

به نام خدا



مرکز دانلود رایگان مهندسی متالورژی و مواد

www.Iran-mavad.com



Production and investigation of Al/6%SiO₂ (np) surface nanocomposite properties using friction stir processing

Abstract

In this study Al1050 - SiO₂ nanocomposite was produced by in-situ reaction of 6% nano SiO₂ powder with Al1050 during friction stir processing (FSP). Based on literature, FSP parameters were selected as 50 mm/min (linear velocity), 1600 rpm (rotational velocity). Each sample was processed by 1, 2 and 4 passes of friction stir processing. The microstructure of samples were characterized by Optical microscopy and scanning electron microscopy (SEM). Wear tests were performed by a pin-on-disc configuration using Universal Tribometer. Worn surfaces and wear debris were analyzed using SEM for the evolution of wear mechanisms. By using a micro-hardness device, the hardness specimens were calculated. It was found that sample processed by 2 passes had the higher wear resistance and hardness. The results of Wear test show the coefficient of friction of produced composites 35% decreases with respect to Al1050. Also, wear mechanism transformed from adhesive mechanisms wear to adhesive-abrasion mechanisms, the Hardness of Samples increases with respect to Al1050 and obtained a more fine grain structure. that sample processed by 4 passes had the lower wear resistance and hardness from 2 passes, Because recrystallization Occurred during friction stir processing after 4 passes.

Keywords: Aluminum matrix composite, Al1050, Friction stir processing, nano SiO₂, wear behavior.

ساخت و بررسی خواص نانو کامپوزیت سطحی $Al/6\%SiO_2 (np)$ توسط فرآیند اصطکاکی اغتشاشی

چکیده

در این پژوهش نانو کامپوزیت آلومینیم ۱۰۵۰ حاوی ۶ درصد حجمی نانو ذرات تقویت کننده سیلیکا به کمک فرایند اصطکاکی اغتشاشی به صورت در جا تولید و مشخصه یابی شد. با توجه به نتایج کارهای تحقیقاتی گذشته، فرایند اصطکاکی اغتشاشی در سرعت خطی ۵۰ میلی متر بر دقیقه و سرعت چرخشی ۱۶۰۰ دور بر دقیقه انجام شده . به منظور بررسی اثر تعداد مراحل فرآیند هر کدام از نمونه ها به تعداد یک ، دو و چهار پاس تحت فرایند اصطکاکی اغتشاشی قرار گرفته اند. جهت بررسی ریز ساختار از میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی استفاده شده، در بررسی سایشی از تست پین روی صفحه استفاده شده و مکانیزم سایش توسط میکروسکوپ الکترونی مورد بررسی قرار گرفته و توسط دستگاه میکرو سختی ، سختی نمونه مورد آزمایش قرار گرفته است. در نمونه تولید شده با دو مرحله فرایند ملاحظه می شود که ضریب اصطکاک به میزان ۳۵ درصد کاهش یافته و مکانیزم سایش از چسبان به مکانیزم چسبان خراشان تغییر یافته، دراین میان سختی نمونه در مقایسه با آلومینیم خالص از افزایش قابل توجهی برخوردار بود و در کل ساختار ریز دانه تری حاصل خواهد شد. در نمونه تولید شده با چهار مرحله به دلیل پیاپی بودن مراحل، دانه های تبلور مجدد یافته مشاهده شده، که رفتار سایشی ضعیف تر و سختی پایین تری را به نسبت نمونه تولید شده با دو مرحله فرایند نشان می دهد.

واژه‌های کلیدی: کامپوزیت‌های زمینه آلومینیمی ، آلومینوم ۱۰۵۰ ، فرایند اصطکاکی اغتشاشی ، نانو سیلیکا ، رفتار سایشی.

