



بررسی تاثیر فرایند اصطکاکی اغتشاشی و افزایش سرعت چرخش ابزار بر خواص تریبولوژیکی و بهبود مقاومت سایشی آلیاژ آلومینیوم ریختگی A413

محمد سفید کارد ز فولی¹، مرتضی شمعیان²

¹ دانشجوی کارشناسی ارشد انتخاب و شناسایی مواد، دانشکده مواد، دانشگاه بزد

² استاد دانشکده مهندسی مواد دانشگاه صنعتی اصفهان

چکیده

فرایند اصطکاکی اغتشاشی به عنوان روشی جدید برای ساخت کامپوزیت‌های سطحی و بهبود خواص سطحی مطرح است که از جمله مزایای آن می‌توان به توزیع یکنواخت ذرات تقویت کننده و اصلاح ریزساختار اشاره نمود که می‌تواند به عنوان یک فرایند اصلاح ریزساختار و بهبود خواص مطرح باشد. در این پژوهش به منظور بهبود خواص تریبولوژیکی آلومینیوم A413 ریختگی از فرایند اصطکاکی اغتشاشی استفاده شد. فرایند در سه سرعت چرخشی 500، 800 و 1000 rpm و سرعت پیشروی 25 mm/min انجام گرفت. بررسی ریزساختار در مقایسه با فلز پایه نشان می‌دهد که انجام این فرایند سبب خرد شدن تیغه‌های سیلیسیم، حذف تخلخل و خرد شدن آلومینیوم α اولیه می‌شود و افزایش سرعت چرخشی سبب افزایش سختی و افزایش مقاومت به سایش می‌شود. ارزیابی رفتار سایشی بهبود مقاومت سایشی را در نمونه‌های فرایند شده نسبت به آلیاژ پایه نشان داد و بهترین مقاومت سایشی در نمونه فرایند شده در سرعت چرخشی 1000 rpm حاصل شد که به علت سختی بیشتر و اصلاح موثرتر ریزساختار بود.

واژه‌های کلیدی: فرآیند اصطکاکی اغتشاشی؛ سرعت چرخش ابزار؛ آلومینیوم A413 ریختگی؛ سختی؛ مقاومت سایشی.

¹ S.roushsefidkar@yahoo.com



مقدمه

آلیاژهای آلومینیوم-سیسیسیم ریختگی A413 به دلایل مختلفی از جمله مقاومت به خوردگی بالا، قابلیت ریخته‌گری بسیار خوب و پایداری ابعادی، به طور گسترده در صنایع دریایی و خودرو سازی مورد استفاده قرار می‌گیرند. عمده موارد استفاده از این آلیاژ در قطعات موتور، نظیر میله‌های اتصال دهنده، پیستون‌ها و مانیفولدهای آب می‌باشد. با تمام مزایایی که از این آلیاژ ذکر شد، نواقصی نیز دارد که می‌توان به تخلخل و اندازه تیغه‌های Si بزرگ که در بسیاری از موارد، کاربرد آن‌ها را با محدودیت رو به رو می‌سازد، اشاره کرد [1]. فرایند اصطکاک‌ی اغتشاشی می‌تواند به عنوان گزینه‌ی مناسبی برای رفع این نواقص و ایجاد ساختاری یکنواخت مطرح باشد. جوشکاری اصطکاک‌ی اغتشاشی توسط مرکز تحقیقات جوش انگلستان² (TWI) در سال 1991 به عنوان تکنیک اتصال حالت جامد اختراع شد و در ابتدا برای آلیاژهای آلومینیوم مورد استفاده قرار گرفت. فرایند اصطکاک‌ی اغتشاشی³ (FSP) به عنوان ابزاری برای اصلاح ریزساختار بر مبنای اصول جوشکاری اصطکاک‌ی اغتشاشی⁴ (FSW) توسعه یافته است [2]. این فرایند مشابه جوشکاری اصطکاک‌ی اغتشاشی انجام میشود. به این ترتیب که ابزار غیر مصرفی در حال چرخش با طراحی خاص و شامل برآمدگی⁵ و شانه⁶ در محل فصل مشترک دو قطعه وارد شده و در امتداد خط اتصال پیش‌روی می‌کند. اصطکاک بین شانه و قطعه کار منجر به ایجاد حرارت و افزایش دمای قطعه کار به طور موضعی می‌شود که ماده می‌تواند به آسانی تحت تغییر شکل پلاستیک قرار گیرد. در حین پیش‌روی ابزار در حال چرخش در امتداد خط اتصال ماده در اطراف ابزار اکستروود می‌شود و فرایند فورج توسط نیروی محوری صورت می‌پذیرد. شمایی از فرایند اصطکاک‌ی اغتشاشی در شکل نشان داده شده است.

