



## بررسی خواص تریبولوژی و سایشی پوشش نانو کامپوزیت هیبریدی ایجاد شده به روش فرآیند اصطکاکی اغتشاشی بر روی ورق های منیزیمی مورد استفاده در صنایع هوایی

سعید اخوان<sup>۱</sup>، احسان شریفی<sup>۲\*</sup>، احمد تحویلین<sup>۳</sup>، سید هادی عبداللهی<sup>۴</sup>، فتح اله کریم زاده<sup>۵</sup>

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد مهندسی مواد، شرکت هواپیماسازی ایران (هسا)

<sup>۲</sup> کارشناسی ارشد مهندسی مواد (محقق)

<sup>۴</sup> کارشناسی ارشد مهندسی مواد

<sup>۵</sup> اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان، استاد دانشکده مهندسی مواد

\* Email: [Ehsan.cer88@yahoo.com](mailto:Ehsan.cer88@yahoo.com)

### چکیده

در این پژوهش از فرآیند اصطکاکی اغتشاشی (FSP) به منظور تولید نانو کامپوزیت هیبریدی به صورت درجا و بر پایه عناصر موجود در سیستم Mg-Al/Ni-O بر سطح ورق منیزیمی Mg-3Al-Zn استفاده شد و خواص سایشی و ریزساختار آن ها مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت. برای این منظور از سرعت چرخشی ۱۲۵۰ دور بر دقیقه و سرعت پیشروی ۴۰ میلیمتر بر دقیقه و پنج پاس فرآیند استفاده شد. نتایج حاصل از اعمال فرآیند بر فلز پایه بدون ذرات تقویت کننده نشان داد که ریزساختار ناحیه اغتشاش آلیاژ مزبور بهبود یافته، به گونه ای که با افزایش پاس های فرآیند، مینگین اندازه در زمینه کاهش چشمگیری داشته است. همچنین انجام این فرآیند منجر به همگن شدن ساختار این ناحیه شده است. از طرف دیگر نتایج بررسی های ریز ساختاری پیرامون نانو کامپوزیت سطحی ایجاد شده در سیستم آلیاژی Mg-Al/Ni-O نشان داد که پس از سه پاس فرآیند، توزیع کاملاً یکنواختی از تقویت کننده ها در زمینه ایجاد شد. بررسی نتایج سایش نشان داد که مقاومت به سایش نمونه نانو کامپوزیتی در سیستم آلیاژی AZ31-Ni-O به مراتب بهتر از فلز پایه است.

واژه های کلیدی: نانو کامپوزیت درجا، منیزیم، تریبولوژی، فرآیند اصطکاکی اغتشاشی

## مقدمه

منیزیم و آلیاژهای آن به دلیل چکالی کم و خواص مکانیکی مناسب در صنایع هوافضا کاربرد وسیعی پیدا کرده اند. در این میان تاریخچه استفاده از منیزیم و آلیاژهای آن در صنایع هوایی به سال ۱۹۳۰ بر می گردد. در شکل ۱ برخی از کاربردهای هوافضایی مربوط به منیزیم و آلیاژهای آن دیده می شود. در شکل ۱ (a) ناحیه های قرمز رنگ موقعیت ترکیبات منیزیم را نشان می دهد. (b) یک گیربکس هواپیما را نشان می دهد. (c) سرویس پنل درب داخلی هواپیما که از آلیاژهای منیزیم ساخته شده است را نشان می دهد. (d) یک هواپیمای آزمایشی است که تماما از منیزیم ساخته شده است [۵].

آلیاژهای منیزیم تقویت شده با ذرات سرامیکی و غیر سرامیکی خواص مکانیکی بسیار مطلوبی را نسبت به آلیاژهای تقویت نشده نشان می دهند و به علت استحکام ویژه بالا و مقاومت به سایش مناسب، به عنوان اجزایی با رفتار سایشی مناسب، در ساخت وسایل حمل و نقل کاربرد ویژه ای دارند. افزودن تقویت کننده به آلیاژهای منیزیم باعث بهبود قابل ملاحظه ای در خواص تریبولوژی این آلیاژها شامل، مقاومت به سایش لغزشی، سایش خراشان و سایش چسبان می شود. بر این اساس کاربرد کامپوزیت ها در صنایع مختلف از جمله نظامی، هوافضا و اتومبیل سازی برای ساخت قطعاتی نظیر پیشانی پیستون، سیلندر، گیربکس و ... که خواص تریبولوژیکی ماده بسیار اهمیت دارد، رو به افزایش است. نتایج تحقیقات نشان می دهد مقاومت به سایش این گروه از مواد به عوامل مختلفی نظیر شکل، اندازه، کسر حجمی و توزیع ذرات تقویت کننده در زمینه و شرایط تریبولوژیکی شامل میزان بار اعمالی، مسافت و سرعت لغزش بستگی دارد [۱].

مطالعاتی که در مراجع مختلف گزارش شده است عمدتا بر این نکته تاکید دارند که اندازه ریز ذرات تقویت کننده، مکانیزم سایش ورقه ای را در کامپوزیت ها به تعویق می اندازد. ورقه ای شدن عمدتا مزایای سختی و استحکام را در کامپوزیت کردن زمینه های فلزی تحت آزمون های سایش لغزشی محدود می کند [۲].

فرآیند اصطکاکی اغتشاشی، توسعه یافته جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی است که برای اولین بار توسط میسرا اختراع شد. این فرآیند یک فرآیند ترمومکانیکال محسوب می شود که برای اصلاح ریزساختار با اقتباس از فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی به وجود آمده است. اساس کار این فرآیند کاملا مشابه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی می باشد با این تفاوت که در جوشکاری هدف اتصال دو قطعه است و ناحیه مورد بررسی فصل مشترک دو قطعه است، اما در فرآیند اصطکاکی اغتشاشی هدف بهبود ریزساختار و ناحیه مورد بررسی، سطح قطعه است [۳ و ۴].

