

ارزیابی سختی و رفتار سایشی کامپوزیت سطحی هیبریدی Al7075/TiC/MoS₂ تولید شده به روش فرایند اصطکاکی اغتشاشی

مینا آزادی، مرتضی شمعانیان، محمدعلی گل‌عذار

دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت مقاله ۹۴/۱۲/۱۰ - پذیرش مقاله : ۹۵/۱۲/۰۹)

چکیده

در این تحقیق کامپوزیت‌سازی سطحی هیبریدی با ذرات تقویت‌کننده TiC و MoS₂ روی زیر لایه آلومینیوم ۷۰۷۵ آتیل‌شده با استفاده از فرآیند اصطکاکی اغتشاشی مورد بررسی قرار گرفته است. ذرات TiC و MoS₂ در شیاری بر روی سطح فلز پایه قرار گرفت و سپس عملیات اصطکاکی اغتشاشی طی سه پاس روی آن انجام شد. برای بررسی رفتار سایشی کامپوزیت‌های تولید شده از آزمون سایش رفت و برگشتی استفاده شد. به منظور تعیین مکانیزم‌های غالب سایش، مسیر سایش و ذرات آن با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد مشاهده قرار گرفت. نتایج ریزساختار توزیع خوب و یکنواخت ذرات تقویت‌کننده پس از انجام سه پاس فرآیند اصطکاکی اغتشاشی را نشان می‌دهد. دلیل این امر میزان حرارت ورودی و سیلان ماده در حین فرآیند است. همچنین با توجه به اثرات فرآیند اصطکاکی اغتشاشی بر سختی و رفتار تریبولوژیکی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ و کامپوزیت‌های تولیدی می‌توان گفت که به دلیل حضور ذرات تقویت‌کننده MoS₂ به عنوان روان‌کار جامد در کامپوزیت سطحی Al7075/TiC/MoS₂ مقاومت سایشی به طور قابل ملاحظه‌ای نسبت به Al7075/TiC بهبود یافت. مکانیزم سایش غالب در کامپوزیت سطحی Al7075/TiC به صورت سایش خراشان بود که با افزودن ذرات تقویت‌کننده MoS₂ و تشکیل کامپوزیت سطحی هیبریدی Al7075/TiC/MoS₂ مقاومت سایشی به طور قابل ملاحظه‌ای بهبود یافت. بیشترین سختی مربوط به نمونه Al7075-TiC بود که علت این پدیده حضور ذرات روان‌کار MoS₂ با سختی کمتر در کامپوزیت هیبریدی Al7075/TiC/MoS₂ است.

واژه‌های کلیدی: آلومینیوم ۷۰۷۵، فرآیند اصطکاکی اغتشاشی، کامپوزیت سطحی هیبریدی، رفتار تریبولوژیکی.

Hardness and Wear Behavior of Al7075/TiC/MoS₂ Surface Hybrid Composite Produced by Friction Stir Processing

Mina Azadi, Morteza Shamanian and Mohammad Ali Golozar

Department of Material Engineering, Isfahan University of Technology

(Received 29 Feb 2016, accepted 27 Feb 2017)

Abstract

In this study, surface hybrid composites reinforced with TiC and MoS₂ were fabricated on heat treated aluminum 7075 substrate via friction stir processing (FSP). For this purpose, reinforcement particles were added to the aluminum 7075 matrix using groove technique, afterward friction stir process was applied using three passes. To evaluate the wear behavior of fabricated composites, reciprocating wear test was applied. Scanning electron microscopy (SEM) was utilized to study wear track and wear particles in order to determine the dominant wear mechanism. The effect of friction stir process on hardness and tribological behavior of aluminum 7075 alloy was studied. The results showed that because of the existence of MoS₂ reinforcement particles as solid lubricant, wear resistance of Al7075/TiC/MoS₂ surface hybrid composite was significantly improved in comparison with Al/TiC composite samples. It was concluded that abrasive wear mechanism was the dominant mechanism in Al7075/TiC surface hybrid composites. The highest hardness was observed in Al7075/TiC surface hybrid composite, which may be due to the lower hardness of MoS₂ particles as solid lubricant in Al7075/TiC/MoS₂ surface hybrid composites.

Keywords: Aluminum 7075, Friction stir processing, Surface hybrid composite, Tribological behavior.

E-mail of corresponding author: mina.azadi68@yahoo.com.

مقدمه

آلومینیوم پرکاربردترین فلز غیر آهنی است که به دلیل چگالی کم و نسبت استحکام به وزن زیاد به طور گسترده‌ای در صنایع هوافضا و اتومبیل‌سازی و مهندسی سازه استفاده می‌شود. اما این فلز مانند سایر فلزات خالص، استحکام کمی دارد و در مواردی که مقاومت در برابر تغییر شکل یا شکست مورد نظر باشد، قابل استفاده نیست. به منظور رفع این محدودیت عناصر آلیاژی مختلف به آلومینیوم اضافه شده و انواع آلیاژهای آلومینیوم تهیه می‌شود که در این صورت خواص بسیار مناسب‌تری را ارائه می‌کنند. از بین گروه‌های آلیاژ آلومینیوم، آلومینیوم ۷۰۷۵ یکی از پرکاربردترین آلیاژهای آلومینیوم در مصارف صنعتی از جمله در صنعت خودروسازی و هوافضا است. این آلیاژ دارای استحکام زیادی بوده ولی به دلیل کم بودن مقاومت به سایش استفاده از آن‌ها محدود شده است.

ساخت کامپوزیت‌های سطحی زمینه فلزی با روش‌های متداول مبتنی بر فرآیند فاز مذاب در دماهای بالا، نظیر عملیات ذوب لیزر و پاشش حرارتی، می‌تواند منجر به تخریب خواص کامپوزیت شود. یکی از مشکلات اصلی در مورد کامپوزیت‌های هیبریدی با فرآیندهای ذوبی رایج، آگلومره شدن ذرات تقویت‌کننده است که منجر به توزیع غیریکنواخت ذرات تقویت‌کننده در زمینه می‌شود، لذا کنترل پارامترهای فرآیند به منظور حصول ریزساختار انجمادی مطلوب در لایه سطحی الزامی است. با در نظر گرفتن این مشکلات، به نظر می‌رسد که فرآیند اصطکاکی اغتشاشی^۱ (FSP) گزینه مناسبی برای ساخت کامپوزیت‌های زمینه فلزی هیبریدی روی ورق آلومینیومی باشد [۱].