مقدمه

آلومینیوم و آلیاژهای آن پس از فولاد از جمله پرمصرف ترین آلیاژهای فلزی می باشند. ویژگی های بی نظیر آلیاژهای آلومینیوم از قبیل نسبت استحکام به وزن بالا، مقاومت به خوردگی نسبتاً خوب و هدایت الکتریکی و گرمایی بالا، سبب شده که این آلیاژها در زمینه های مختلف مهندسی، همچون صنایع خودروسازی، نظامی، دریایی و هوافضا کاربرد داشته باشد [۱]. باتوجه به اینکه استفاده از آلومینیوم به علت پاره ای از خواص مکانیکی ضعیف آن محدود می باشد اما ایجاد یک لایه کامپوزیت سطحی می تواند موجب افزایش استحکام مکانیکی و افزایش مقاومت به سایش آلومینیوم و آلیاژهای آن گردد و عملاً با اجرای این فرآیند خواص مکانیکی آلومینیوم بهبود یافته و کاربرد آن گسترش می یابد. در سال های اخیر کامپوزیت های زمینه آلومینیومی تقویت شده با ذرات سرامیکی، به دلیل خواص منحصر به فردی مثل وزن پایین، نسبت استحکام به وزن بالا، مقاومت خوب در دمای بالا، ضریب انبساط حرارتی کم، مقاومت به سایش بالا و همچنین شکل پذیری مناسب سبب شده است تا کاربردهای فراوانی در صنعت پیدا کند [۱]. استفاده از کامپوزیت های زمینه فلزی تقویت شده به دلیل خواص آن مانند استحکام مخصوص بالا و مقاومت در برابر سایش خوب در حال افزایش می باشد. اخیراً فرآیند اصطکاکی اغتشاشی (FSP) برای بهبود ریز ساختار مواد فلزی مورد استفاده قرار گرفته است. این فرآیند مشابه (FSW) می باشد و برای بهبود خواص سطحی به کار می رود. به عبارتی فرآیند اصطکاکی اغتشاشی یک تکنیکی برای ایجاد کامپوزیت های سطحی در زمینه ی زیرلایه های آلومینیوم، همگن کردن متالورژی پودر آلیاژهای آلومینیوم و بهبود ریزساختاری کامپوزیت های زمینه فلزی می باشد [۲]. این فرآیند بر مبنای تغییر شکل پلاستیک شدید قرار دارد و از دیگر روش های سطحی، عمق اثر بیشتری دارد. همچنین مشکلات و محدودیت های ناشی از روشهای ذوبی را نداشته و به علت کاهش حرارت ورودی به قطعه جوشکاری شده، مزایای زیادی را در پی دارد. که از آن جمله می توان به حفظ خواص مکانیکی، اعوجاج کمتر، تنش های پسماند کمتر و عیوب کمتر جوشکاری اشاره نمود [۲]. بررسی های انجام شده نشان می دهد که تا کنون از فرآیند اصطکاکی اغتشاشی برای بهبود ریزساختار سطحی، ایجاد ساختارهای بسیار ریز دانه در آلومینیوم، منیزیم، مس و فولاد، ایجاد ترکیبات بین فلزی غیر هم جنس، تولید کامپوزیت های سطحی، اصلاح ساختار آلیاژهای ریخته گری و افزایش خاصیت سوپر پلاستیسیته استفاده شده است [۳]. در بین ذرات تقویت کننده در این فرایند ذرات نانو در مقایسه با ذرات میکرونی مساحت سطح بالاتری را دارا می باشند و در بستر مورد استفاده برهم کنش بیشتری از خود نشان دهد، پس نانو ذرات می تواند با مقدار مصرف پایین تر، اثرات نهایی بهتری نسبت به میکرو ذرات داشته باشد [۴]. با توجه به موارد فوق در تحقیق حاضر هدف ساخت نانو کامپوزیت سطحی $Al-6\% NanoSiO_2$ با استفاده از فرآیند اصطکاکی اغتشاشی و بررسی ریز ساختار، خواص سایشی و سختی این نوع مواد و همچنین بررسی تاثیر مراحل فرآیند بر ریز ساختار و خواص مکانیکی آنها می باشد.

- 1-Friction stir processing
- 2-Friction stir welding

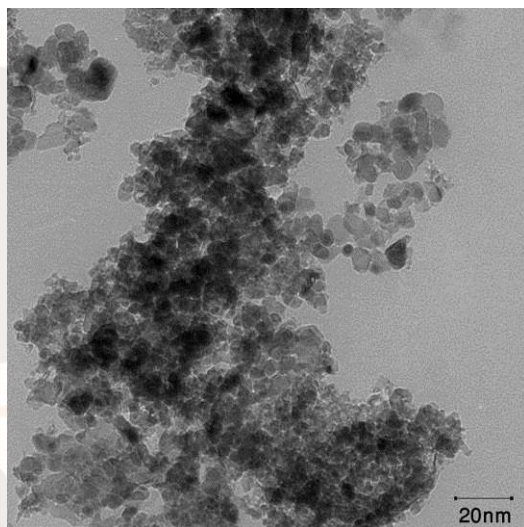
روش پژوهش

در این پژوهش از ورق آلومینیم ۱۰۵۰ با ضخامت ۶ میلی متر، پهنای ۶۰ میلی متر و طول ۲۰۰ میلی متر به عنوان فلز پایه استفاده شده است. ترکیب شیمیایی آلومینیم ۱۰۵۰ در جدول شماره ۱ آورده شده است.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی آلومینیم ۱۰۵۰

| Element | Mg | Si | Fe | Mn | Cu | Zn | Ti | Aluminum |
|---------|------|------|-----|------|------|------|------|----------|
| Wt.% | ۰/۰۵ | ۰/۲۵ | ۰/۴ | ۰/۱۳ | ۰/۰۵ | ۰/۰۵ | ۰/۰۳ | Balance |

همچنین نانو ذرات سیلیکا که به عنوان ذرات تقویت کننده در این آزمایش استفاده شده دارای ابعادی بین ۲۰ تا ۵۰ نانو می باشند. شکل شماره ۱ تصویری از ذرات نانو سیلیکا که توسط میکروسکوپ الکترونی عبوری گرفته شده است را نشان می‌دهد.