ریز ساختار حاصل از فرایند اصطکاک‌ی اغتشاشی شامل سه منطقه می‌باشد: منطقه متأثر از حرارت (HAZ)، منطقه تحت اثر حرارت و مکانیکی (TMAZ) و منطقه اغتشاشی (SZ). نتیجه‌ی تغییر شکل پلاستیک شدید در دمای بالا، حصول اندازه دانه‌ای در محدوده‌ی 0/8 تا 12 میکرومتر است [3 و 4]. فرایند اصطکاک‌ی اغتشاشی می‌تواند سبب خرد شدن ذرات Si، توزیع یکنواخت آن‌ها، خرد شدن دندریته‌های اولیه‌ی آلومینیوم و حذف تخلخل در آلیاژهای آلومینیوم ریختگی شود. پارامترهای فرایند و هندسه‌ی ابزار تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر ساختار نهایی و خواص مکانیکی دارند. مهم‌ترین پارامترهای فرایند، سرعت چرخش و سرعت پیش‌روی ابزار می‌باشد. سرعت چرخش ابزار و سرعت پیش‌روی تأثیر قابل ملاحظه‌ای در میزان حرارت ورودی و خواص مکانیکی دارند [5-8].

علیدخت و همکاران [6] تأثیر سرعت چرخش ابزار در فرایند اصطکاک‌ی اغتشاشی را روی ریزساختار و خواص سایشی آلیاژ آلومینیوم ریختگی A356 بررسی کردند. این محققان در یک سرعت پیش‌روی ثابت از سه سرعت چرخش استفاده نمودند و به این نتیجه دست یافتند که طی فرایند اصطکاک‌ی اغتشاشی مقاومت به سایش بهتر می‌شود که به اصلاح مورفولوژی و توزیع ذرات Si، اصلاح دانه‌ها و افزایش سختی نسبت داده می‌شود. این محققان همچنین باین نتیجه رسیدند که افزایش سرعت چرخش ابزار تأثیر بیشتر و بهتری روی اصلاح ریز ساختار آلیاژ آلومینیوم ریختگی A356 و افزایش مقاومت به سایش این آلیاژ دارد و تفاوت در مقاومت به سایش نمونه‌ها بیانگر تفاوت سرعت چرخش ابزار می‌باشد اما پارامترهای فرایند تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر روی اندازه دانه‌ی آلومینیوم زمینه نشان نداد.

نتایج تحقیقات محمود و همکاران [5] تأثیر فرایند اصطکاک‌ی اغتشاشی را بر روی ریز ساختار و مشخصات مکانیکی آلیاژ آلومینیوم ریختگی A390 مورد بررسی قرار دادند. این محققان تأثیر سرعت چرخش ابزار، سرعت پیش‌روی و

² The Welding Institute

³ Friction stir processing

⁴ Friction stir welding

⁵ Pin

⁶ shoulder

همچنین تعداد پاس‌ها را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که با کاهش سرعت چرخش ابزار، افزایش سرعت پیشروی و افزایش تعداد پاس‌ها اندازه‌ی ذرات Si کاهش می‌یابد.

در پژوهش دیگری ما و همکاران [7] تأثیر فرایند اصطکاکی اغتشاشی را بر روی ریز ساختار و مشخصات مکانیکی آلیاژ آلومینیوم ریختگی A356 مورد بررسی قرار دادند. این محققان نشان دادند که سرعت چرخش ابزار بیشتر ساختار همگن تری را ایجاد می‌کند. در سرعت چرخش ابزار پایین ساختار نواری مشخص به همراه ذرات درشت با دانسیته کم در منطقه فرایند شده قابل رویت است. این محققان باین نتیجه رسیدند که فرایند اصطکاکی اغتشاشی باعث پاره شدن و شکستن تیغه‌های Si و دندریت‌های آلومینیوم شده و همچنین توزیع مناسب ذرات Si در زمینه آلومینیوم را به دنبال داشته ولی تأثیر قابل توجهی روی اندازه دانه‌ها نداشته. هدف از پژوهش حاضر، بررسی تأثیر سرعت چرخش ابزار بر ریزساختار، سختی و رفتار سایشی آلیاژ آلومینیوم ریختگی A413 است. لذا به بررسی ماکرو و ریز ساختار و همچنین ارزیابی سختی و رفتار سایشی نمونه‌های فرایند شده در سرعت‌های چرخش ابزار متفاوت پرداخته خواهد شد.