فرآیند اصطکاکی اغتشاشی از جمله فرایندهای حالت جامد است که در سال ۱۹۹۱ توسط انجمن جوشکاری بریتانیا^۲

ابداع شده است. در سال‌های اخیر تحقیقات زیادی روی ایجاد لایه کامپوزیت سطحی توسط فرآیند اصطکاکی اغتشاشی انجام شده است. این تحقیقات نشان می‌دهد که تولید کامپوزیت، سبب افزایش کاربرد آلومینیوم و آلیاژهای آن در صنایع مختلف شده است. به عنوان مثال سورش^۳ رفتار سایشی کامپوزیت زمینه آلومینیومی تقویت‌شده با ذرات SiC ، TiC ، TiB_2 و B_4C را مورد بررسی قرار داد. نتایج به دست آمده نشان داد که سرعت سایش کامپوزیت زمینه فلزی تقویت‌شده بسیار کمتر از آلومینیوم خالص است. همچنین ونکاتارامن^۴ کامپوزیت زمینه فلزی $Al7075$ تقویت شده با TiC را مورد بررسی قرار داد و نتیجه گرفت که رفتار سایش این آلیاژ، وابسته به مقدار TiC در ریزساختار است به نحوی که با افزایش مقدار کاربید تیتانیوم، سرعت سایش کامپوزیت کاهش می‌یابد [۱]. زحمتکش و عنایتی نشان دادند که سختی نانوکامپوزیت سطحی Al/Al_2O_3 می‌تواند از ۱۰۰ به ۲۳۰ ویکرز افزایش یابد [۲]. همچنین در پژوهشی دیگر ارزیابی‌های انجام شده بر روی کامپوزیت $Al-TiC$ تولید شده به روش درجا نشان داد که ذرات کاربید تیتانیوم یک تقویت‌کننده بسیار جذاب برای کامپوزیت به شمار می‌رود. علت آن حضور کاربید تیتانیوم با مدول الاستیک و سختی بالا است [۳]. همچنین تن^۵ نشان داد که کاربید تیتانیوم در کامپوزیت TiC/Al یک فصل مشترک کوهیرنت یا نیمه کوهیرنت با $\alpha-Al$ دارد و ذرات کاربید تیتانیوم به طور موثری به عنوان مکان‌های جوانه‌زنی $\alpha-Al$ در طول انجماد عمل می‌کنند [۴]. اوه و همکارانش^۶ با رسوب ذرات تقویت‌کننده کاربید سیلیسیم و کاربید تیتانیوم و استفاده از روش تابش پرتوالکترونی توانستند خواص سطحی آلیاژ $Ti-6Al-4V$

^۳ Suresh

^۴ Venkataraman

^۵ Tone

^۶ Oh

^۱ Friction stir processing

^۲ The welding institute

اولیه و حذف لایه اکسید سطحی تحت فرآیند اصطکاکی اغتشاشی قرار گرفتند. همچنین جهت تولید کامپوزیت سطحی از ذرات تقویت‌کننده TiC و MoS_2 استفاده شد. شکل ۱ (الف) و (ب) به ترتیب مورفولوژی ذرات MoS_2 و TiC را نشان می‌دهد. اندازه ذرات MoS_2 کم‌تر از $10 \mu m$ و میانگین اندازه ذرات TiC در شکل در حدود $7-9 \mu m$ تعیین شد.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵.

| Al | Ti | Si | Mn | Fe | Cr | Cu | Mg | Zn |
|------|--------|--------|-------|-------|-------|------|-----|-----|
| پایه | ۰/۰۱۱۲ | ۰/۰۸۹۱ | ۰/۱۷۶ | ۰/۲۰۴ | ۰/۳۳۷ | ۱/۶۳ | ۲/۳ | ۵/۴ |

آلیاژسازی مکانیکی

به منظور کاهش اندازه ذرات TiC از روش آسیاکاری در دمای محیط و تحت دمش گاز آرگون استفاده شد. محیط آسیاب شامل ۱۵ گلوله با قطرهای مختلف بود. جنس گلوله‌ها و محفظه از فولاد پر کروم سخت‌کاری شده بود. نسبت وزنی گلوله به پودر و سرعت چرخش آسیاب به ترتیب ۲۰ به ۱ و 400 rpm در نظر گرفته شد. این فرآیند به مدت ۳۰ دقیقه انجام شد. از آن جایی که احتمال ورود آهن از طریق گلوله‌ها و محفظه به پودر TiC وجود داشت بدین منظور برای جداسازی ذرات آهن از ذرات TiC پس از آسیاکاری، ابتدا پودر TiC در محلول رقیق اسیدسولفوریک در دمای $70^\circ C$ درجه سانتی‌گراد به مدت یک ساعت اسیدشویی شده تا آهن موجود در آن حل شود. سپس از کاغذ صافی عبور داده و برای خشک شدن، پودر در دمای $150^\circ C$ درجه سانتی‌گراد در آن قرار داده شد.

