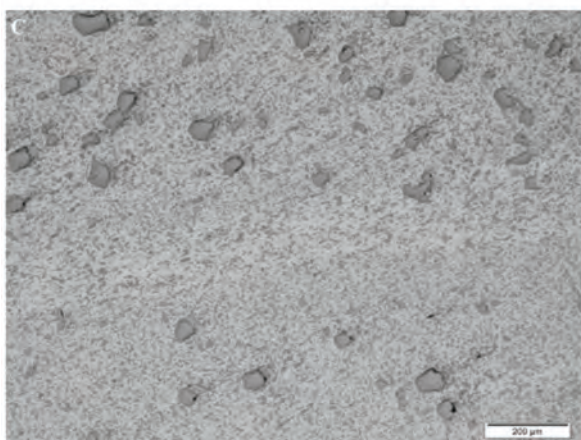
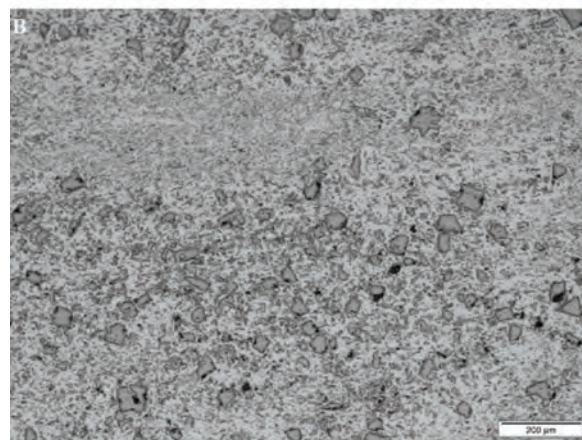
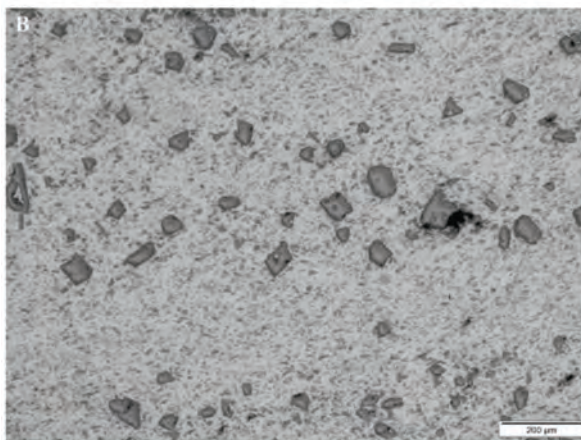
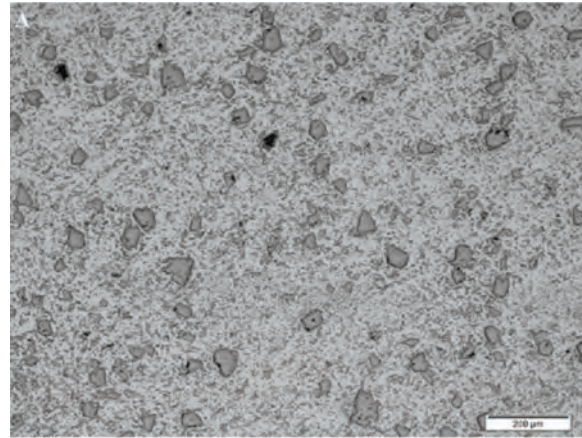
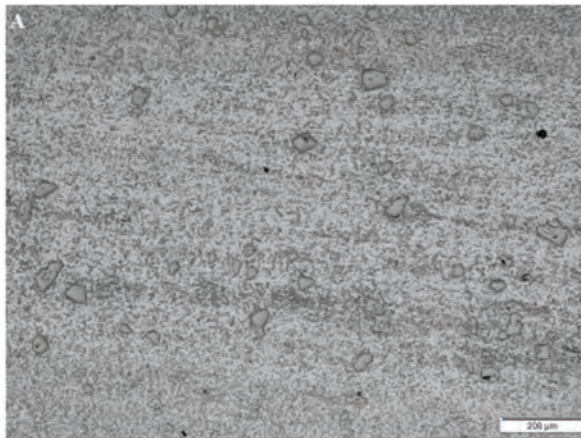
در آلیاژ فاقد به‌ساز (منیزیم) Si خیلی درشت و مورفولوژی آن نامنظم است که با افزودن منیزیم باعث تغییر ساختار و کاهش



شکل ۵. زیرساختار ریختگی آلیاژ Al-17%Si که (A) قالب فلزی فاقد منیزیم، (B) قالب ماسه‌ای فاقد منیزیم، (C) قالب فلزی دارای منیزیم، (D) قالب ماسه‌ای دارای منیزیم