مواد و روش تحقیق

در این پژوهش، آلیاژ Al-Si ریختگی A413 نزدیک به نقطه‌ی یوتکتیک تحت فرایند اصطکاکی اغتشاشی قرار گرفت. ترکیب شیمیایی این آلیاژ شامل: $0/11/9$ Si، $0/0/6$ Fe، $0/0/45$ Zn، $0/0/19$ Cu، $0/0/12$ Mg، $0/0/03$ Ti است. ورقه‌های به ضخامت 10 mm و طول و عرض، 100 و 50 mm از شمش این آلیاژ تهیه شدند. یک پاس فرایند اصطکاکی اغتشاشی با استفاده از دستگاه فرز بر روی ورقه‌های تهیه شده، با سرعت‌های پیشروی متفاوت انجام شد. ابزار مورد استفاده از جنس فولاد ابزار H-13 سخت شده با قطر شانه‌ی 15 mm و طول و قطر برآمدگی به ترتیب 3 mm و 6 mm بود. شکل برآمدگی ابزار به طور معمول به صورت استوانه یا مخروط، همراه با رزوه یا بدون رزوه است. در این پژوهش از برآمدگی استوانه‌ای رزوه‌دار استفاده شد. فرایند اصطکاکی اغتشاشی در سرعت پیشروی ابزار 25 mm/min و سرعت‌های چرخش ابزار 500 ، 800 و 1000 rpm با زاویه‌ی انحراف 3° ، بین محور دستگاه و نرمال صفحه انجام شد.

نمونه‌ها در جهت عمود بر مسیر FSP برش داده شدند و به منظور بررسی‌های ساختاری، پس از پالایش مکانیکی، با استفاده از محلول کلر (با ترکیب 1 میلی لیتر هیدروکلریک اسید، $1/5$ میلی لیتر هیدروکلریک اسید، $2/5$ میلی لیتر نیتریک اسید و 95 میلی لیتر آب) عملیات اچ انجام شد. مشخصات ماکرو و ریز ساختاری نمونه‌های FSP شده مورد بررسی قرار گرفت. به منظور ارزیابی سختی نمونه‌های FSP شده، از آزمایش سختی سنجی برینل با اعمال بار $31/25$ kg برای مدت 10 ثانیه استفاده شد.

به منظور ارزیابی رفتار سایشی نمونه‌ها از دستگاه سایش رفت و برگشتی استفاده شد. آزمون سایش در بار اعمالی 10 نیوتن و مسافت لغزشی 2000 متر انجام گرفت. نمونه‌ها با سرعت خطی ثابت $0/14$ متر بر ثانیه در تماس با سطح مقابل (فولاد 52100 با سختی 64 راکول سی) که به صورت ثابت بود، در یک دامنه 8 سانتیمتری حرکت رفت و برگشتی داشتند. آزمایش‌ها در شرایط دمای محیط و میزان رطوبت 25 تا 35 درصد انجام گرفت. کاهش وزن نمونه‌ها با دقت $0/1$ میلی گرم در فواصل لغزشی معین اندازه‌گیری شد. نمونه‌های مربوط به فلز پایه و نمونه‌های فرایند شده در سرعت‌های چرخشی متفاوت تحت آزمون سایش قرار گرفتند.

نتایج و بحث

در شکل 2 تصویر میکروسکوپ نوری از فلز پایه با بزرگنمایی 200 برابر آورده شده است. ریز ساختار مربوط به آلیاژ آلومینیوم ریختگی A413 را نشان می‌دهد. ریز ساختار این آلیاژ شامل تیغه‌های سیلیسیم توزیع شده در امتداد دندریتهای α -Al می‌باشد. همان گونه که در شکل نیز قابل ملاحظه است، توزیع تیغه‌های سیلیسیم در آلیاژ پایه به صورت ناهمگن و غیر یکنواخت می‌باشد. همچنین وجود حفرات و ساختار دندریتی در آلیاژ پایه قابل مشاهده است.

در شکل 3 تصویر میکروسکوپ نوری مربوط به فصل مشترک منطقه‌ی اغتشاشی با فلز پایه در سمت پیشران، برای نمونه‌ی فراوری شده با پارامترهای $1000 \text{ rpm} - 25 \text{ mm/min}$ ، در شکل نشان داده شده است. همان گونه که ملاحظه می‌شود، با حرکت به سمت منطقه‌ی اغتشاشی از فلز پایه، تغییر ناگهانی از لحاظ ریز ساختاری ایجاد می‌شود. قابل ملاحظه است که انجام فرایند اصطکاکی اغتشاشی سبب حذف تخلخل، خرد شدن تیغه‌های Si، توزیع مناسب و نسبتاً یکنواخت ذرات Si در زمینه، همچنین خرد شدن دندریت‌های آلومینیوم اولیه و بطور کلی اصلاح ریز ساختار می‌شود.