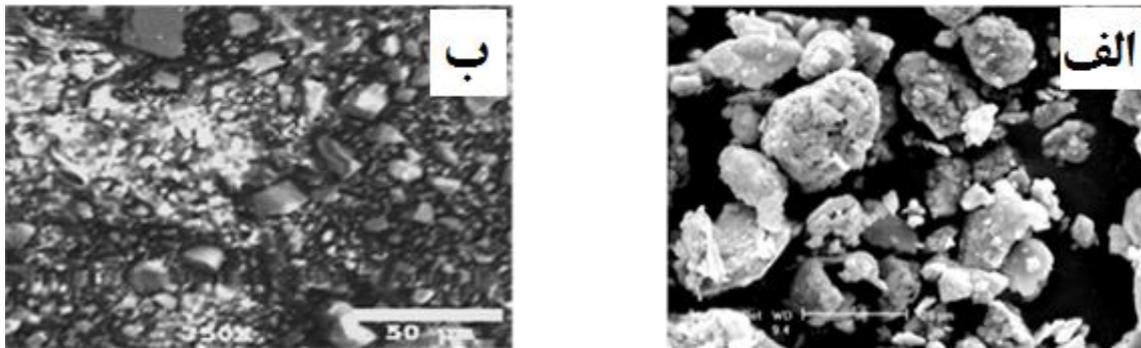
را با ایجاد کامپوزیت سطحی بر روی آن به‌طور قابل ملاحظه‌ای بهبود بخشند [۵]. همان‌طور که قبلاً گفته شد ساخت کامپوزیت‌های سطحی زمینه فلزی با روش‌های بالا که مبتنی بر فرآیند فاز مذاب در دمای بالا هستند، می‌تواند باعث تخریب خواص کامپوزیت شود. در این راستا به نظر می‌رسد که استفاده از فرآیندهای سطحی حالت جامد نظیر فرآیند اصطکاکی اغتشاشی گزینه مناسبی برای ساخت کامپوزیت سطحی باشد [۶]. بررسی‌ها نشان داده است که انتخاب تقویت‌کننده یکی از فاکتورهای مهم و مؤثر در خواص کامپوزیت سطحی زمینه فلزی است و ذرات کاربید تیتانیوم به دلیل مدول الاستیک و سختی بالا مورد توجه هستند. همچنین افزودن MoS_2 به‌عنوان تقویت‌کننده ثانویه منجر به بهبود مؤثرتر رفتار سایشی می‌شود. در این حالت وجود لایه مخلوط مکانیکی^۱ (MML) پایدار و غنی از MoS_2 از تماس فلز به فلز جلوگیری می‌کند و سایش کامپوزیت را کاهش می‌دهد [۳].

در تحقیق حاضر کامپوزیت‌سازی سطحی بر سطح آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ به روش فرآیند اصطکاکی اغتشاشی با استفاده از دو نوع مخلوط پودری $Al7075/TiC$ و $Al7075/TiC/MoS_2$ طی سه پاس انجام شد. سپس ریزساختار و سختی نمونه‌ها مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. به منظور ارزیابی رفتار سایشی آن از آزمون سایش رفت و برگشتی استفاده شد و در پایان مسیر سایش و ذرات سایش نیز با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد مطالعه و ارزیابی قرار گرفت.

مواد و روش تحقیق

ماده اولیه مورد استفاده در این تحقیق آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ بود که ترکیب شیمیایی آن در جدول ۱ ارایه شده است. ورق‌هایی به ابعاد $200 \times 50 \times 5 \text{ mm}$ پس از آماده‌سازی

^۱ Mechanically mixed layer

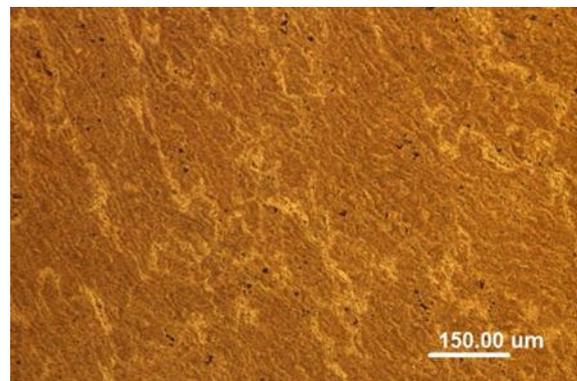


شکل ۱. تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از ذرات تقویت‌کننده (الف) MoS_2 و (ب) TiC آسیابکاری شده.

مشخصات قطر شانه ۱۸ mm، قطر و طول برآمدگی به ترتیب ۵ و ۳/۵ mm بود. به منظور افزایش توانایی ابزار در ایجاد اغتشاش و جابجایی ماده روی برآمدگی ابزار رزوه‌هایی به صورت چپ‌گرد با گام ۱ mm ایجاد شد. برای افزایش سختی و مقاومت به سایش و جلوگیری از اکسید شدن، ابزارها را در جعبه ابزار چدنی قرار داده و تا دمای ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت یک ساعت در کوره نگهداری شد و در نهایت همراه با تلاطم در روغن سرد گردید. نمونه‌های تهیه شده با ابعاد معین توسط فیکسچر روی میز کار دستگاه ثابت نگه داشته شدند. در مرحله اول به منظور ایجاد شیار از تیغچه فرز انگشتی به قطر ۲ mm استفاده شد و در طول قطعات شیار به عرض ۲ mm و عمق ۳ mm ایجاد شد. پس از پر نمودن این شیارها با ذرات تقویت‌کننده و بستن آنها توسط یک ابزار بدون برآمدگی، به انجام فرآیند اصطکاکی اغتشاشی پرداخته شد. ابزار در حال چرخش وارد قطعه کار می‌شود تا زمانی که سطح شانه ابزار با قطعه کار تماس پیدا کند. در این حالت اصطکاک بین ابزار و قطعه کار سبب افزایش درجه حرارت می‌شود و شرایط را برای سیلان ماده و تغییر شکل پلاستیک فراهم می‌آورد.

عملیات آنیل

بر روی ورق‌های آلومینیوم عملیات آنیل انجام شد. بدین منظور ابتدا نمونه‌ها به مدت ۳ ساعت در دمای ۴۳۰ درجه سانتی‌گراد نگاه‌داشته شدند و سپس تا دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد در کوره و در نهایت تا دمای اتاق در هوا سرد شدند. ریزساختار این آلیاژ در شکل ۲ آورده شده است.



شکل ۲. ریزساختار آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵.

تجهیزات مربوط به فرآیند اصطکاکی اغتشاشی

در این تحقیق برای تولید کامپوزیت سطحی روی ورق آلومینیوم ۷۰۷۵ از فرآیند اصطکاکی اغتشاشی استفاده شد. انجام فرآیند با استفاده از دستگاه فرز صورت گرفت. مشخصات این دستگاه در جدول ۲ ارائه شده است. ابزار مورد استفاده در این تحقیق فولاد گرم کار H13 با

جدول ۲. مشخصات دستگاه فرز مورد استفاده.

| | |
|-------------------------------|-----------------------------|
| توان موتور اصلی | ۷ اسب بخار |
| سرعت چرخشی | ۴۰ تا ۲۰۰۰ دور بر دقیقه |
| توان موتور محرک میز کار | ۲ اسب بخار |
| سرعت پیشروی میز کار | ۳۰ تا ۶۰۰ میلی متر بر دقیقه |
| زاویه چرخش فک نسبت به میز کار | ۰ تا ۹۰ درجه |

رفت و برگشتی داشتند. سایر نمونه‌ها قبل از آزمون سایش تا سمباده ۶۰۰ تحت سنباده‌زنی قرار گرفتند. آزمایش‌ها در شرایط دمای محیط و میزان رطوبت ۲۵ تا ۳۵ درصد انجام گرفت. کاهش وزن نمونه‌ها ابتدا در فواصل لغزش ۲۵ و ۵۰، و سپس در فواصل ۱۰۰ متری اندازه‌گیری شد. نمونه‌های کامپوزیتی با ذرات تقویت‌کننده TiC و همچنین کامپوزیت هیبریدی $Al_7075/TiC/MoS_2$ تحت آزمون سایش قرار گرفتند. همچنین جهت تعیین مکانیزم‌های سایش، سطوح و ذرات سایش توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفتند.