## مواد و روش تحقیق

در این پژوهش نانوکامپوزیتی بر پایه عناصر موجود در سیستم آلیاژی AZ31-Ni-O بر روی ورق منیزیم Mg-3Al-Zn ایجاد شده و با کنترل پارامترهای فرآیند نظیر سرعت چرخشی و تعداد پاس های فرآیند، زمینه ایجاد تقویت کننده های درجا و توزیع یکنواخت آن ها فراهم گردید. آلیاژ کار شده Mg-3Al-Zn به شکل ورقی به ضخامت ۶ میلیمتر و حاوی ۳ درصد وزنی آلومینیوم و حدود یک درصد روی می باشد. جهت تولید نانو کامپوزیت بر ورق مذکور، از پودر اکسید نیکل (NiO) با متوسط اندازه ذرات کمتر از یک میکرون استفاده شد [۴].

جهت اعمال فرآیند، ورق هایی از جنس AZ31-H24 با طول ۲۰ سانتی متر، عرض ۵ سانتی متر و ضخامت ۵ میلیمتر بریده شدند. جهت حرکت ابزار نیز در جهت عمود بر جهت نورد می باشد. جهت حذف اکسیدهای سطحی از برس سیمی استفاده شد. سپس به منظور چربی زدایی، نمونه ها در استون غوطه ور شدند. همچنین جهت انجام فرآیند اصطکاکی اغتشاشی از دستگاه ماشین فرز اصلاح شده که مشخصات آن مطابق جدول ۱ است، استفاده شد. ابزار سخت شده مورد استفاده از جنس فولاد ابزار H13 و با قطر شانه و پین ۱۷ سانتی متر و ۶ میلیمتر می باشد. مطالعات مروری [۶ و ۷] در زمینه FSP/W آلیاژ AZ31 نشان داده است که استفاده از یک ابزار استوانه ای با پین شیاردار بهترین خواص متالورژیکی و مکانیکی را بر روی این آلیاژ ایجاد می کند. لذا در این پژوهش از پینی استوانه ای و رزوه دار با طول ۳ میلیمتر استفاده شد.

فرآیند اصطکاکی اغتشاشی بر روی فلز پایه در دو حالت بدون ذرات تقویت کننده و همراه با ذرات تقویت کننده انجام شد. جهت ایجاد کامپوزیت سطحی، شیاری به عمق ۳ میلیمتر و پهنای ۲ میلیمتر در جهت اعمال فرآیند بر سطح نمونه ها ایجاد شد. پس از اعمال پودر به درون شیار، عملیات فشرده سازی با ابزار مناسبی انجام گرفت. سپس نمونه ها در گیره طراحی شده قرار داده شد. سطح شیار به علت عدم خروج پودر از درون شیار حین اغتشاش پین، با یک ابزار بدون پین با سرعت چرخشی ۱۵۰۰ دور بر دقیقه و سرعت پیشروی ۶۰ میلیمتر بر دقیقه بسته شد. جهت آسان شدن حرکت روبه جلو ابزار، عدم باربرداری و کاهش نیروی وارده بر ابزار، ماشین فرآیند به گونه ای تنظیم شد تا ابزار نسبت به ورق زاویه ۸۷ درجه داشته باشد.

## نتایج و بحث

در این پژوهش نانو کامپوزیت هیبریدی درجا، تقویت شده با ترکیبات حاصل از واکنش میان عناصر موجود در سیستم آلیاژی Mg-Al/Ni-O بر آلیاژ Mg-3Al-Zn ایجاد و ریزساختار و خواص سایشی آن مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این پژوهش از میکروسکوپ نوری و الکترونی جهت بررسی ریزساختار ناحیه اغتشاش آلیاژ مزبور استفاده شد. ریز ساختار فلز پایه در شکل ۲ ارائه شده است. با دقت در این شکل ملاحظه می گردد که فلز دارای اندازه دانه های متنوع با میانگین اندازه ۲۰ میکرون می باشد.

شکل ۳ ریزساختار ناحیه اغتشاش فلز پایه را پس از یک، سه و پنج پاس فرآیند اصطکاکای اغتشاشی نشان می دهد. همانگونه که ملاحظه می شود، اعمال فرآیند اصطکاکای اغتشاشی منجر به بهبود و اصلاح ریزساختار از همان شروع فرآیند (پاس های اولیه) شده است. همچنین با افزایش پاس های فرآیند، از یک طرف ریزساختار همگن تر می شود و از طرف دیگر میانگین اندازه دانه زمینه کاهش می یابد. تنش و کرنش اعمالی بر فلز پایه حین فرآیند اصطکاکای اغتشاشی و دمای ناشی از اصطکاک میان ابزار و سطح قطعه کار منجر به فعال شدن مکانیزم های تبلور مجدد دینامیکی و به تبع آن اصلاح ریزساختار و کاهش اندازه دانه پس از اعمال فرآیند FSP می شود. یکی دیگر از مشخصه های بارز در فرآیند اصطکاکای اغتشاشی ایجاد ناحیه های لایه ای موسوم به پوسته پیازی<sup>۱</sup> است [۸]. این باندها به دلیل جریان ماده از ناحیه گرم به ناحیه سردتر در عمق می باشد. فاصله بین لایه های پوست پیازی با افزایش سرعت چرخشی، کاهش می یابد. لایه های پی در پی از وجود یا عدم وجود ذرات تقویت کننده در شکل ۴ نشان داده شده است. در شکل ۵ مقطع عرضی ناحیه اغتشاش پس از سه پاس فرآیند اصطکاکای اغتشاشی نشان داده شده است. با توجه به این شکل، پس از سه پاس فرآیند، توزیع بسیار یکنواختی از ذرات تقویت کننده در زمینه ایجاد شده است. تغییر شکل پلاستیک شدید در هر پاس منجر به توزیع ذرات در زمینه می شود، به طوریکه پس از پاس سوم، توزیع کاملاً یکنواختی از ذرات در زمینه ایجاد می گردد [۹].