حال به بررسی ریزساختار آلیاژ در دو حالت منیزیم‌دار و بدون منیزیم در سرعت‌های مختلف در دو قالب فلزی و ماسه‌ای می‌پردازیم. در شکل ۶ مشاهده می‌شود در آلیاژ Al-17/Si قالب فلزی فاقد منیزیم ذرات سیلیسیم اولیه و تیغه‌های یوتکتیک سیلیسیم در اثر انجام فرایند FSP بسیار خرد شده و به صورت یکنواخت‌تری

ایجاد اصطکاک و تولید گرما می‌شود. علاوه بر آن چرخش بین سبب می‌گردد مواد تحت تغییر شکل پلاستیک شدید قرار گرفته یا دچار کرنش بسیار شده و خرد شوند. تأثیر هم‌زمان گرما و تغییر شکل پلاستیک سبب ایجاد تبلور مجدد دینامیک و به وجود آمدن دانه‌های جدید می‌گردد.



شکل ۷. ریزساختار آلیاژ ریختگی Al-17%Si در قالب فلزی دارای منیزیم که با سرعت چرخش (الف) ۴۰۰ rpm، (ب) ۶۳۰ rpm، (ج) ۱۰۰۰ rpm، FSP شده است

شکل ۶. ریزساختار آلیاژ ریختگی Al-17%Si در قالب فلزی فاقد منیزیم که با سرعت چرخش (الف) ۴۰۰ rpm، (ب) ۶۳۰ rpm، (ج) ۱۰۰۰ rpm، FSP شده است.

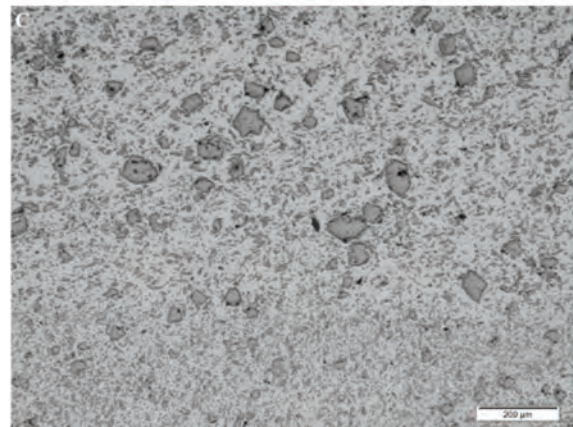
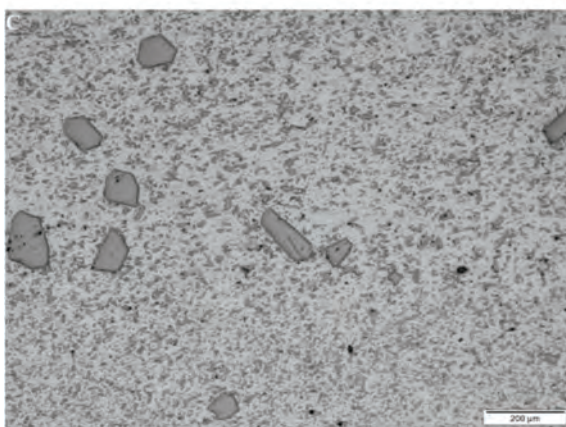
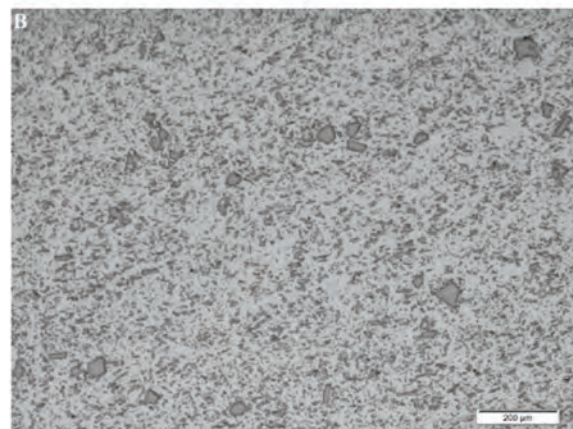
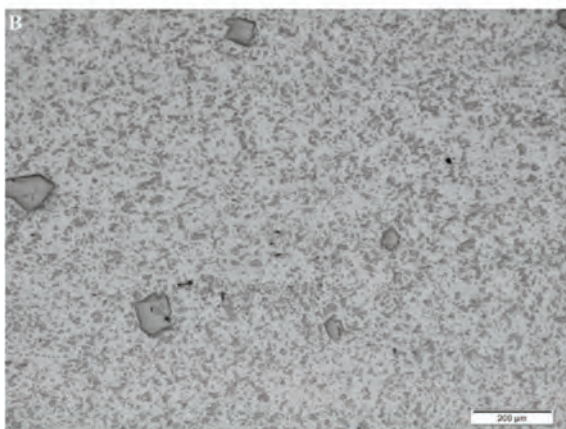
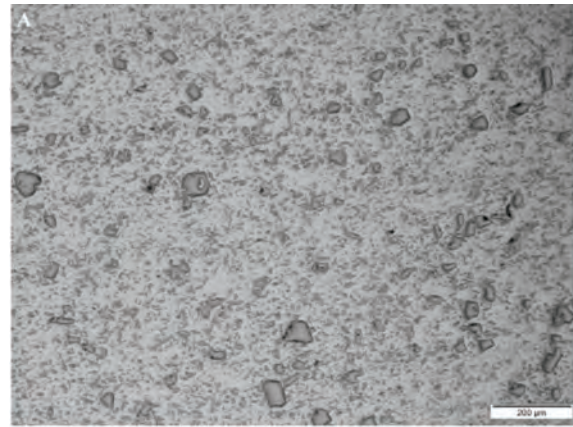
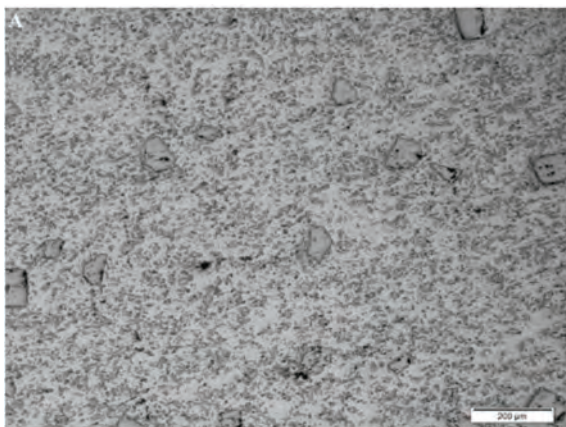
ذرات و توزیع بهتر خواهد شد و دیده می شود در سرعت ۱۰۰۰ rpm بهترین ریزداندگی حاصل شده است.