نتایج و بحث

توزیع ذرات تقویت‌کننده TiC در ناحیه اغتشاشی

شکل ۳ و ۴ به ترتیب تصاویر میکروسکوپی نوری کامپوزیت Al/TiC و $Al/TiC/MoS_2$ را پس از سه پاس فرآیند نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود ذرات تقویت‌کننده پس از سه پاس فرآیند توزیع خوب و یکنواختی دارند. علت توزیع یکنواخت و خوب پس از انجام سه پاس فرآیند اصطکاکی اغتشاشی را می‌توان به دلیل میزان حرارت ورودی و سیلان ماده در حین فرآیند دانست. سطح نمونه به علت تماس شانه ابزار با قطعه کار سطح تماس بیشتر است و بنابراین حرارت موضعی ناشی از اصطکاک بیشتر است که منجر به سیلان شدید ماده و توزیع یکنواخت ذرات تقویت‌کننده می‌شود [۷]. همچنین در ادامه تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی توزیع خوب ذرات تقویت‌کننده را به خوبی نشان می‌دهد.

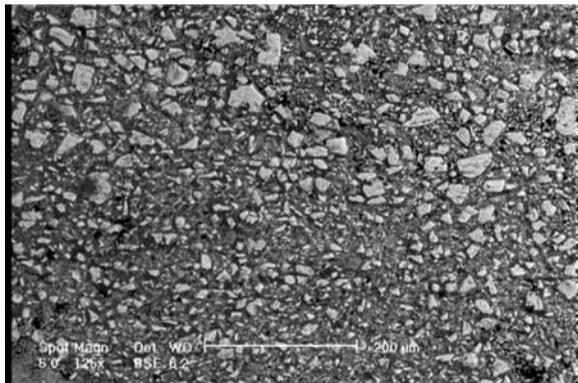
ارزیابی ریزساختار

جهت مشاهده و بررسی ریزساختار ایجاد شده، ابتدا نمونه‌ها در مقطع عرضی برش داده شده و سپس مانت سرد شدند. پس از سمباده‌زنی نمونه‌ها با کاغذ سمباده ۸۰-۱۲۰-۲۴۰-۶۰۰ و ۱۲۰۰ و پولیش مکانیکی با پودر آلومینا با ابعاد ۰/۳، در محلول کلر با ترکیب (۱/۵ ml HCL، ۱ ml HNO₃، ۲/۵ ml HF، ۹۵ ml H₂O) اچ شدند. در مورد کامپوزیت‌های تولید شده نحوه توزیع ذرات تقویت‌کننده در سطح و مقطع عرضی با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی بررسی شد.

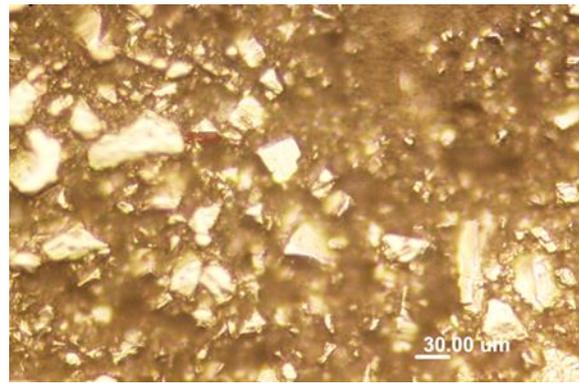
آزمون سایش و ریزسختی سنجی

جهت بررسی تغییرات سختی در نمونه‌های فرآیند شده از دستگاه ریزسختی سنجی ویکرز استفاده شد. میزان بار اعمالی ۱۰۰ گرم و مدت زمان اعمال بار ۱۰ ثانیه انتخاب شد. برای انجام آزمون ریزسختی خط مرکزی جوش به عنوان نقطه صفر در نظر گرفته شد و در فواصل ۰/۸ میلی متر با فاصله از خط جوش اعداد سختی اندازه‌گیری شده و ثبت شد.

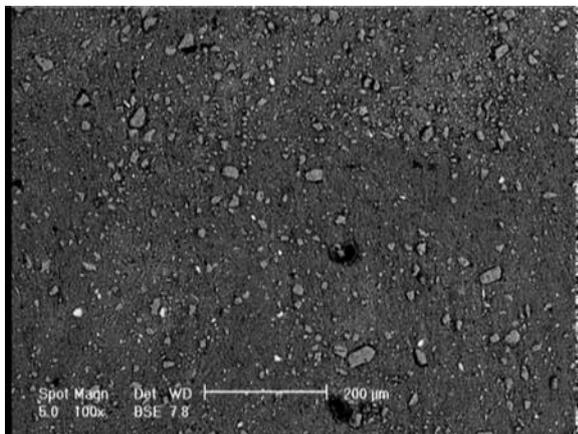
به منظور ارزیابی رفتار سایشی نمونه‌ها از دستگاه سایش رفت و برگشتی استفاده شد. آزمون سایش در بار اعمالی ۱۰ نیوتن و مسافت لغزشی ۱۰۰۰ متر انجام گرفت. نمونه‌ها با سرعت خطی ثابت ۰/۱۴ متر بر ثانیه در تماس با سطح مقابل (فولاد ۵۲۱۰۰ با سختی ۶۴ راکول سی) که به صورت ثابت بود، در یک دامنه ۴ سانتیمتری حرکت



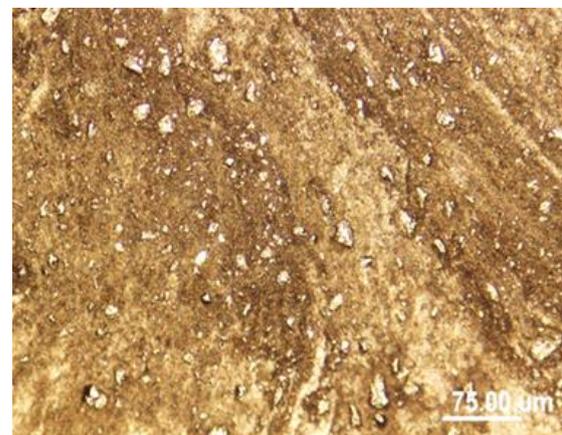
شکل ۵. تصویر SEM مربوط به توزیع ذرات تقویت‌کننده در مقطع عرضی کامپوزیت سطحی $Al7075/TiC$ تولید شده با سه پاس فرایند.