شکل 4 تصاویر میکروسکوپ الکترونی ریز ساختارهای مربوط به منطقه‌ی اغتشاشی در نمونه‌های FSP شده با پارامترهای $800, 500 \text{ rpm} - 25 \text{ mm/min}$ و 1000 را در مقایسه با فلز پایه نشان می‌دهد. بر اثر انجام فرایند، خرد شدن دندریت‌های $\alpha\text{-Al}$ ، حذف تخلخل و خرد شدن تیغه‌های Si اتفاق می‌افتد و در مجموع ریز ساختار یکنواخت‌تری نسبت به آلیاژ ریختگی حاصل می‌شود. حذف تیغه‌های درشت سیلیسیم با توزیع غیر یکنواخت در آلیاژ پایه، به سبب اغتشاش شدید در حین فرایند می‌باشد. حرارت موضعی ایجاد شده بر اثر اصطکاک و تغییر شکل پلاستیک، سیلان ماده در حین فرایند را تسهیل می‌کند. در سرعت چرخش بیشتر به دلیل ایجاد حرارت موضعی بالاتر و اعمال تنش برشی بیشتر، سیلان ماده راحت‌تر صورت گرفته، لذا خرد شدن تیغه‌های Si در این حالت بیشتر اتفاق می‌افتد. به طور واضح قابل ملاحظه است که خطوط و نقاط سفید رنگ که نشانگر ذرات Si هستند با افزایش سرعت چرخش ابزار، بطور یکنواخت‌تر و بهتر در منطقه‌ی اغتشاش یافته توزیع شده‌اند، زیرا تیغه‌های Si با افزایش سرعت چرخش ابزار بیشتر خرد می‌شوند، به ذرات ریزتری تبدیل می‌شوند و به دلیل شرایط سیلان مناسب‌تر بطور یکنواخت‌تر توزیع می‌شوند. در سطح فلز پایه تیغه‌های سیلیسی که خردایش آنها باعث افزایش سختی و مقاومت به سایش نمونه‌ها می‌شد بطور سالم و خرد نشده مشاهده می‌شود. از مقایسه‌ی تصویر فلز پایه با تصویر نمونه‌ها می‌توان به خردایش و تغییر اندازه محسوس و توزیع تیغه‌های سیلیسی پی برد. پراکتدگی و توزیع غیر یکنواخت و اندازه‌ی بزرگ و شکل به هم پیوسته‌ی این تیغه‌ها سبب می‌شود که نمونه‌های فلز پایه نسبت به نمونه‌های فرایند شده دارای سختی و مقاومت به سایش کمتری باشند.

شکل 5 مقادیر سختی مربوط به آلیاژ آلومینیوم ریختگی A413 و نمونه‌های FSP شده در سرعت‌های چرخش ابزار متفاوت در شکل 5 نشان داده شده است. همان گونه که ملاحظه می‌شود، با انجام فرایند اصطکاکی اغتشاشی میزان سختی بهبود می‌یابد. همچنین با افزایش سرعت چرخش ابزار، افزایش بیش‌تری در میزان سختی ملاحظه می‌شود. با انجام فرایند اصطکاکی اغتشاشی به سبب اصلاح ریز ساختار و حذف نواقص، سختی نسبت به آلیاژ ریختگی افزایش می‌یابد. افزایش میزان سختی با افزایش سرعت چرخش ابزار می‌تواند به دلیل افزایش تنش برشی اعمالی و در نتیجه خرد شدن بیش‌تر تیغه‌های Si و توزیع یکنواخت‌تر آن‌ها در زمینه باشد.

در شکل 6 که کاهش وزن نمونه‌ها بر حسب مسافتی که تحت لغزش و سایش قرار گرفته‌اند آورده شده است ملاحظه می‌شود که با افزایش مسافت لغزش از مقدار کاهش وزن کاسته می‌شود و هرچه به پایان مسافت نزدیک‌تر می‌شویم نمونه‌ها به حالتی نسبتاً پایدار می‌رسند و از وابستگی میزان کاهش وزن به مسافت لغزش کاسته می‌شود. ملاحظه می‌شود که آلیاژ ریختگی A413 در مسافت یکسانی از لغزش نسبت به هر سه نمونه‌ی فرایند شده کاهش وزن بیشتری داشته و در نمونه‌های فرایند شده نیز با افزایش سرعت چرخش ابزار، مقاومت به سایش افزایش داشته که این امر می‌تواند بدلیل تأثیری که فرایند اصطکاکی اغتشاشی بر اصلاح ریز ساختار، حذف تخلخل‌ها، توزیع یکنواخت ذرات Si و یکنواخت‌تر شدن ساختار در منطقه‌ی ناگت می‌گذارد، باشد. هم‌چنین با افزایش سرعت چرخش ابزار، حرارت ورودی و تنش برشی اعمالی به قطعه و سختی افزایش می‌یابد و تقریباً تمامی تأثیرات فرایند اصطکاکی اغتشاشی با