در آلیاژ Al-17%Si/Al-17%Si قالب ماسه ای فاقد منیزیم پس انجام فرایند FSP باعث شکسته شدن و خرد شدن توزیع یکنواخت ذرات اولیه سیلیسیم و ذرات تیغه ای یوتکتیک شده است که در شکل ۸ قابل مشاهده است.

طبق اطلاعات شکل ۴ می توان فهمید با افزایش سرعت

در ریزساختار توزیع شده اند که باعث بهبود خواص مکانیکی خواهد شد، اثر مخرب و تیغه ای و شکنندگی Si را از بین خواهد برد؛ این کاهش اندازه ذرات را می توان در شکل ۴ مشاهده کرد.

از شکل ۴ می توان فهمید که با افزایش سرعت چرخش در آلیاژ Al-17%Si قالب فلزی فاقد منیزیم، ذرات ریزتر شده اند و توزیع بهتری دارند، همچنین شکل ۶ و ۷ نشان می دهند که اضافه کردن منیزیم به این آلیاژ باعث کاهش بیشتر اندازه



شکل ۹. ریزساختار آلیاژ ریختگی Al-17%Si در قالب ماسه‌ای دارای منیزیم که با سرعت چرخش (الف) ۴۰۰ rpm، (ب) ۶۳۰ rpm، (ج) ۶۳۰ rpm، FSP شده‌است.

شکل ۸. ریزساختار آلیاژ ریختگی Al-17%Si در قالب ماسه‌ای فاقد منیزیم که با سرعت چرخش (الف) ۴۰۰ rpm، (ب) ۶۳۰ rpm، (ج) ۱۰۰۰ rpm، FSP شده‌است.

سختی آلیاژ Al-17%Si با تغییر قالب ماسه‌ای به قالب فلزی به ترتیب از HV ۵۲ به HV ۵۳ و با افزودن منیزیم به ترتیب از ۶۱ HV به ۶۳ HV افزایش می‌یابد زیرا در قالب فلزی سرعت سرد شدن بالاتر است که باعث توزیع یکنواخت‌تر و کوچک‌تر شدن اندازه ذرات سیلیسیم اولیه می‌شود، همچنین منیزیم به دلیل اصلاح ساختار سیلیسیم اولیه و یوتکتیک از حالت تیغه‌ای به حالت چندوجهی منظم باعث افزایش سختی می‌شود.