شکل ۳. تصویر میکروسکوپی نوری کامپوزیت $Al7075/TiC$ پس از سه پاس فرایند.



شکل ۶. تصویر SEM مربوط به توزیع ذرات تقویت‌کننده در مقطع عرضی کامپوزیت $Al7075/TiC/MoS_2$ تولید شده با سه پاس فرایند.



شکل ۴. تصویر میکروسکوپی نوری کامپوزیت $Al7075/TiC/MoS_2$ پس از سه پاس فرایند.

توزیع ذرات تقویت‌کننده در مقطع عرضی

شکل ۵ و ۶ تصویر SEM مربوط به توزیع ذرات تقویت‌کننده در مقطع عرضی کامپوزیت‌های سطحی $Al7075/TiC$ و $Al7075/TiC/MoS_2$ تولید شده با سه پاس فرایند را نشان می‌دهد. در این تصاویر نیز توزیع خوب ذرات تقویت‌کننده کاملاً مشهود است.

بررسی سختی نمونه‌ها

مقدار سختی نمونه آلومینیوم ۷۰۷۵ قبل از عملیات اصطکاکی اغتشاشی در حالت آنیل حدود ۶۰ ویکرز اندازه‌گیری شد. پروفیل سختی مربوط به نمونه کامپوزیتی $Al7075/TiC$ و نمونه کامپوزیتی هیبریدی $Al7075/TiC/MoS_2$ تولید شده طی سه پاس فرایند در شکل ۷ آمده است. در مورد هر دو نمونه کامپوزیتی تولید شده قابل ملاحظه است که سختی منطقه اغتشاشی افزایش یافته است ولی سختی منطقه اغتشاشی در مورد کامپوزیت سطحی هیبریدی نسبت به کامپوزیت سطحی $Al7075/TiC$ تولید شده در شرایط مشابه مقداری کمتر است که به علت

مجدد دینامیکی و ایجاد ساختار ریزدانه در این ناحیه است. در ضمن می‌توان گفت که برخی از نوسانات در نمودار به دلیل عدم پراکندگی یکنواخت ذرات کاربید تیتانیوم می‌باشد. همچنین تفاوت در جهت‌گیری دانه‌ها در ناحیه اغتشاشی باعث ناهمسانگردی در سختی می‌شود [۱۳ و ۱۴].

بررسی رفتار سایشی

شکل ۸ منحنی کاهش وزن بر حسب مسافت لغزش مربوط به نمونه‌های Al7075/TiC و Al7075/TiC/MoS_2 تولید شده توسط فرایند FSP پس از سه پاس را نشان می‌دهد. همانگونه که در این شکل دیده می‌شود با افزایش مسافت لغزش، کاهش وزن در هر دو نمونه افزایش می‌یابد، اما میزان کاهش وزن در نمونه Al7075/TiC بیشتر است و در هر دو نمونه در مسافت‌های بیشتر، کاهش وزن با یک نرخ ثابت ادامه می‌یابد در ادامه به بررسی مکانیزم‌های غالب سایش نمونه‌ها پرداخته خواهد شد.

حضور ذرات روان‌کار MoS_2 با سختی کمتر و ساختار لایه‌ای و نرم و همچنین کسر حجمی کمتر ذرات تقویت‌کننده TiC است. نتایج مشابهی توسط محققان دیگر گزارش شده است [۸، ۹ و ۱۰].

چهار مکانیزم استحکام‌دهی در کامپوزیت‌های زمینه فلزی وجود دارد [۱۱ و ۱۲]؛ (۱) استحکام‌دهی مرزدانه و مرزدانه فرعی (رابطه هال-پچ)، (۲) قفل شدن نابجایی‌ها به سبب حضور ذرات تقویت‌کننده (تئوری اوروان)، (۳) نابجایی‌های ایجاد شده به سبب اختلاف در ضریب انبساط حرارتی بین زمینه و ذره تقویت‌کننده و (۴) کرنش الاستیک در فصل مشترک ذره با زمینه.

همچنین از جمله فاکتورهای تاثیرگذار بر روی سختی

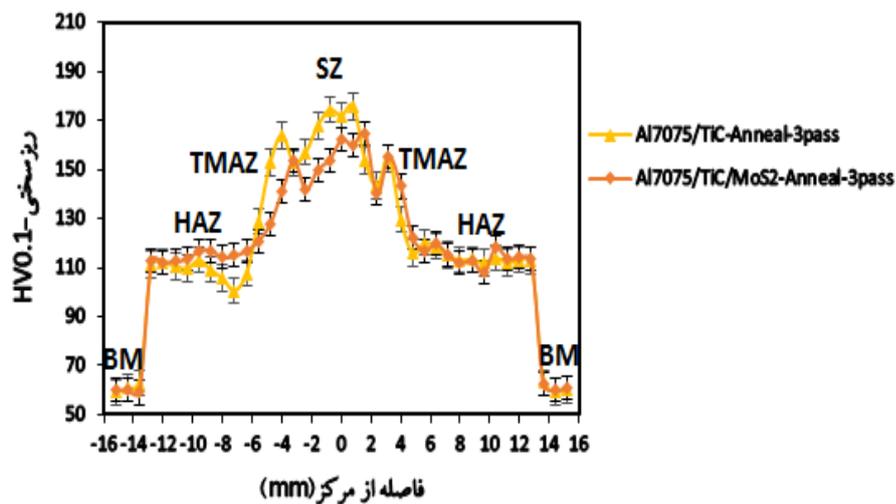
کامپوزیت سطحی عبارتند از:

(۱) مشخصات ریزساختاری

(۲) توزیع ذرات تقویت‌کننده

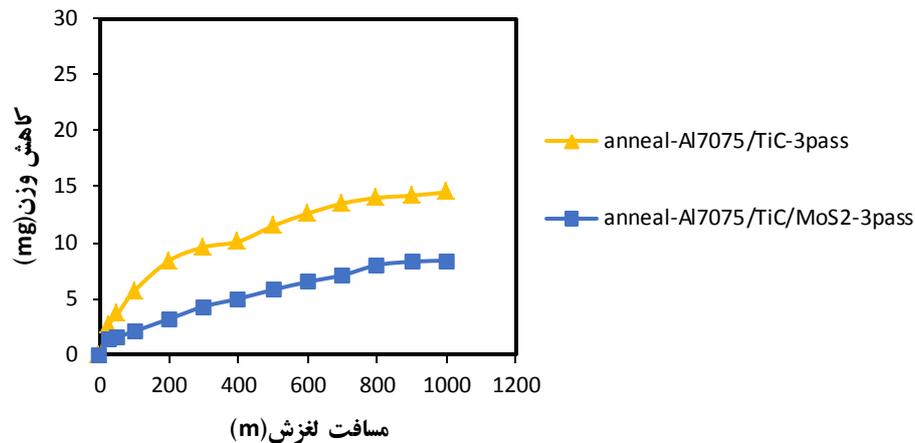
(۳) مقدار و اندازه ذرات

بنابراین افزایش سختی در منطقه اغتشاشی کامپوزیت‌ها ناشی از وجود ذرات تقویت‌کننده سرامیکی و وقوع تبلور



شکل ۷. پروفیل سختی در مقطع عرضی نمونه کامپوزیتی Al7075/TiC و نمونه کامپوزیت سطحی هیبریدی Al7075/TiC/MoS_2 تولید شده پس از

۳ پاس فرایند.



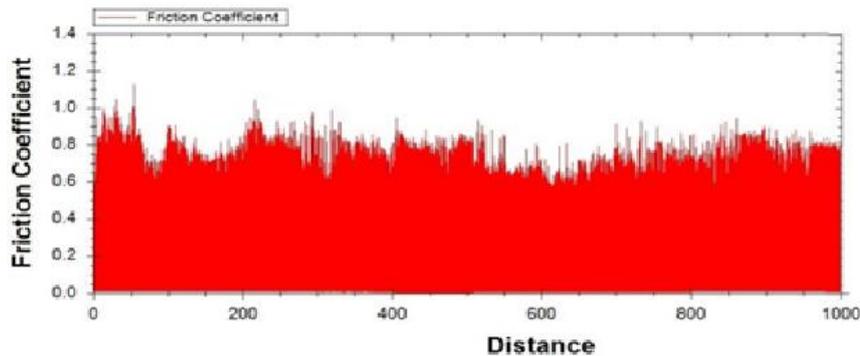
شکل ۸. منحنی‌های کاهش وزن بر حسب مسافت لغزش برای دو نمونه $Al7075/TiC$ و $Al7075/TiC/MoS_2$ تولیدشده با فرآیند اصطکاکی اغتشاشی طی سه پاس.

ذرات TiC را می‌توان این گونه تفسیر کرد. ذرات تقویت‌کننده سخت منجر به آسیب لایه‌های سطحی حین اصطکاک می‌شود بنابراین زبری فصل مشترک افزایش می‌یابد. این امر به نوبه خود منجر به آسیب و تخریب ذرات تقویت‌کننده می‌شود. ذرات آسیب دیده بین سطوح قرار گرفته و سطوح کامپوزیت به عنوان سطح ساییده عمل می‌کنند. بنابراین ذرات تقویت‌کننده سخت باعث افزایش ضریب اصطکاک و در نتیجه کاهش وزن بیشتر می‌شود. با مقایسه نمونه‌ها ضریب اصطکاک TiC نوسانات بیشتر و تغییرات قابل توجه بیشتری را نشان داده است. این امر می‌تواند به دلیل جدا شدن ذرات سخت از سطح باشد که به عنوان موانعی در برابر لغزش عمل کرده و در نتیجه ضریب اصطکاک نسبت به کامپوزیت هیبریدی افزایش می‌یابد [۸]. در نتیجه با این مقایسه نمونه کامپوزیتی هیبریدی تولید شده پس از سه پاس فرآیند کاهش وزن کمتر و مقاومت به سایش بالاتر را نشان می‌دهد. به منظور بررسی دقیق‌تر رفتار سایشی از تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی استفاده شد.

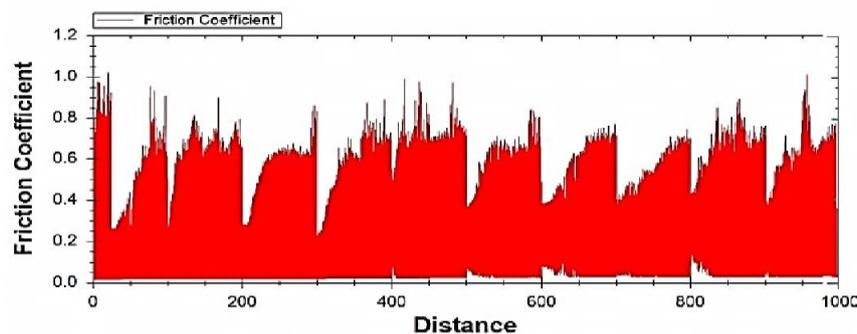
بررسی مکانیزم غالب سایش نمونه‌ها

تغییرات ضریب اصطکاک برای نمونه‌های تولید شده با سه پاس فرآیند در شکل ۹ آمده است. در این نمودارها نوسانات زیادی به چشم می‌آید که این نوسانات ناشی از چسبیدن و جدا شدن مکرر ذرات سایش روی سطح سایش است که باعث افزایش و کاهش نیروی درگیر میان پین و سطح قطعه می‌شود. همانطور که گفته شد هر چه سطح سخت‌تر باشد، تغییر فرم پلاستیک موضعی کمتری رخ داده و در نتیجه ضریب اصطکاک کمتر می‌شود و مکانیزم سایش عمدتاً سایش خراشان خواهد بود [۱۵]. بنابراین در این نمونه‌ها نیز به دلیل وجود ذرات سخت کاربید تیتانیوم احتمال وجود مکانیزم سایش خراشان است. با نگاهی به شکل ۹ می‌توان گفت تولید کامپوزیت $Al/TiC/MoS_2$ بر روی رفتار سایشی و سختی تاثیر مثبتی دارد و دیده می‌شود که میانگین ضریب اصطکاک کامپوزیت $Al/TiC/MoS_2$ کمتر از کامپوزیت Al/TiC است و این نتایج نشان می‌دهد که افزودن ذرات تقویت‌کننده MoS_2 با ساختار لایه‌ای سبب کاهش در ضریب اصطکاک کامپوزیت شده است. به هر حال افزودن