افزایش سرعت چرخش ابزار تشدید می شوند که با توجه به نمودار زیر به وضوح این تاثیرات در افزایش مقاومت به سایش نمونه ها مشهود است.

در شکل 7 که تصاویر میکروسکوپ الکترونی از مسیر سایش نمونه ها در سرعت های چرخش ابزار 800، 500 و 1000rpm و فلز پایه را نشان می دهد. با مقایسه ی مسیر سایش فلز پایه با نمونه هایی که تحت فرایند اصطکاکی اغتشاشی قرار گرفتند می توان به این نتیجه رسید که فرایند اصطکاکی اغتشاشی باعث افزایش قابل ملاحظه ی مقاومت به سایش نمونه ها شده که به دلیل خرد شدن تیغه های سیلس در حین فرایند و توزیع یکنواخت آنها در سطح منطقه ی اغتشاش یافته شده و در نمونه های فرایند شده نیز با افزایش سرعت چرخش ابزار شرایط برای خردایش و سیلان تیغه های سیلس بهتر شده، در نتیجه توزیع یکنواخت تری دارند و باعث افزایش مقاومت به سایش می شوند.

نتیجه گیری

- 1- فرایند اصطکاکی اغتشاشی می تواند به عنوان گزینه مناسبی برای رفع نواقص در قطعات ریختگی مطرح باشد.
- 2- انجام فرایند اصطکاکی اغتشاشی سبب خرد شدن تیغه های سیلیسیم، حذف تخلخل و خرد شدن ساختار دندردینی آلیاژ ریختگی A413 می شود.
- 3- فرایند اصطکاکی اغتشاشی سبب بهبود سختی و مقاومت سایشی آلیاژ A413 می شود و افزایش سرعت چرخش ابزار نشان داد که میزان سختی در منطقه اغتشاشی بهبود می یابد.
- 4- با افزایش سرعت چرخش ابزار در فرایند اصطکاکی اغتشاشی اصلاح ریز ساختار بطور موثرتر و همچنین افزایش سختی و افزایش مقاومت به سایش به مقدار بیشتری مشاهده می شود.

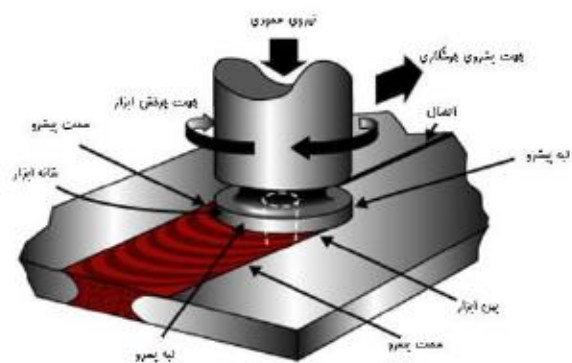
تشکر و قدردانی

وظیفه خود میدانم در این جا از همکاری ها و مساعدت های بی دریغ جناب دکتر مرتضی شمعیان، استاد برجسته ی دانشکده مهندسی مواد دانشگاه صنعتی اصفهان که با حمایت های بی دریغ خود پیشبرد این پژوهش را میسر ساختند کمال تشکر و قدردانی را انجام دهم.