نمودار کاهش وزن بر حسب مسافت طی شده برای نمونه های فلز پایه و نانو کامپوزیت سطحی Mg-NiO طی بارهای ۱۰ و ۴۰ نیوتن در شکل ۶ نشان داده شده است. با مقایسه این نمودار های مربوط به فلز پایه و نانو کامپوزیت مشاهده می شود طی بار ۱۰ نیوتن، میزان کاهش وزن نانو کامپوزیت اندکی از فلز پایه کمتر می باشد. در حالی که در بار ۴۰ نیوتن تفاوت بسیاری در میزان کاهش وزن دو نمونه مشاهده می گردد. در شکل ۷ نمودارهای نرخ سایش بر حسب مسافت طی شده برای نمونه های فلز پایه و نانو کامپوزیت نشان داده شده است. همانطور که در این شکل دیده می شود، در با عمودی ۱۰ نیوتن و مسافت ۱۰۰ متر، میزان نرخ سایش برای نمونه ها بیشترین مقدار است. در مسافت های ابتدایی ناهمگونی های سطحی دو قطعه درگیر شده، تغییر شکل داده و از سطح جدا می شوند. پس از اینکه سطوح در مقابل یکدیگر سازگاری لازم را به دست آوردند و به عبارت دیگر، درگیری های مکانیکی ناهمگونی های سطحی را کاهش داد، نرخ سایش پایدار خواهد شد. پس از مسافت ۱۰۰ متر در هر دو نمونه، نرخ سایش با افزایش مسافت کاهش یافته و به یک حالت پایدار می رسد [۱۰]. همانطور که ملاحظه می شود در بار عمودی ۱۰ نیوتن میزان تفاوت در نرخ سایش برای نمونه های فلز پایه و نانو کامپوزیت سطحی، ناچیز است. طی لغزش، فعل و انفعال نابه جایی ها در لایه های سطحی می تواند منجر به افزایش چگالی نابه جایی ها و ایجاد تنش در جهت مخالف لغزش (backing stress) و در نهایت ترویج استحکام دهی توسط نابه جایی ها در نمونه بدون ذرات تقویت کننده شود. در حالتی که میزان بار اعمالی کمتر

<sup>1</sup> Onion rings

از تنش برشی نمونه باشد، نرخ سایش کاهش خواهد یافت. بنابراین ایجاد نرخ سایش پایدار در نمونه فلز پایه طی بار عمودی ۱۰ نیوتن را می توان به کار سختی نمونه طی حرکت لغزشی بین ارتباط داد. از طرف دیگر در نمونه کامپوزیتی به دلیل نقش ذرات تقویت کننده در افزایش سختی، استحکام برشی و کششی و همچنین مدول الاستیک، میزان کاهش در نرخ سایش و پایدار شدن آن طی بار عمودی ۱۰ نیوتن قابل توجه می باشد. به عبارت دیگر طبق رابطه آرچارد، افزایش سختی می تواند به عنوان یک راه حل جهت بهبود خواص سایشی مطرح باشد. همچنین در شکل ۷ دیده می شود با افزایش بار عمودی تا ۴۰ نیوتن، نرخ سایش فلز پایه و نانو کامپوزیتی نسبت به بار عمودی ۱۰ نیوتن افزایش پیدا کرده است. با مقایسه نمودارهای مربوط به این دو نمونه مشاهده می شود که نرخ سایش در نمونه نانو کامپوزیتی بسیار کمتر از فلز پایه می باشد. نرخ سایش این نمونه نانو کامپوزیتی با افزایش مسافت به یک حالت پایدار می رسد، درحالی که در نمونه فلز پایه با افزایش مسافت، نرخ سایش روندی صعودی دارد.