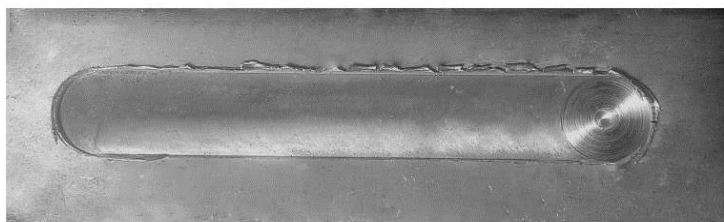
شکل ۱- تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری از پودر نانو سیلیکا

ابزار استفاده شده جهت فرآیند اصطکاکی اغتشاشی شامل یک پین و شانه استوانه ای شکل از جنس فولاد گرم کار H13 می باشد، که پس از تراشکاری عملیات سخت کاری و باز پخت روی آن انجام شده است، این ابزار شامل پین به قطر ۵ میلی متر و ارتفاع ۴ میلی متر و شانه به قطر ۲۰ میلی متر می باشد.



شکل ۲- تصویر ابزار مورد استفاده در فرآیند

مراحل ساخت بر این اساس است که ابتدا به وسیله تیغه فرز اره ای شیار به عمق ۳ میلی‌متر و پهنای ۲ میلی‌متر بر روی تسمه آلومینیومی ایجاد شده سپس شیار ایجاد شده توسط پودر سیلیکای نانو متری پر شده و توسط ابزاری بدون پین سطح آن بسته شده و در مرحله بعد توسط ابزار نشان داده شده در شکل شماره ۲ و به کمک دستگاه فرز فرایند اصطکاکی اغتشاشی انجام می شود. لازم به ذکر است که ابزارهای مورد استفاده باید بعد از بسته شدن در فرز دارای زاویه انحراف به میزان ۳ درجه در خلاف مسیر پیشروی بر روی فرز باشند، تا اصطکاک بیشتری ایجاد شده و ابزار توانایی بستن شیار را داشته باشد [۵]. مهمترین پارامترهای تاثیر گذار در این فرایند سرعت چرخشی ابزار، سرعت خطی ابزار بر روی قطعه کار، درصد حجمی پودر و تعداد پاس می باشد. شکل شماره ۳ تصویری از نمونه فرایند شده را نشان می‌دهد.



شکل ۳ - تصویر سطح نمونه آلومینیومی فرایند شده

در تمامی نمونه های ساخته شده در این پژوهش سرعت چرخشی ابزار ۱۶۰۰ دور در دقیقه و سرعت خطی آن ۵۰ میلی متر بر دقیقه و درصد حجمی پودر ۶ در نظر گرفته شده است. در این میان تاثیر تعداد مراحل فرایند بر روی ریز ساختار، خواص سایشی و سختی نمونه ها مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی مکانیزم سایش نمونه ها مورد بررسی قرار گرفته است. مشخصات فرآیندی نمونه های ساخته شده در جدول شماره ۲ قابل مشاهده می باشد.

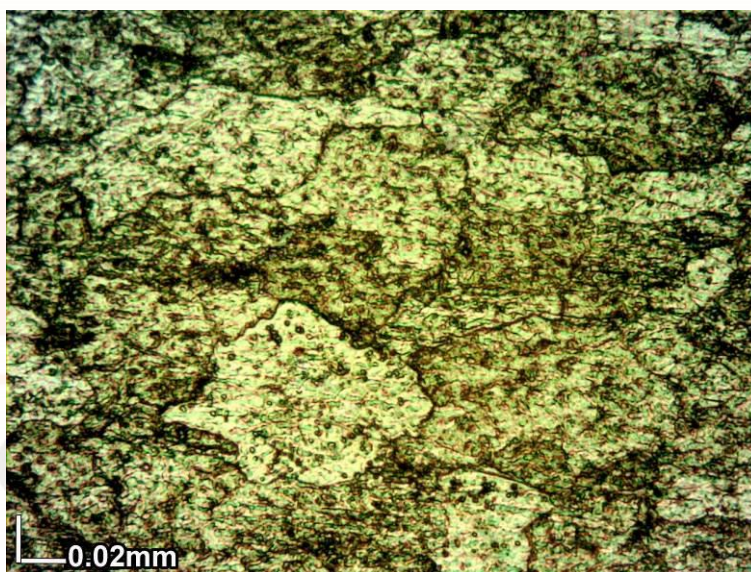
جدول ۲ - مشخصات فرآیندی نمونه های مورد بررسی