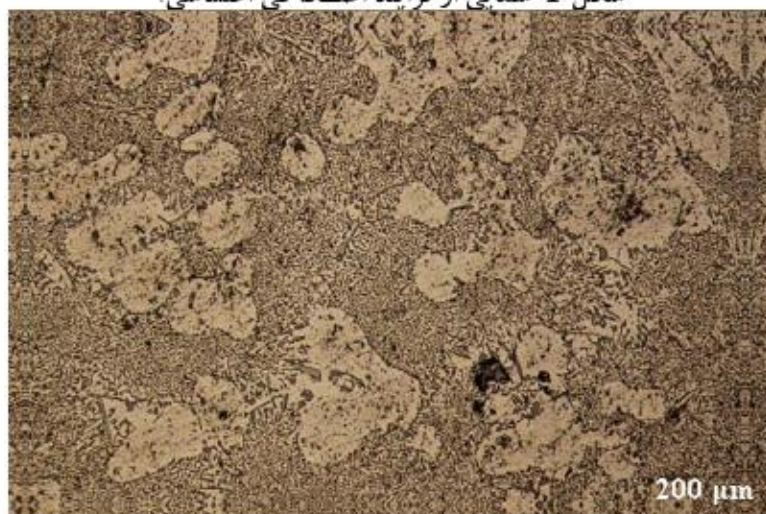
مراجع

1. Mahmoud T S, and Mohamed S S, "Improvement of microstructural, mechanical and tribological characteristics of A413 cast Al alloys using friction stir processing", Mater Sci Eng A, 32 (2012) 1-8.
2. Wang Y and Mishra R S, "Finite element simulation of selective superplastic forming of friction stir processed 7075 Al alloy", Materials Science and Engineering A, 463, 2007, 245-248.
3. Sua J Q, Nelson T W and Sterling C J, "Microstructure evolution during FSW/FSP of high strength aluminum alloys", Materials Science and Engineering A, 405, 2005, 277-286.
4. Ma YZ, Mishra R S and Mahoney M W, "Superplastic deformation behaviour of friction stir processed 7075Al alloy", Acta Materialia, 50, 2002, 4419-4430.
5. Mahmoud T S, Shaban O M, Zakaria H and Khalifa T A, "On effect of FSP on microstructural and mechanical characteristics of A390 hypereutectic Al-Si alloy", [Materials Science and Technology](#), 26, 2010, 1120-1124.
6. Alidokht S A, Abdollah-zadeh A, Soleymani S, Saeid T and Assadi H, "Evaluation of microstructure and wear behavior of friction stir processed cast aluminum alloy", Materials Characterization, 63, 2012, 90-97.
7. Ma Z Y, Sharma S R and Mishra R S, "[Friction stir welding and processing](#)", Materials Science and Engineering A, 433, 2006, 269-278.

8. Karthikeyan L, Senthilkumar V S and Padmanabhan K A, " On the role of process variables in the friction stir processing of cast aluminum A319 alloy", [Materials and Design](#), 31, 2010, 761-771.



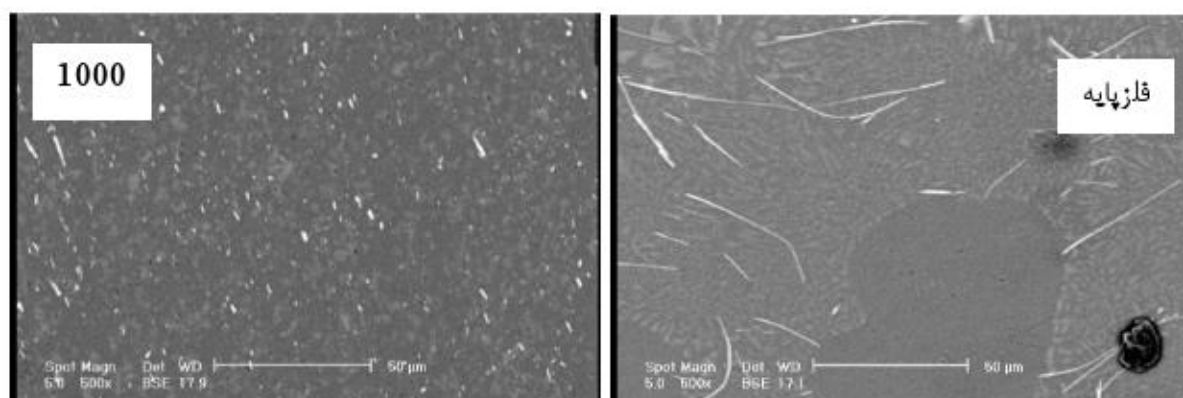
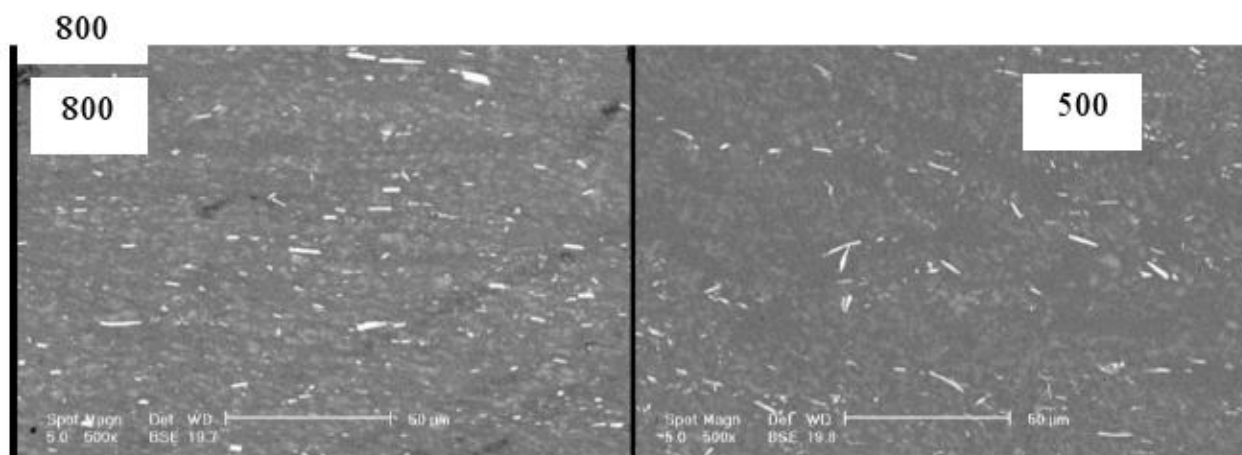
شکل 1- شمایی از فرایند اصطکاکی اغتشاشی.