حرکت لغزشی بین باعث ایجاد نابه جایی ها در لایه های سطحی و افزایش استحکام ناشی از کارسختی می شود. در صورتی که بار اعمالی بر نمونه از یک میزان بیشتر باشد، بر تنش برگشتی ناشی از شبکه نابه جایی ها غلبه کرده و پدیده نرم شدن زمینه را به دنبال خواهد داشت. این امر باعث افزایش نرخ سایش در فلز پایه در مسافت های بالاتر خواهد شد. به عبارت دیگر *work softening* بر *work hardening* غلبه کرده و نرخ سایش را در فلز پایه طی بار عمودی ۴۰ نیوتن و افزایش مسافت، افزایش می دهد. در نمونه نانو کامپوزیتی در بار اعمالی ۴۰ نیوتن نرخ سایش به مراتب کمتر از فلز پایه می باشد. همچنین در این نمونه با افزایش مسافت، نرخ سایش به حالت پایدار رسیده است. مطالعات نشان داد که پدیده کار سختی در نمونه های کامپوزیتی به دلیل وجود منابع فرانک-رید زیاد جهت تکثیر نابه جایی ها بیشتر است. لذا شدت کارسختی در این نمونه بیشتر از فلز پایه خواهد بود. از طرف دیگر طبق معادله آرچارد، با افزایش سختی، میزان دمای ایجاد شده در فصل مشترک دو جسم در تماس یکدیگر کمتر است. لذا پدیده نرم شدن به دلیل بازیابی دینامیکی نابه جایی ها در نمونه های کامپوزیتی در بارهای اعمالی بالا کمتر است. به بیان دیگر ثابت ماندن نرخ سایش با افزایش مسافت در نمونه های نانو کامپوزیت سطحی نشان از ظرفیت بالای آن جهت مقابله با نرم شدن دارد. علاوه بر نقش ذرات تقویت کننده در افزایش استحکام و سختی، این ذرات به دلیل تحمل بیشتر بارهای اعمالی و تاثیر بر توقف سیلان پلاستیک و چسبندگی زمینه باعث کاهش شدید در نرخ سایش خواهند شد. در واقع ذرات تقویت کننده به عنوان حامل نیرو عمل کرده و به دلیل سختی بالا و کاهش بسیار زیاد که در نیروی مستقیم میان پین فولادی و زمینه منیزیمی ایجاد می کنند، باعث بهبود فوق العاده در خواص سایشی به خصوص در نیروهای اعمالی بالا می شوند. در این پژوهش از میکروسکوپ الکترونی روبشی به منظور بررسی سطوح سایش نمونه ها و تحلیل مکانیزم های حاکم بر سایش استفاده شد. شکل های ۸ و ۹ سطوح سایش مربوط به نمونه های فلز پایه و نانو کامپوزیت سطحی را در بار ۱۰ نیوتن و پس از مسافت ۱۰۰۰ متر نشان می دهد. با دقت در سطح سایش نمونه فلز پایه می توان وجود شیارهای عمیق در راستای لغزش را به روشنی ملاحظه نمود. این شیارها طی

حرکت لغزشی یک جسم سخت و یا یک ذره سخت، میان پین و دیسک ایجاد می شوند. این مطلب در رابطه با نمونه نانو کامپوزیت سطحی از شدت کمتری برخوردار است. این تصاویر به طور برجسته رخداد سایش خراشان در هر دو نمونه را تایید می کند. به منظور بررسی دقیق تر مکانیزم حاکم بر سایش، تصویر ذرات سایشی فلز پایه در هر بار ۱۰ نیوتن در شکل ۱۰ ارائه شده است. وجود شیارهای عمیق، ذرات ریز کنده شده و ذرات سایشی طولیل تاییدی از رخداد پدیده سایش خراشان با مکانیزم های خیش<sup>۱</sup> یا wedge forming<sup>۲</sup> و برش<sup>۲</sup> می باشد. معمولاً سایش خراشان از نوع خیش ریز در نیروهای کم اتفاق می افتد. در این حالت خراش باعث کنده شدن ماده نمی گردد و تنها ماده در سطح جابه جا می شود و به طور مرتب به صورت برآمدگی هایی در دو طرف شیار انباشته می گردد. در این حالت هیچ کاهش وزن ماده ای رخ نمی دهد. این درحالی است که در سایش خراشان با مکانیزم برش، عمل برش توسط ماده ساینده موجب ایجاد ذره سایش طولیل می گردد. وجود شیارهایی بر سطح ذرات سایش و در راستای جهت لغزش نشان می دهد که ابتدا در فلز پایه، رخداد سایش خراشان با مکانیزم خیش اتفاق افتاده. سپس به دلیل تجمع نابه جایی ها پدیده کارسرد در نزدیکی سطح ماده ایجاد می شود. با ادامه لغزش بر روی این سطوح کارسرد شده، مکانیزم سایش خراشان تغییر کرده و مکانیزم های wedge forming<sup>۲</sup> و برش به ترتیب منجر به ایجاد ذرات سایشی ریز و ذرات سایش کشیده می گردد. تصاویر بدست آمده از سطح سایش و ذرات سایشی فلز پایه در بار ۴۰ نیوتن به ترتیب در شکل های ۱۱ و ۱۲ ارائه شده است. با دقت در شکل ۱۱ وجود آثار کندگی عمیق در سطح سایش به روشنی ملاحظه می گردد. در اینجا می توان با استفاده از تصویر ذرات سایشی به بررسی دقیق تر مکانیزم حاکم بر سایش پرداخت. در مورد ذرات سایش حاصل از نمونه فلز پایه ملاحظه می گردد که ذرات سایشی عموماً به شکل تراشه ای بزرگ می باشند. حضور آثار خراشیدگی در تصاویر میکروسکوپ الکترونی حاصل از ذرات سایش و حفره های پراکنده در سطوح این ذرات، دلیل بر نقش داشتن مکانیزم خراشان در سایش نمونه ها است. از طرف دیگر برخی از ذرات سایش مربوط به این نمونه به صورت تک لایه و ورقه های بسیار نازک می باشند که وجود ترک هایی بر سطح آن ها که از عمق به سطح رسیده اند، ملاحظه می گردد. وجود این نوع ذرات سایشی تاییدی بر رخداد سایش ورقه ای می باشد.

### نتیجه گیری

در این پژوهش با انجام فرآیند اصطکاکی اغتشاشی، نانو کامپوزیت سطحی بر پایه عناصر موجود در سیستم آلیاژی AZ31-Ni-O به صورت درجا بر سطح آلیاژ Mg-3Al-Zn ایجاد و سپس ریزساختار و خواص سایشی آن ها مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت.

<sup>۱</sup> ploughing

<sup>۲</sup> cutting

نتایج بررسی از ناحیه کامپوزیتی نشان داد که اعمال فرآیند اصطکاکی اغتشاشی با سرعت چرخشی ابزار حدود ۱۲۵۰ دور بر دقیقه، سرعت پیشروی معادل ۴۰ میلی‌متر بر دقیقه و ۵ پاس فرآیند منجر به بهترین توزیع ذرات تقویت کننده در زمینه خواهد شد.