| تعداد پاس | سرعت خطی (میلی متر بر دقیقه) | سرعت چرخشی (دور در دقیقه) | درصد حجمی تقویت کننده | |
|-----------|------------------------------|---------------------------|-----------------------|--|
| - | - | - | - | Base Metal |
| ۱ | ۵۰ | ۱۶۰۰ | ۰ | 1 Pass FSP (without nano SiO ₂) |
| ۱ | ۵۰ | ۱۶۰۰ | ۶ | 1 Pass FSP (with nano SiO ₂) |
| ۲ | ۵۰ | ۱۶۰۰ | ۶ | 2 Pass FSP (with nano SiO ₂) |
| ۴ | ۵۰ | ۱۶۰۰ | ۶ | 4 Pass FSP (with nano SiO ₂) |

تجزیه و تحلیل داده ها

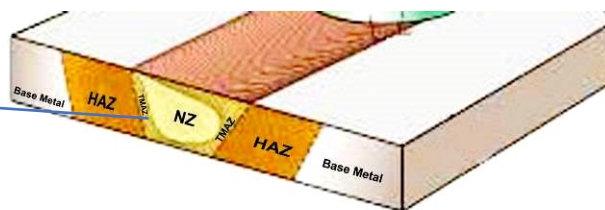
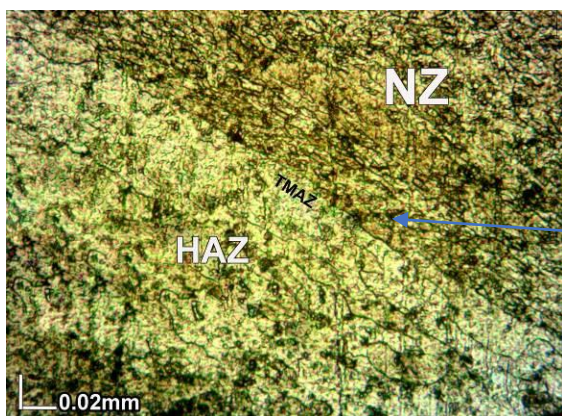
بررسی ساختاری نمونه ها

در بررسی ماکرو ساختاری نمونه ها ، مشاهده شد که نمونه های تولید شده با یک مرحله فرایند اصطکاکی اغتشاشی از توزیع ذرات مناسبی برخوردار نبوده و غالباً حاوی حفراتی هستند که ناشی از عدم پخش شدن ذرات پودر اولیه در ساختار آلومینیم زمینه می‌باشد. بر خلاف نمونه های فوق ، نمونه های تولید شده با دو و چهار مرحله متوالی فرایند از توزیع بسیار خوب ذرات تقویت کننده در زمینه برخوردار هستند. استفاده از روش متالوگرافی در بررسی های متالورژیکی ، همواره یکی از ساده ترین و سریعترین و در عین حال مهم ترین روشها می‌باشد [۶]. جهت بررسی تغییرات ریز ساختاری و اندازه دانه ها ، نمونه های کامپوزیتی پس از آماده سازی اولیه ، که شامل سمباده زنی و پالایش قطعه کارها می باشد ، حکاکی شده و مورد بررسی میکروسکوپ نوری قرار گرفته‌اند. همانطور که در شکل شماره ۴ مشخص می‌باشد ، ریز ساختار فلز پایه شامل دانه های نسبتاً بزرگ با توزیع یکنواخت می‌باشد.



شکل ۴ - تصویر میکروسکوپ نوری از ریز ساختار فلز پایه

ریز ساختار منطقه اغتشاش در نمونه ها به دلیل وجود شرایط دمایی و کرنشی مختلف در طی فرایند دارای مناطق مختلفی می‌باشد. در این میان در شکل شماره ۵ تصویر شماتیکی از فرایند و وجود مناطق مختلف ساختاری نشان داده شده است. مهمترین قسمت های نمونه شامل ناحیه مرکزی (NZ) که تحت فرایند قرار گرفته و دچار تغییر شکل پلاستیک شدید شده ، ناحیه مجاور ناحیه مرکز (TMAZ) که تحت دمای بالا به همراه تغییر شکل پلاستیک کم قرار گرفته و ناحیه بیرونی (HAZ) که تنها تحت تاثیر دما قرار گرفته است، می‌باشد [۲].