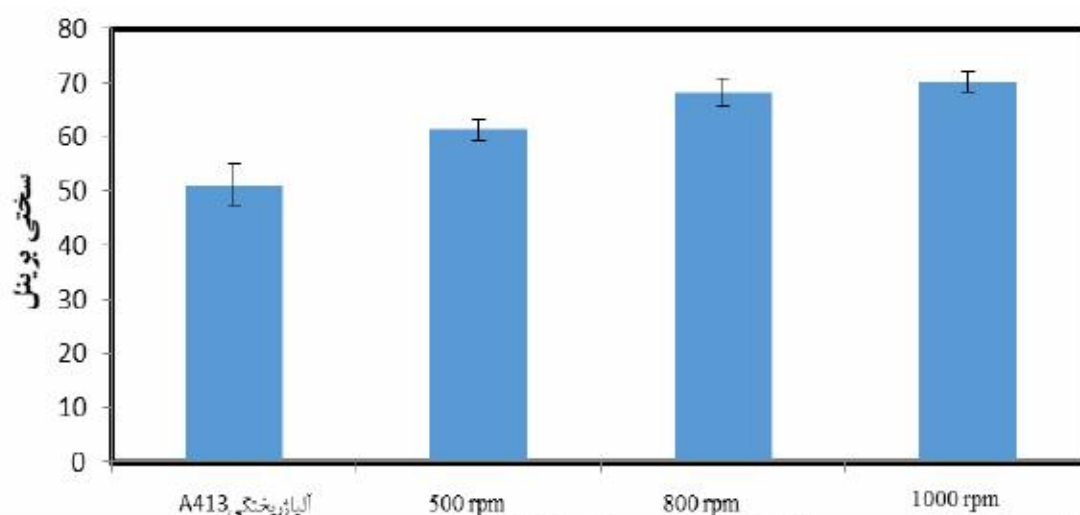
شکل 2- تصویر میکروسکوپ نوری مربوط به ریز ساختار آلیاژ آلومینیم ریختگی A413.