در اثر اعمال فرآیند اصطکاکی اغتشاشی بر سطح فلز پایه بدون ذرات تقویت کننده، میانگین اندازه دانه از ۲۲ میکرون به حدود ۱۰ و ۴/۵ میکرون پس از یک و پنج پاس فرآیند، رسید. علت اصلی در ریز شدن دانه ها در ناحیه اغتشاش، وقوع پدیده تبلور مجدد دینامیکی در خلال تغییر شکل پلاستیک شدید و گرمای اصطکاک می باشد.

نتایج بررسی های ریز ساختاری توسط میکروسکوپ الکترونی نشان داد که ناحیه اغتشاش ایجاد شده پس از سه پاس فرآیند شامل توزیع بسیار یکنواختی از تقویت کننده های ایجاد شده به صورت درجا می باشد.

نتایج آزمون سایش در بار اعمالی ۱۰ نیوتن نشان داد که نرخ سایش برای نمونه نانو کامپوزیت سطحی حاوی ذرات تقویت کننده در سیستم آلیاژی AZ31-NiO اندکی بیشتر از فلز پایه می باشد. در واقع طی حرکت لغزشی بین در این بار پدیده کارسختی اتفاق می افتد که منجر به افزایش مقاومت به سایش هر دو نمونه با افزایش مسافت می گردد. این در حالی است که در بار اعمالی ۴۰ نیوتن نرخ سایشی فلز پایه به شدت از نمونه نانو کامپوزیتی بیشتر است. به گونه ای که در نمونه فلز پایه با افزایش مسافت لغزشی، نرخ سایش روند صعودی دارد. در حالی که نرخ سایش در نمونه نانو کامپوزیتی با افزایش مسافت به حالت پایدار رسیده است. بررسی تصاویر میکروسکوپ الکترونی از سطوح و ذرات سایشی نشان داد که مکانیزم حاکم بر سایش فلز پایه در بار اعمالی ۴۰ نیوتن، ترکیبی از رخداد سایش خراشان از نوع خستگی و پدیده ورقه ای شدن می باشد. در صورتی که در نمونه نانو کامپوزیتی تحت همین بار رخداد سایش خراشان از نوع خیش ریز به همراه پدیده ورقه ای شدن، مکانیزم حاکم بر سایش می باشد.

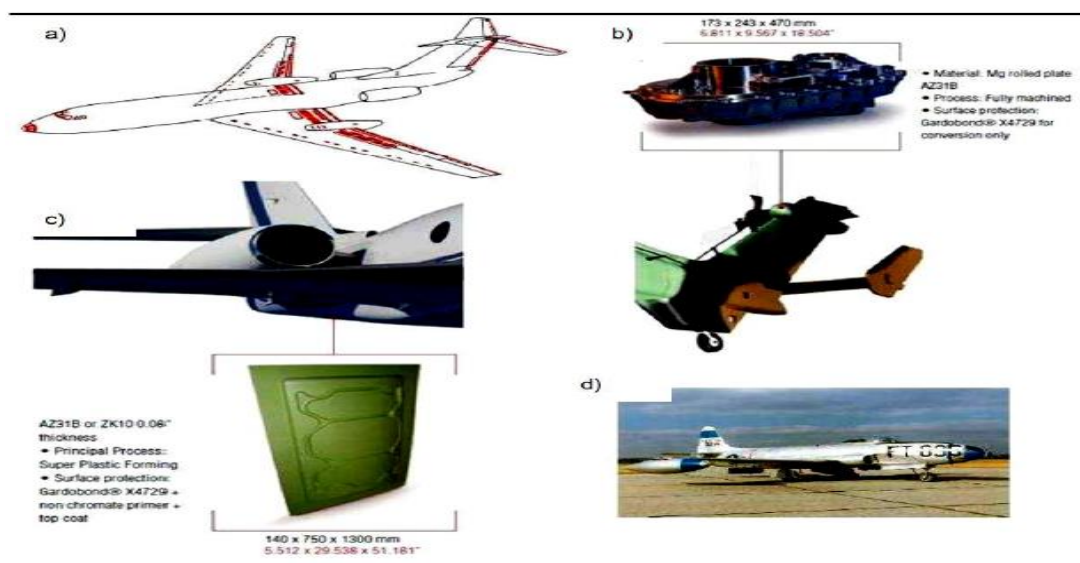
## مراجع

- [1] T. Seidel, A. Reynolds, "visualization of the material flow in AA2195 friction-stir welds using a marker insert technique", *Journal of Metal Matter Trans A.*, Vol. 31, pp. 2879, 2001.
- [2] KN. Krishnan, "On the formation of onion rings in friction stir welds", *Mater Sci Eng A*, Vol. 327, pp. 246-451, 2002.
- [3] Sun, Q.Y. Shi, Y.J. Sun, G.Q. Chen, " Microstructure and mechanical property of nano-SiCp reinforced high strength Mg bulk composites produced by friction stir processing", *Journal of Materials Science and Engineering A*, Vol. 547, pp. 32- 37, 2012.
- [4] S. Gwidon, *Wear Materials: Mechanisms and practice*, John Wiley, New York, 2005
- [5] P.D. Edwards, D.G. Sanders, M. Ramulu, T. Trapp, P. Comley, "Thinning behavior simulations in superplastic forming of friction stir processed titanium 6Al-4V", *Journal of Material Engineering and Performance.*, vol. 19, pp. 481-487, 2010