Al_7075/TiC -Anneal-3pass



$Al_7075/TiC/MoS_2$ -Anneal-3pass



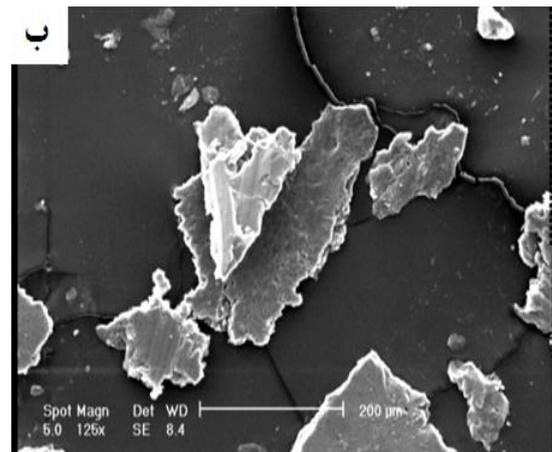
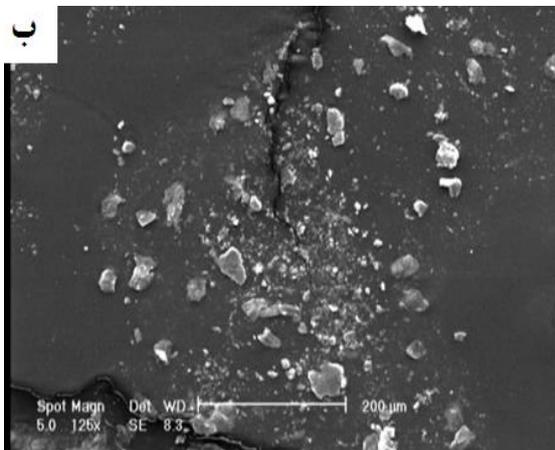
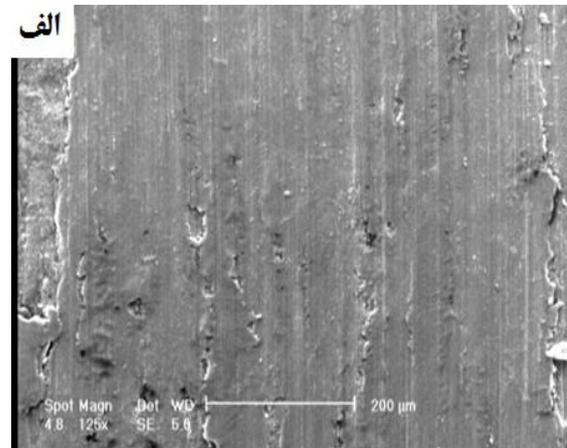
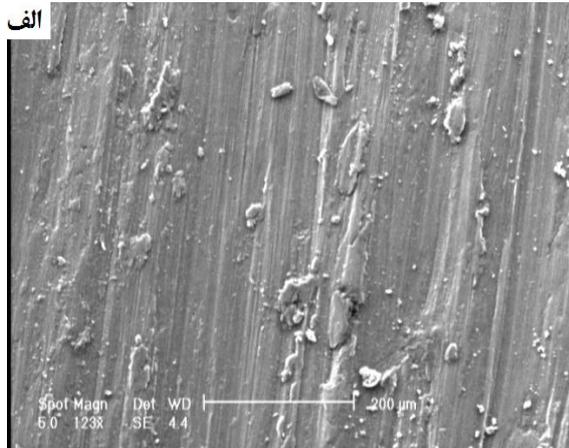
شکل ۹. تغییرات ضریب اصطکاک در مسافت لغزش ۱۰۰۰ متر برای کامپوزیت‌های Al/TiC و $Al/TiC/MoS_2$ تولید شده طی سه پاس فرایند FSP.

روی سطح ایجاد شده است. وجود این شیارها نشان دهنده مکانیزم سایش خراشان از نوع خیش ریز^۱ است. در این حالت خراش سطوح نرم، موجب کنده شدن ماده نمی‌گردد. تنها ماده در سطح جابجا شده و به‌طور مرتب به‌صورت برآمدگی‌هایی در دو طرف شیار ایجاد شده، انباشته می‌گردد و معمولاً دماغه‌ای را نیز در جلوی ماده ساییده تشکیل می‌دهد. پدیده خیش ریز عمدتاً بر روی سطوح بسیار نرم ملاحظه گردیده است [۱۶]. با توجه به این دو شکل می‌توان دید که اندازه ذرات سایش در مورد نمونه Al/TiC نسبت به نمونه هیبریدی بزرگ‌تر است و این با نتایج حاصل از منحنی‌های کاهش وزن در تطابق است. بنابراین با مقایسه سطوح سایش کامپوزیت هیبریدی و کامپوزیت Al/TiC می‌توان گفت که تعداد و عمق شیارهای موجود بر روی سطح سایش کامپوزیت هیبریدی کمتر است. با توجه به آن که کلیه شرایط در مورد هر دو

تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی مربوط به سطح و ذرات سایش نمونه Al_7075/TiC و $Al_7075/TiC/MoS_2$ به ترتیب در شکل ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است. همان گونه که در شکل ۱۰ (الف) قابل ملاحظه است شیارهایی هم‌جهت با راستای سایش و به موازات همدیگر روی سطح ایجاد شده است، وجود این شیارها نشان دهنده مکانیزم سایش خراشان است. سایش خراشان زمانی پدید می‌آید که سطح سخت و زبر در مقابل یک سطح نرم‌تر حرکت لغزشی داشته، در آن فرو رفته و یک سری شیارهایی را به‌وجود آورد. شکل ۱۰ (ب) ذرات سایش نمونه Al/TiC را نشان می‌دهد. از لحاظ مورفولوژی قابل ملاحظه است که ذرات سایش به صورت گوشه‌دار و تیز هستند و این بر وجود مکانیزم خراشان دلالت دارد. همچنین با نگاه به شکل ۱۱ (الف) نیز می‌توان گفت شیارهایی هم‌جهت با راستای سایش و به موازات همدیگر

¹ Micro-Ploughing

کامپوزیت، یکسان بوده لذا می‌توان نتیجه گرفت بهبود رفتار سایشی در کامپوزیت سطحی هیبریدی در اثر افزودن ذرات روانکار MoS_2 است.