شکل 3- تصویر مربوط به فصل مشترک منطقه‌ی اغتشاشی با فلز پایه

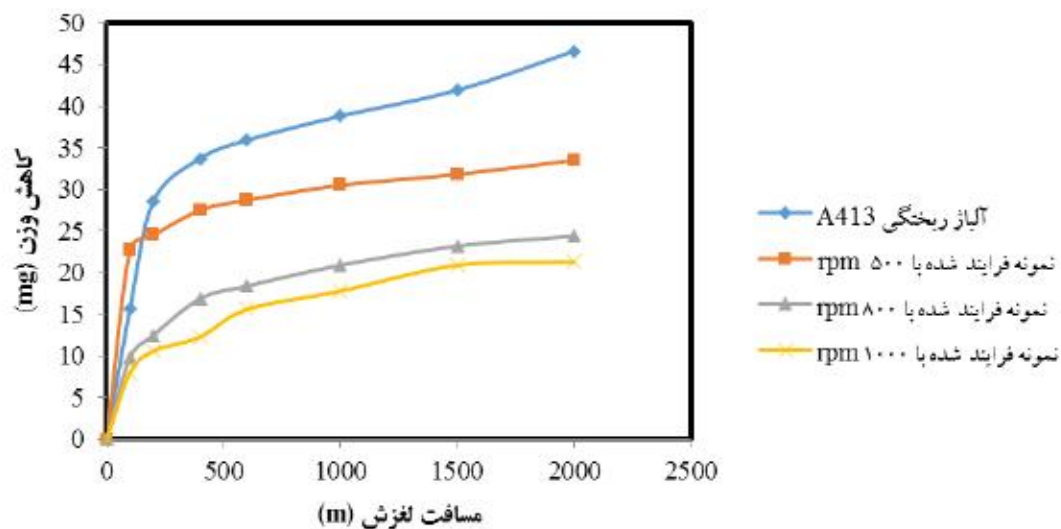


شکل 4- ریز ساختار مربوط به منطقی اغتشاشی نمونه‌های فرایند شده با سرعت پیشروی 25 mm/min و سرعت‌های چرخشی 500، 800 و 1000 rpm و فلز پایه.

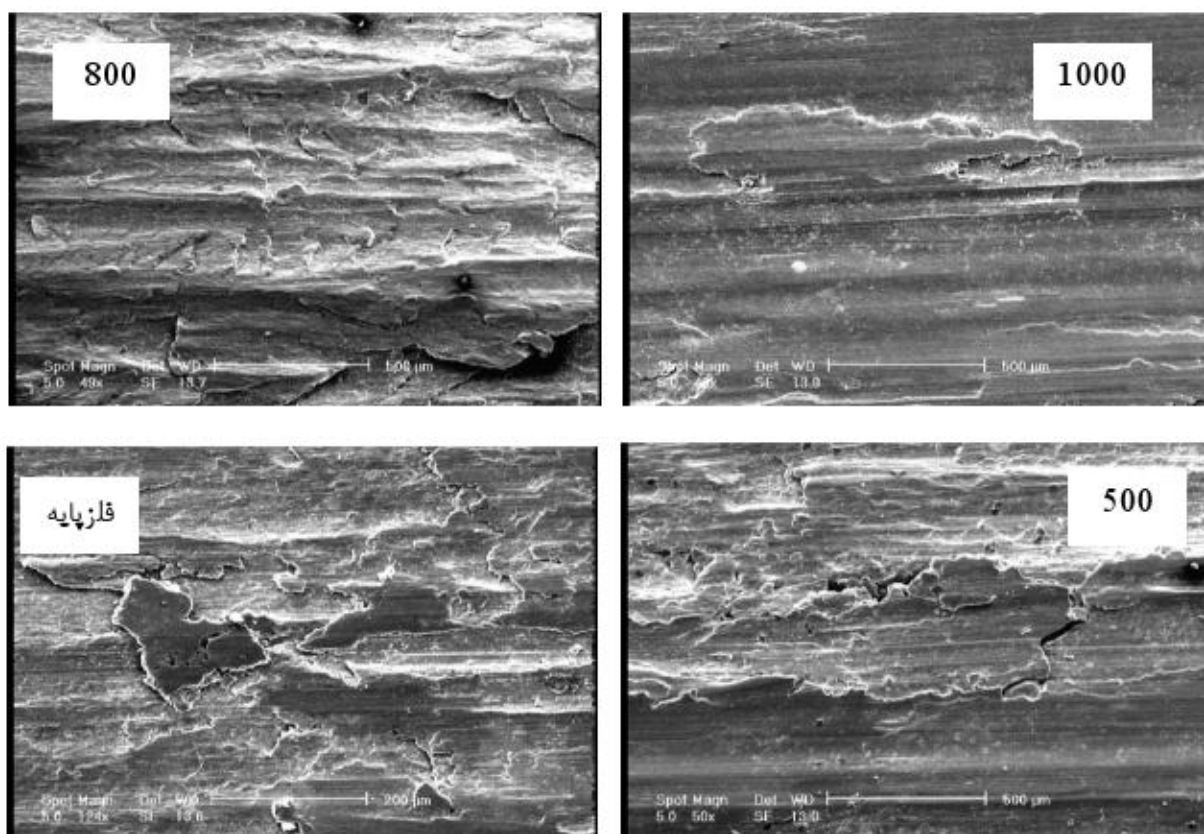


شکل 5- مقادیر سختی مربوط به آلیاژ آلومینیوم ریختگی A413 و نمونه‌های فرایند شده با سرعت‌های چرخش ابزار متفاوت.

شانزدهمین سمینار ملی مهندسی سطح



شکل 6- نمودار کاهش وزن نمونه ها بر اثر ساییش بر حسب مسافت ساییش.



شکل 7 تصاویر میکروسکوپ الکترونی از مسیر ساییش نمونه ها در سرعت های چرخش ابزار 1000rpm و 800، 500 و فلز پایه.