شکل ۶ - تصویر میکروسکوپ نوری از ساختار منطقه اغتشاش و ناحیه مجاور آن

شکل ۵ - تصویر شماتیک از فرایند و نواحی مختلف آن

همانطور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، اندازه دانه در منطقه مرکزی (NZ) کاهش یافته و در منطقه تحت اثر عملیات ترمومکانیکی که به طور همزمان تحت اثر تغییر شکل کمتر و نیز حرارت قابل توجه ای قرار گرفته است، دانه های تبلور مجدد یافته در کنار یکدیگر مشاهده می شود [۲]. با توجه به افزایش میزان کرنش پیش بینی می شود که اندازه دانه در ریز ساختار نمونه های تولید شده در تعداد مراحل مختلف یک و دو و چهار مرحله با افزایش تعداد مراحل کاهش یابد [۲]. در این راستا در شکل های ۷ تا ۹ ریز ساختار حاصل از نمونه های تولید شده در مراحل مختلف یک تا چهار مرحله نشان داده شده است. با مقایسه این ساختار ها، در بین نمونه تولید شده در یک و دو مرحله، کاهش اندازه دانه با افزایش مراحل مشاهده می شود. اما در شکل شماره ۹ که ساختار نمونه تولید شده در چهار مرحله را نشان می دهد، مشاهده می شود که اندازه دانه ها افزایش یافته است. دلیل اصلی این افزایش را می توان به تبلور مجدد دانه ها ناشی از افزایش دما در طی مدت زمان فرایند و فرصت یافتن نمونه برای ایجاد دانه های جدید نسبت داد [۲]. لازم به ذکر است در سیکل انجام فرایند، در بین مراحل انجام شده نمونه زمان لازم برای سرد شدن را نداشته، بنابراین در بین نمونه های آزمایش شده، نمونه چهار پاسبه بیشترین زمان را در دمای بالا در اختیار داشته است. بنابراین تبلور مجدد دانه ها می تواند فرایندی قابل انتظار باشد.



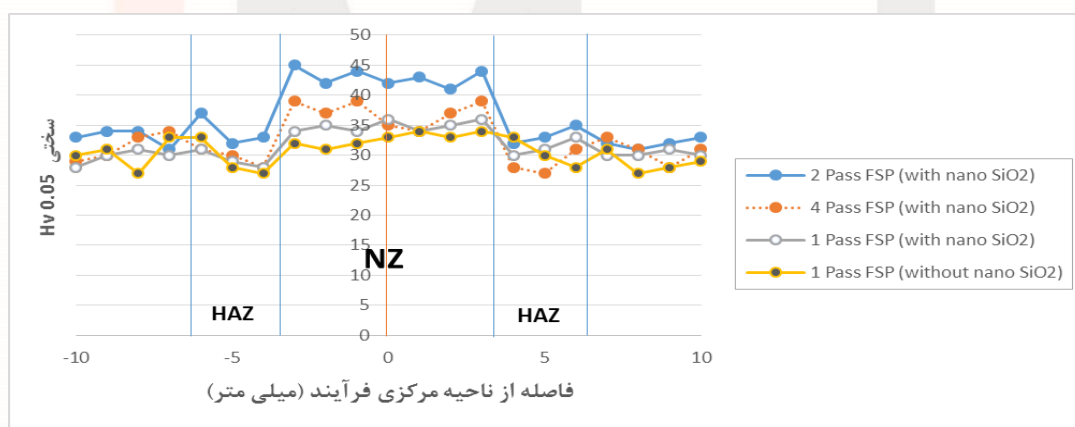
شکل ۹ - ریز ساختار نمونه تولید شده در چهار مرحله

شکل ۸ - ریز ساختار نمونه تولید شده در دو مرحله

شکل ۷ - ریز ساختار نمونه تولید شده در یک مرحله

بررسی ریز سختی نمونه ها

به دلیل تاثیر فرایند اصطکاکی اغتشاشی بر ریز ساختار و خواص نواحی مجاور، بررسی تغییرات ریز سختی در سطح مقطع عرضی نمونه صورت پذیرفت. نواحی گوناگون سطح مقطع نمونه، ۲ میلی‌متر پایین تر از سطح با اعمال نیرو ۵۰ گرم در مدت زمان ۱۰ ثانیه مورد آزمایش قرار گرفت و سختی نسبت به فلز پایه مقایسه گردید. اندازه گیری میکروسختی با فواصل ۱ میلی متر نسبت به خط مرکزی ناحیه فرآوری شده و در دو طرف خط مرکزی انجام شده. نقاط اندازه گیری شده در ناحیه پشروی ابزار که در خلاف جهت دورانی ابزار قرار می‌گیرند با اعداد منفی و نقاط اندازه گیری شده در ناحیه پیشروی ابزار در جهت دورانی ابزار قرار می‌گیرند، با اعداد مثبت در شکل شماره ۱۰ نشان داده شده اند. پس از اندازه گیری میکرو سختی نقاط گوناگون در نمونه‌ها، جهت مقایسه بهتر و بررسی میکرو سختی نواحی گوناگون سطح مقطع، پروفیل سختی مربوط به این پنج نمونه نسبت به خط مرکزی رسم شده است که در شکل شماره ۱۰ قابل مشاهده می‌باشد.