- [6] R.S. Mishra, Z.Y Ma., I Charit., "Friction stir processing: a novel technique for fabrication of surface composite" ., *Journal of Materials Science and Engineering.*, Vol. 341., pp. 307-310., 2003.
- [7] C. Jun, Z.Ming, L. Dong, M. Ying, H Yuan, "Friction stir processing of thixoformed AZ91D magnesium alloy and fabrication of Al-rich surface", *Journal of Trans. Nonferrous Met.*, China 20, pp. 34-42, 2010.
- [8] C. Lee, J. Huang, P. Hsieh, "Mg-based nano-composites fabricated by FSP", *Journal of Scripta Materialia.*, Vol. 54, pp. 1415, 2006.
- [9] Y.K. Gao, " surface modification of TA2 pure titanium by low energy high current pulsed electron beam treatments", *Journal of Scripta Materialia.*, Vol. 257, pp. 7455-7460, 2011.
- [10] T. Murakami, S. Sasaki, " Microstructure and tribological properties of Fe-Mo alloy-coated steel specimens prepared by low-pressure plasma spraying", *Journal of Scripta Materialia*, Vol. 19, pp. 1873-1877, 2011.

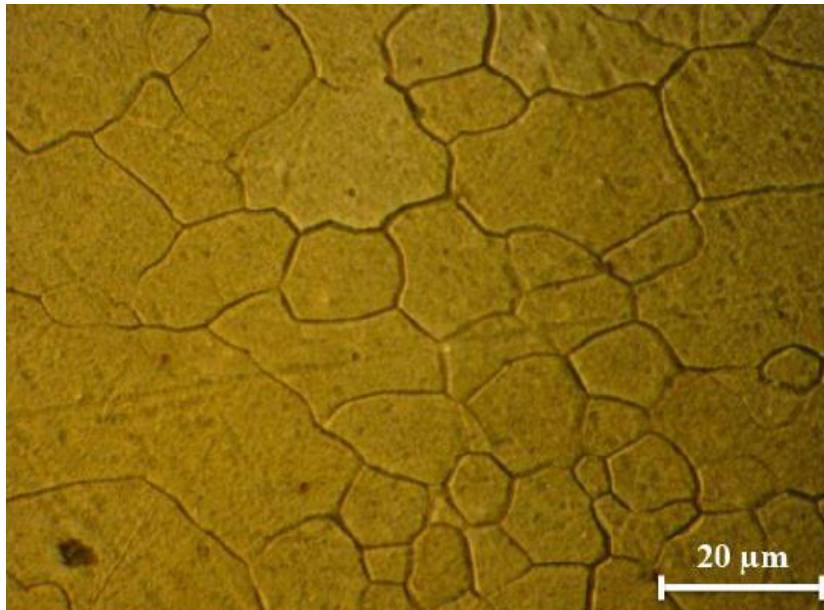
جدول ۱: مشخصات دستگاه فرآیند اصطکاکی اغتشاشی

توان موتور اصلی	۲ اسب بخار
سرعت دورانی	۴۰ تا ۲۰۰۰ دور بر دقیقه
توان موتور محرک میز کار	۲ اسب بخار
سرعت پیشروی میز کار	۳۰ تا ۶۰۰ میلیمتر بر دقیقه
زاویه چرخش فک نسبت به میز کار	۰ تا ۹۰