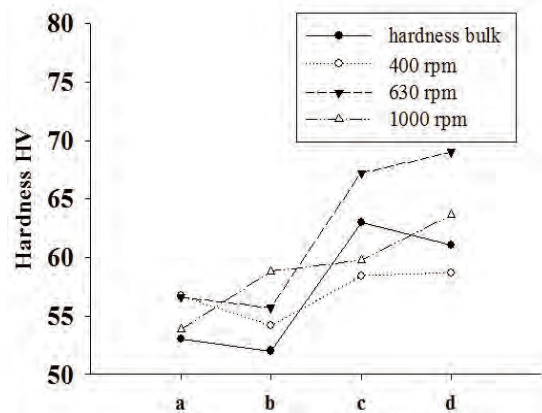
چرخش بین ذرات ریزتر شده‌اند. افزودن منیزیم به آلیاژ Al-17%Si قالب ماسه‌ای همچنین، طبق اطلاعات شکل ۴ تأثیری در کاهش اندازه ذرات سیلیسیم اولیه و تیغه‌های یوتکتیک در اثر انجام فرایند FSP ندارد و بیشتر باعث یکنواختی در توزیع ذرات شده است که در شکل ۹ قابل مشاهده است.

بررسی سختی

شکل ۱۰ نشان‌دهنده میزان سختی آلیاژ مورد بررسی است.

References

- [1] Kapranos P, Kirkwood D, Atkinson H, Rheinlander J, Bentzen J, Toft P, et al. Thixoforming of an automotive part in A390 hypereutectic Al-Si alloy. *Journal of Materials Processing Technology*. 2003;135(2):271-7.
- [2] Lee E-S. A Study on the Economics of Hypereutectic Aluminum-Silicon (Al-Si) Alloy Machining. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2000;16(10):700-8.
- [3] Mahmoud T, Mohamed S. Improvement of microstructural, mechanical and tribological characteristics of A413 cast Al alloys using friction stir processing. *Materials Science and Engineering: A*. 2012;558:502-9.
- [4] Mahmoud T, Shaban O, Zakaria H, Khalifa T. On effect of FSP on microstructural and mechanical characteristics of A390 hypereutectic Al-Si alloy. *Materials Science and Technology*. 2010;26(9):1120-4.
- [5] Xu C, Yang Y, Wang H, Jiang Q. Effects of modification and heat-treatment on the abrasive wear behavior of hypereutectic Al-Si alloys. *Journal of materials science*. 2007;42(15):6331-8.
- [6] Zuo M, Liu X, Sun Q. Effects of processing parameters on the refinement of primary Si in A390 alloys with a new Al-Si-P master alloy. *Journal of Materials science*. 2009;44(8):1952-8.
- [7] Avedesian MM, Baker H. *ASM specialty handbook: magnesium and magnesium alloys*: ASM international; 1999.
- [8] Rao A, Rao B, Deshmukh V, Shah A, Kashyap B. Microstructural refinement of a cast hypereutectic Al-30Si alloy by friction stir processing. *Materials Letters*. 2009;63(30):2628-30.
- [9] Shi W, Gao B, Tu G, Li S. Effect of Nd on microstructure and wear resistance of hypereutectic Al-20% Si alloy. *Journal of Alloys and Compounds*. 2010;508(2):480-5.
- [10] Stefanescu DM, Ruxanda R. *Solidification structures of steels and cast irons*. *Metallography and Microstructures*, ASM Handbook. 2004:97-106.
- [11] Xu C, Wang H, Yang Y, Wang H-Y, Jiang Q. Effect of La 2 O 3 in the Al-P-Ti-TiC-La 2 O 3 modifier on primary silicon in hypereutectic Al-Si alloys. *Journal of alloys and compounds*. 2006;421(1):128-32.
- [12] Mahmoud T. Surface modification of A390 hypereutectic Al-Si cast alloys using friction stir processing. *Surface and Coatings Technology*. 2013;228:209-20.
- [13] Lienert T, Mishra R, Mahoney M. *Friction Stir Welding and Processing*. ASM International, Materials Park, OH. 2007:123-54.
- [14] Mishra RS, Ma Z. *Friction stir welding and processing*. *Materials Science and Engineering: R: Reports*. 2005;50(1):1-78.
- [15] Baruch LJ, Raju R, Balasubramanian V, Rao A, Dinaharan I. Influence of Multi-pass Friction Stir Processing on Microstructure and Mechanical Properties of DieCast Al-7Si-3Cu Aluminum Alloy. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*. 2016;29(5):431-40.
- [16] Elangovan K, Balasubramanian V. Influences of tool pin profile and tool shoulder diameter on the formation of friction stir processing zone in AA6061 aluminium alloy. *Materials & design*. 2008;29(2):362-73.
- [17] Karthikeyan L, Senthilkumar V, Padmanabhan K. On the role of process variables in the friction stir processing of cast aluminum A319 alloy. *Materials & Design*. 2010;31(2):761-71.