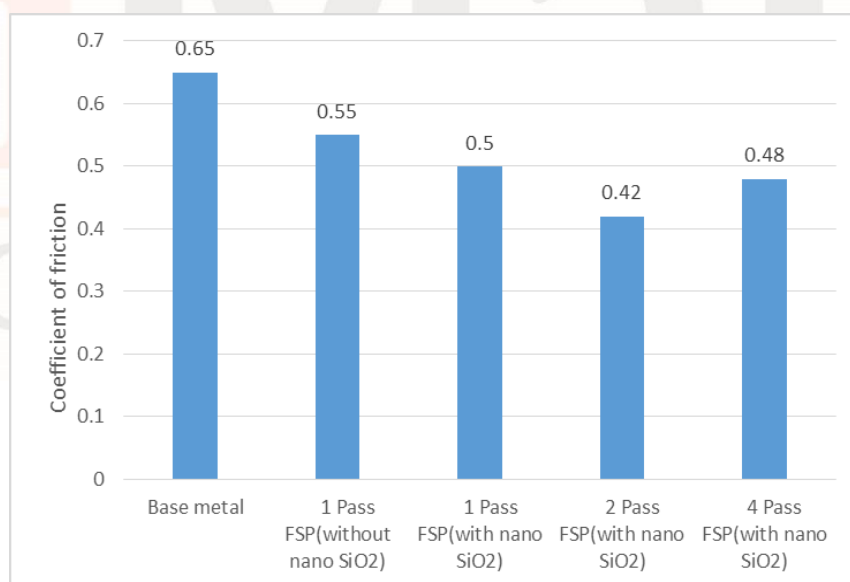


شکل ۱۰ - نمودار تغییرات سختی در نمونه های مختلف نسبت به فاصله آنها از ناحیه مرکزی فرآیند.

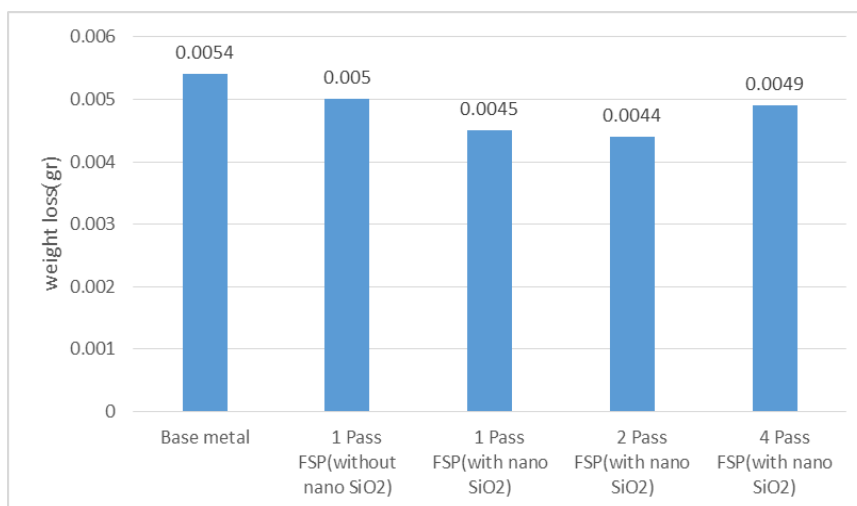
در بررسی تغییرات سختی نمونه ها در شکل شماره ۱۰، همانطور که بر اساس ریزساختار مشاهده شده هم انتظار می‌رفت، نمونه تولید شده در دو مرحله فرایند، بیشترین سختی در منطقه اغتشاش را دارا می‌باشد و نمونه چهار مرحله ای به دلیل افزایش اندازه دانه ها در اثر تبلور مجدد، از سختی به مراتب پایین تری در منطقه مرکزی برخوردار می‌باشد. در مقایسه سختی دو نمونه یک مرحله ای حاوی نانو ذرات سیلیکا و نمونه یک پاس فرایند شده بدون نانو ذرات، مشاهده می‌شود که نمونه فرایند شده با نانو ذرات سیلیکا در ناحیه مرکزی دارای سختی بالاتری نسبت به نمونه بدون نانو ذرات می باشد. این افزایش سختی ناشی از حضور ذرات سخت نانو سیلیکا در زمینه آلومینیومی و همچنین کاهش اندازه دانه زمینه آلومینیومی با وجود نانو ذرات در ساختار و قرارگیری آنها در مزدانه ها و جلوگیری از رشد دانه ها ضمن فرآیند می باشد [۷].