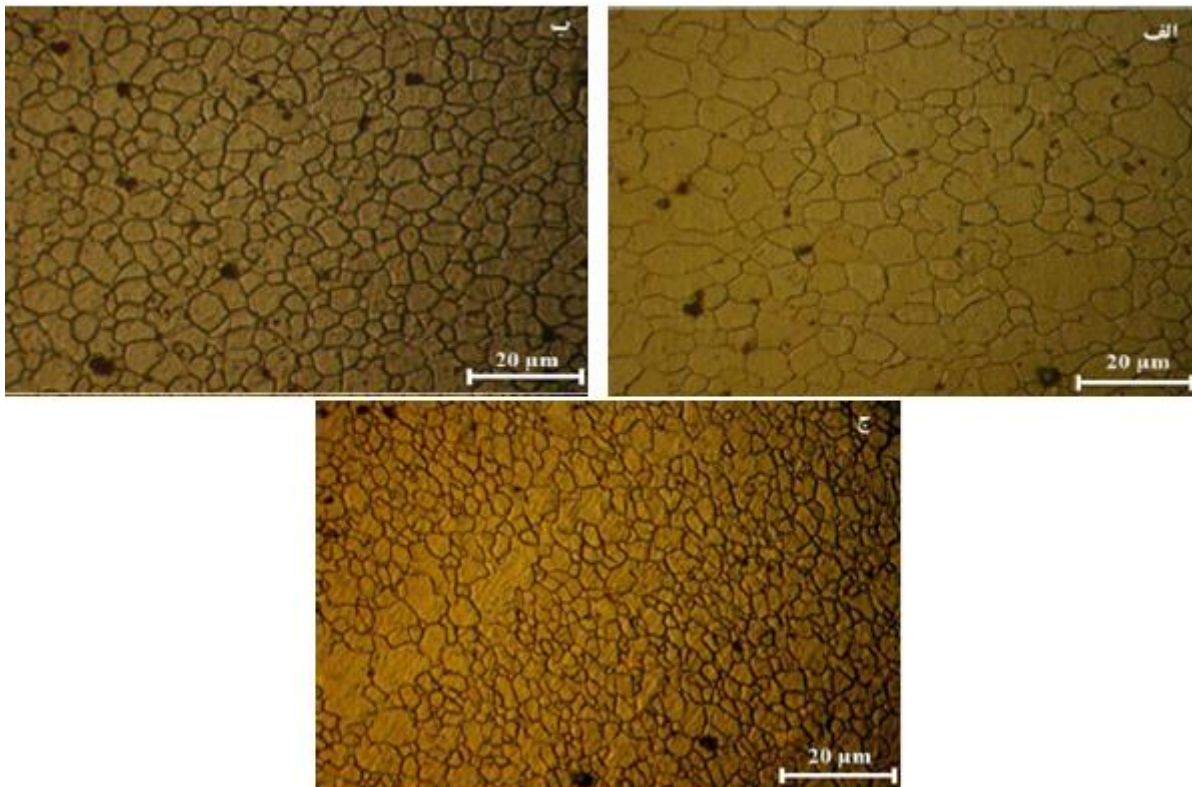


شکل ۱: کاربرد منیزیم در صنایع هوایی

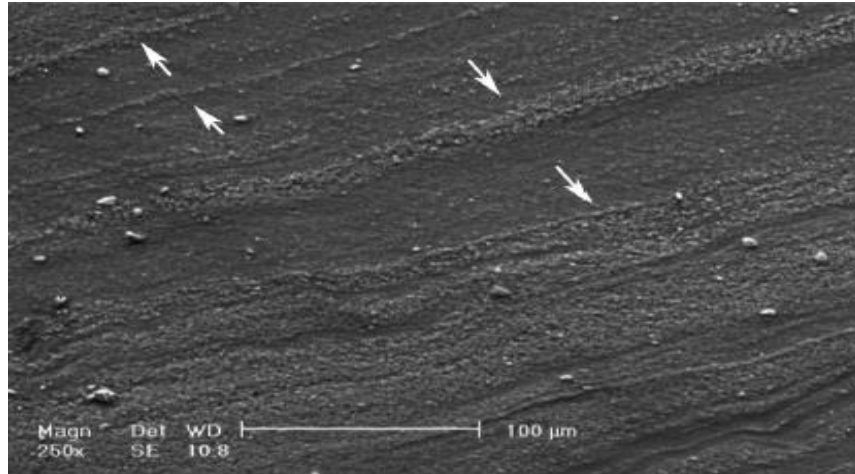




شکل ۲: ریزساختار فلز پایه

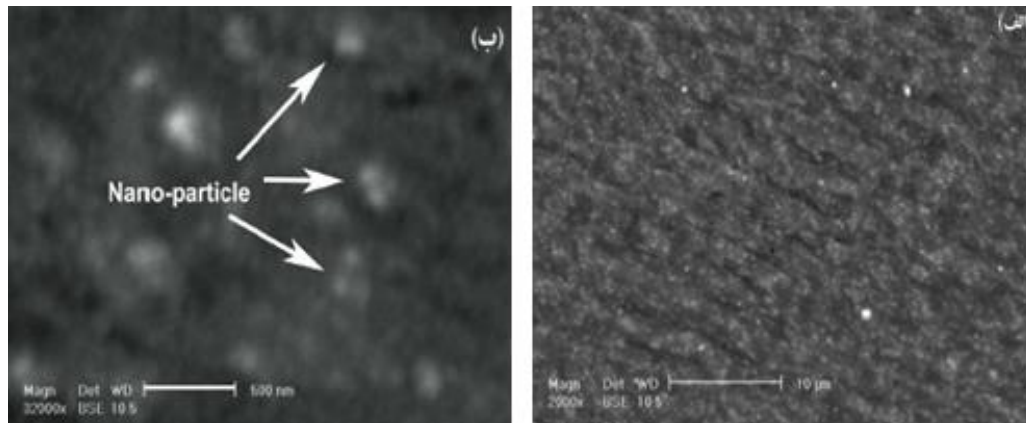


شکل ۳: ریزساختار ناحیه اغتشاش فلز پایه، الف) یک پاس ب) سه پاس ج) پنج پاس فرآیند

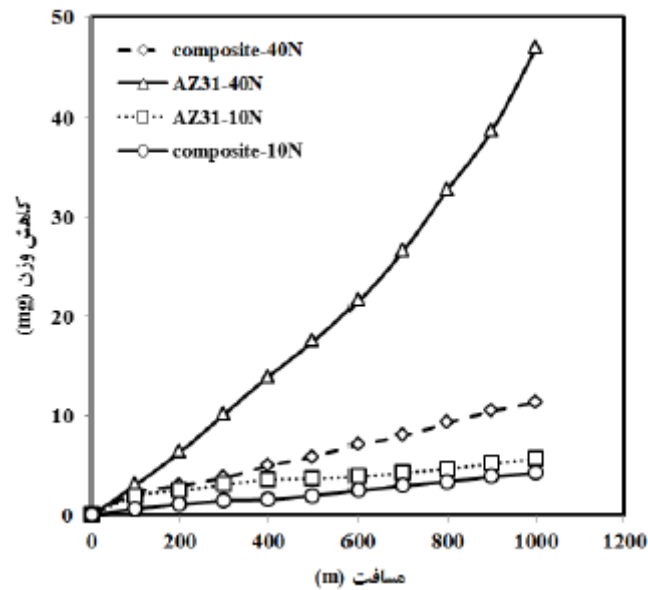


شکل ۴: وجود لایه هایی از وجود و عدم وجود ذرات تقویت کننده در سرعت چرخشی ۱۲۵۰ دور بر دقیقه طی یک