شکل 10. مقایسه میزان سختی آلیاژ Al-17%Si که قالب فلزی فاقد منیزیم، قالب ماسه‌ای فاقد منیزیم، قالب فلزی منیزیم دار، قالب ماسه‌ای منیزیم‌دار

سختی ناحیه FSP شده نسبت به ناحیه ریخته‌گری شده با افزایش سرعت چرخش افزایش یافته است که دلیل آن کاهش اندازه و افزایش پراکندگی ذرات سیلیسیم و تغییر ساختار تیغه‌ای به چندوجهی است. با افزایش سرعت چرخش باعث افزایش دما به صورت موضعی در ناحیه FSP شده خواهد شد، که این امر باعث امکان حل رسوبات تشکیل شده شود که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود با افزایش سرعت چرخش از ۶۳۰ rpm به ۱۰۰۰ rpm سختی کاهش یافته است.

۴. نتیجه‌گیری

- ۱- ریخته‌گری در قالب فلزی با سرعت سرد شدن سریع‌تر نسبت به قالب ماسه‌ای، موجب ریز شدن سیلیسیم اولیه شده، ولی تغییر زیادی در مورفولوژی سیلیسیم اولیه صورت نمی‌گیرد.
- ۲- افزودن ۱٪ منیزیم موجب ریز شدن سیلیسیم اولیه و تغییر مورفولوژی آن از حالت تیغه‌ای و گلبندی به چندوجهی منظم می‌شود.
- ۳- افزودن ۱٪ منیزیم سختی آلیاژ را به مقدار اندکی افزایش می‌دهد. اصلاح مورفولوژی سیلیسیم اولیه و ریز شدن آن، باعث افزایش سختی آلیاژهای هایپر یوتکتیک می‌شود و اصلاح هر دو فاز سیلیسیم اولیه و یوتکتیک مقادیر سختی را بسیار افزایش می‌دهد.
- ۴- با انجام فرایند همزن اصطکاکی مورفولوژی سیلیسیم به صورت قابل ملاحظه‌ای بهبود یافته (خرد شدن تیغه‌های سیلیسیم) و اندازه ذرات سیلیسیم اولیه و یوتکتیک بسیار ریز می‌شوند. سرعت چرخش ۱۰۰۰ rpm باعث بیشترین ریز شونده‌گی ذرات سیلیسیم می‌شود.
- ۵- سختی آلیاژ هایپر یوتکتیک Al-Si در اثر انجام فرایند همزن اصطکاکی به دلیل کاهش اندازه و افزایش پراکندگی ذرات سیلیسیم و تغییر ساختار تیغه‌ای به چندوجهی افزایش یافته است.

- [18] Ma Z, Sharma S, Mishra R. Effect of friction stir processing on the microstructure of cast A356 aluminum. *Materials Science and Engineering: A*. 2006;433(1):269-78.
- [19] Ma Z, Sharma SR, Mishra RS. Effect of multiple-pass friction stir processing on microstructure and tensile properties of a cast aluminum-silicon alloy. *Scripta materialia*. 2006;54(9):1623-6.
- [20] Nakata K, Kim Y, Fujii H, Tsumura T, Komazaki T. Improvement of mechanical properties of aluminum die casting alloy by multi-pass friction stir processing. *Materials Science and Engineering: A*. 2006;437(2):274-80.
- [21] Tsai F, Kao P. Improvement of mechanical properties of a cast Al-Si base alloy by friction stir processing. *Materials Letters*. 2012;80:40-2.
- [22] Yadav D, Bauri R. Microstructural characterisation of friction stir processed aluminium. *Materials Science and Technology*. 2011;27(7):1163-9.
- [23] Aktarer S, Sekban D, Yanar H, Purçek G, editors. Effect of friction stir processing on tribological properties of Al-Si alloys. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*; 2017: IOP Publishing.
- [24] Baruch LJ, Raju R, Balasubramanian V. Effect of tool pin profile on microstructure and hardness of friction stir processed aluminum die casting alloy. *Eur J Scientific Research*. 2012;70(3):373-85.
- [25] Hossain ME. The current and future trends of composite materials: an experimental study. *Journal of Composite Materials*. 2011;45(20):2133-44.