بررسی خواص سایشی نمونه ها

پس از آماده سازی اولیه شامل سمباده زنی و پالیش قطعه کارها، آزمون سایش به وسیله دستگاه سایش سنج از نوع پین روی دیسک با اعمال نیروی یک کیلو گرم روی پین با سرعت سایش ۳۰ متر بر ثانیه در مسافت ۱۰۰ متر برای هر نمونه انجام گرفت. در ناحیه فرآوری شده ضریب اصطکاک نمونه ها مورد ارزیابی قرار گرفت. در شکل شماره ۱۱ میانگین ضریب اصطکاک نمونه ها ی تولیدی در شرایط مختلف با یکدیگر مقایسه شده اند . چنانکه مشاهده می شود میانگین ضریب اصطکاکی بدست آمده برای نمونه دو مرحله ای ۰/۴۲ می باشد که کمترین ضریب اصطکاک را در بین نمونه های آزمایش شده دارا می باشد. همچنین نمودار های ضریب اصطکاک نشان می دهد که نمودار مربوط به نمونه فرایند شده بدون افزودنی نانو سیلیکا در سطح بالاتری نسبت به نمونه فرایند شده همراه افزودنی فوق قرار دارد. در شکل شماره ۱۲ میزان کاهش وزن نمونه ها در طی آزمایش سایش مشاهده می شود، چنانکه ملاحظه می شود، در این میان نمونه دو مرحله فرایند شده با ۰/۰۰۴۴ گرم از کمترین میزان کاهش وزن طی آزمون سایش برخوردار است.

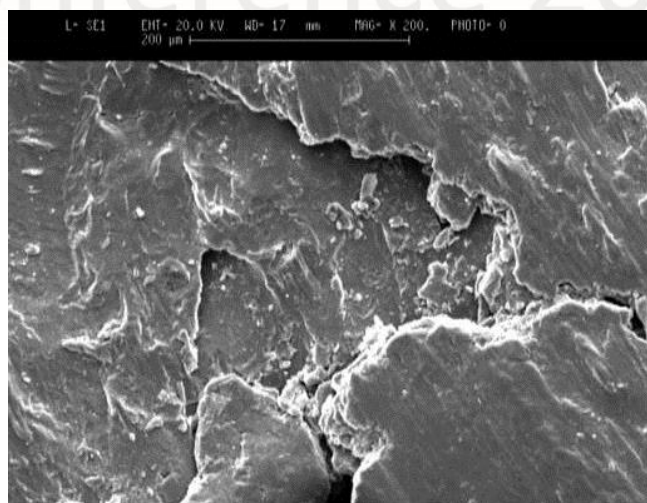


شکل ۱۱ - نمودار تغییرات ضریب اصطکاک نمونه های تولید شده در شرایط مختلف فرآیند.

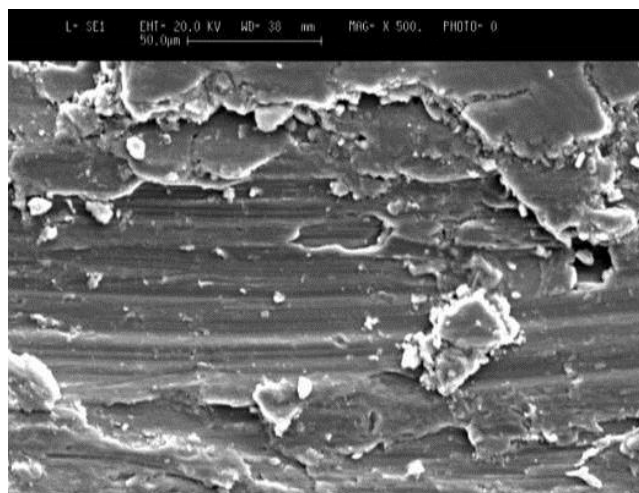


شکل ۱۲ - نمودار تغییرات وزن از دست رفته نمونه های مختلف طی آزمون سایش

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح ساییده شده نمونه آلومینیم خالص بدون انجام فرآیند اصطکاکی اغتشاشی و نمونه کامپوزیتی تولید شده توسط دو مرحله فرآیند فوق به ترتیب در شکل های شماره ۱۳ و ۱۴ نشان داده شده است. با توجه به شکل شماره ۱۳ در نمونه آلومینیم خالص بدون انجام فرآیند اصطکاکی اغتشاشی وجود ورقه های کشیده شده در مسیر سایش مشخصه مکانیزم سایش چسبان می باشد [۶]. اما وجود شیار های موازی در کنار ورقه های کشیده شده ، وجه مشخصه مکانیزم سایش چسبان خراشان می باشد که در شکل شماره ۱۴ برای نمونه کامپوزیتی تولید شده توسط دو مرحله فرآیند قابل مشاهده است. شایان ذکر است که با توجه به وجود ذرات سخت نانو متری در این نمونه و کاهش ضریب اصطکاک ، رخ دادن سایش چسبان خراشان قابل توجیه می باشد [۸].