شکل ۱۱. تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی مربوط به سطح و ذرات سایش کامپوزیت $Al/TiC/MoS_2$ ، طی سه پاس فرایند FSP.

شکل ۱۰. تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی مربوط به سطح و ذرات سایش کامپوزیت Al/TiC ، طی سه پاس فرایند FSP.

همچنین کسر حجمی کمتر ذرات تقویت‌کننده TiC است. همچنین با توجه به نمودارهای کاهش وزن و سطوح و ذرات سایش کامپوزیت هیبریدی و کامپوزیت Al/TiC می‌توان نتیجه گرفت رفتار سایشی در کامپوزیت سطحی هیبریدی بهبود یافت که می‌توان آن را در اثر افزودن ذرات روانکار MoS_2 دانست به طوری که مقدار میانگین ضریب اصطکاک کامپوزیت هیبریدی در حدود $0/2$ و در مورد کامپوزیت Al/TiC حدود $0/4$ است. این نیز بهبود رفتار سایشی کامپوزیت هیبریدی را نشان می‌دهد. همچنین بررسی مسیر سایش و ذرات آن

نتیجه‌گیری
با استفاده از فرآیند اصطکاکی اغتشاشی کامپوزیت $Al7075/TiC$ و کامپوزیت سطحی هیبریدی با ذرات تقویت‌کننده TiC و MoS_2 بر زیر لایه آلومینیوم 7075 آنیل شده، تولید شدند. پروفیل سختی نشان داد سختی منطقه اغتشاشی در مورد کامپوزیت سطحی هیبریدی نسبت به کامپوزیت سطحی $Al7075/TiC$ تولید شده در شرایط مشابه مقداری کمتر است که به علت حضور ذرات روانکار MoS_2 با سختی کمتر و ساختار لایه‌ای و نرم و

10. S.A. Alidokht, A. Abdollah-zadeh, S. Soleymani, T. Saeid, H. Assadi, *Evaluation of microstructure and wear behavior of friction stir processed cast aluminum alloy*, Materials Characterization, 63(2012)90-97.
11. A. Shafiei-Zarghani, S.F. Kashani-Bozorg, A. Zarei-Hanzaki, *Microstructures and mechanical properties of Al/Al₂O₃ surface nano-composite layer produced by friction stir processing*, Materials Science and Engineering A, 500(2009)84-91. Vol. 500, pp. 84-91, 2009.
12. D.J. Lloyd, *Particle reinforced aluminum and magnesium matrix composites*, International Materials Reviews, 39(1994)1-24.
13. D. Yadav, R. Bauri, *Effect of friction stir processing on microstructure and mechanical properties of aluminum*, Materials Science and Engineering A, 539(2012)85-92.
14. A. Dolatkah, P. Golbabaie, M.K. Besharati Givi, F. Molaiekiya, *Investigating effects of process parameters on microstructural and mechanical properties of Al5052/SiC metal matrix composite fabricated via friction stir processing*, Materials and Design, 37(2012)458-464.
15. B. Zahmatkesh, M.H. Enayati, F. Karimzadeh, *Tribological and microstructural evaluation of friction stir processed Al2024 alloy*, Materials and Design, 31(2010)4891-4896.

۱۶. صالحی، م، اشرفی زاده، ف، متالورژی سطح و تریبولوژی، جلد اول، انجمن علوم و تکنولوژی سطح ایران، ۱۳۷۴.

نشان داد مکانیزم غالب سایش در هر دو نمونه مکانیزم سایش خراشان است.

مراجع

1. K. Ravinder, S. Dhiman, *A study of sliding wear behaviors of Al-7075 alloy and Al-7075 hybrid composite by response surface methodology analysis*, Materials & Design, 53(2013)351-359.
2. H. Izadi, A. Nolting, C. Munro, D.P. Bishop, K.P. Plucknett, A.P. Gerlich, *Friction stir processing of Al/SiC composites fabricated by powder metallurgy*, Materials processing technology, 123(2013)1900-1907.
3. B. Ranjit, D. Yadav, G. Suhas, *Effect of friction stir processing (FSP) on microstructure and properties of Al-TiC in situ composite*, Materials Science and Engineering: A, 528(2011)4732-4739.
4. B. Yang, G. Guisheng, L. Yang, S. Miao, Zh. Haibo, Z.F. Zhigang, *Microstructural characterization and wear behavior of in situ TiC/7075 composites synthesized by displacement reactions and spray forming*, Materials Science and Engineering A, 528(2011)5649-5655.
5. O. Nijs, B. Holmedal, J. Friis, E. Nes, *Sub-structure strengthening and work hardening of an ultra-fine grained aluminium-magnesium alloy*, Materials Science and Engineering: A, 483-484(2008)51-53.
6. R.S. Mishra, ZY Ma, *Friction stir welding and processing*, Materials Science and Engineering R, 50(2005)1-78.
7. K. Nakata, Y.G. Kim, H. Fujii, T. Tsumura, T. Komazaki, *Improvement of mechanical properties of aluminum die casting alloy by multi-pass friction stir processing*, Materials Science and Engineering A, 437(2006)274-280.
۸. سلمان، س، افقهی، س، اثر اتصال TLP بر خستگی آلیاژ $Al7075$ ، دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی شریف، گزارش علمی، ش ۳۸۷۰۹، ۱۳۸۷.
9. S.A. Alidokht, A. Abdollah-zadeh, H. Assadi, *Effect of applied load on the dry sliding wear behaviour and the subsurface deformation on hybrid metal matrix composite*, Wear, 305(2013)291-298.