شکل ۱۳ - تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از مسیر سایش نمونه آلومینیم خالص بدون انجام فرآیند اصطکاکی اغتشاشی



شکل ۱۴- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از مسیر سایش نمونه کامپوزیتی تولید شده توسط دو مرحله فرآیند

نتیجه گیری

با توجه با نتایج حاصل از تحقیق حاضر به اختصار می توان نتایج زیر را بیان نمود:

- ۱- امکان تولید نانو کامپوزیت سطحی آلومینیوم / نانوسیلیکا با استفاده از فرایند اصطکاکی اغتشاشی امکان پذیر می باشد.
- ۲- با انجام فرآیند طی چهار مرحله متوالی ، نانو ذرات به گونه همگن تری نسبت به تعداد مراحل کمتر در فلز پایه توزیع می شوند.
- ۳- در مقایسه ریز ساختار نمونه دو پاسه و چهار پاسه ، نمونه دو پاسه دارای ساختار ریز دانه تر می باشد.
- ۴- نانو ذرات سیلیکا در سطح آلیاژ آلومینیم باعث بهبود سختی سطوح نانو کامپوزیت سطحی، نسبت به فلز پایه گردیده است. در این میان نمونه دو پاسه به دلیل ریز دانه بودن ساختار، دارای سختی ۴۵ ویکرز می باشد، که بیشترین میزان سختی را در بین نمونه ها را دارا است.
- ۵- در نمونه چهار پاسه به دلیل انجام متوالی پاس های فرایند و بالا رفتن دما ضمن آن، پدیده تبلور مجدد دانه ها ایجاد می شود.
- ۶- ضریب اصطکاک در نمونه دو پاسه، ۰/۴۲ می باشد که به میزان ۳۵ درصد نسبت به فلز پایه کاهش داشته است، میزان کاهش وزن ۰/۰۰۴۴ گرم در فرایند سایش نمونه دو پاسه مشاهده شده است که کمترین مقدار را در بین نمونه های مورد آزمایش را دارا می باشد.
- ۷- مکانیزم سایش در آلومینیوم ۱۰۵۰، مکانیزم چسبان بوده که طی در نمونه های کامپوزیتی به مکانیزم چسبان خراشان تبدیل می شود.

منابع

- [1] M. Gui, S. Kang, (2001), "Dry sliding wear behavior of plasma-sprayed aluminum hybrid composite coatings", Metallurgical and Materials Transactions A.vol 32(9), pp. 2383-2392.
- [2] R.S. Mishra, Z.Y. Ma, (2005), "Friction stir welding and processing", Materials Science and Engineering R, vol 50, pp. 1-78.
- [3] Z.Y. Ma, A.L. Pilchak, M.C. Juhas, J.C. Williams, (2008), "Microstructural refinement and property enhancement of cast light alloys via friction stir processing", Scripta Materialia, vol 58, pp. 361-366.
- [4] L.T. Zhuravlev, (2000), "The surface chemistry of amorphous silica. Zhuravlev model", Physicochemical and Engineering, Aspects 173, pp. 1-38.
- [۵] امین ربیعی زاده، احمد افسری، مهرداد محمدی، (۱۳۹۱)، "تولید و بررسی خواص نانو کامپوزیت سطحی آلومینیوم / نانو لوله کربنی (AL-CNT) تولید شده با فرآیند اصطکاکی-اغتشاشی"، مجله مواد نوین، جلد ۳، شماره ۲.
- [6] C.J. Hsu, C.Y. Chang, P.W. Kao, N.J. Ho, C.P. Chang, (2006), "Al-Al₃Ti nanocomposites produced in situ by friction stir processing", Acta Materialia, vol 54, pp. 5241-5249.
- [7] M. A. Meyers, A. Mishra, D. J. Benson, (2006), "Mechanical properties of nanocrystalline materials", Progress in Materials Science, vol 51, pp. 427-556.
- [8] K.J. Bhansali, (1980), "Wear coefficients of hard-surfacing materials", in Wear Control Handbook, M.B. Peterson, and W.O. Winer, ASME, pp. 373-383.