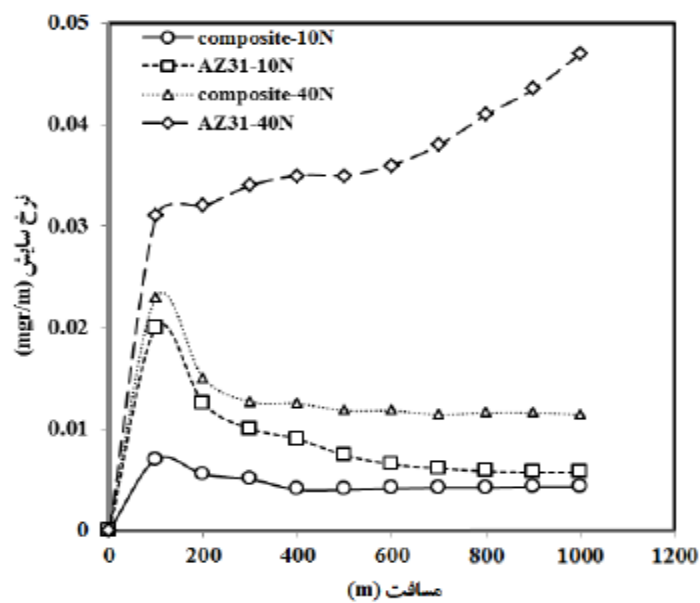
پاس



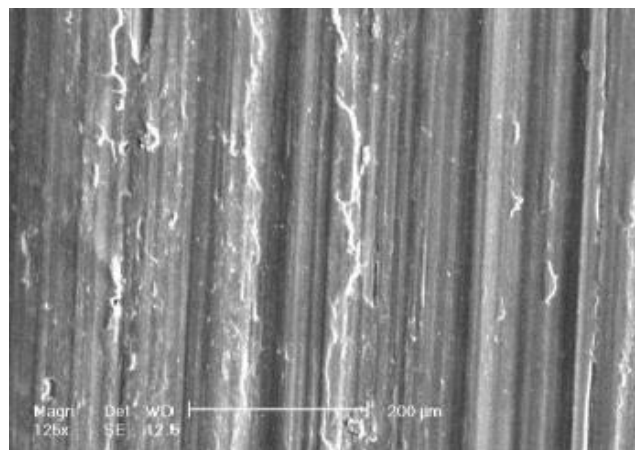
شکل ۵: الف) مقطع عرضی ناحیه اغتشاش پس از سه پاس ب) بزرگنمایی بیشتر



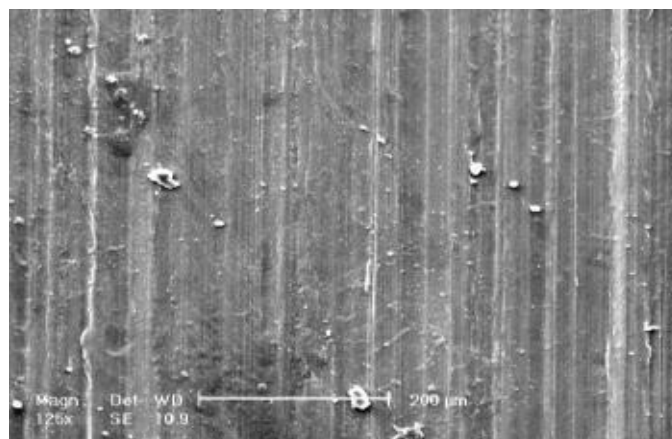
شکل ۶: نمودار کاهش وزن نمونه های کامپوزیتی و فلز پایه



شکل ۷: نرخ سایش برای نمونه های کامپوزیتی و فلز پایه



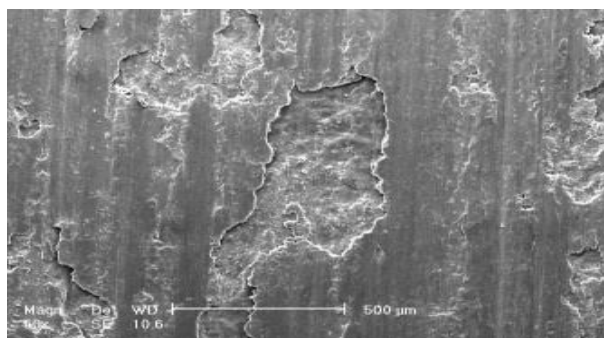
شکل ۸: سطح سایش فلز پایه در بار ۱۰ نیوتن پس از طی مسافت ۱۰۰۰ متر



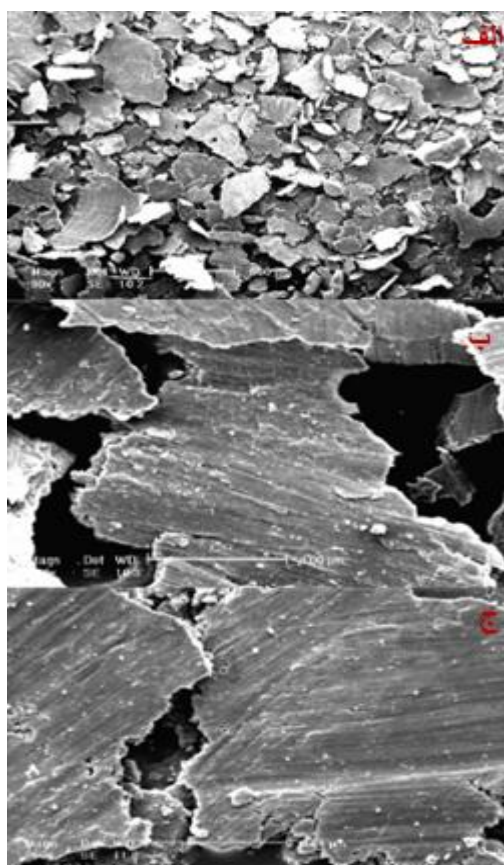
شکل ۹: سطح سایش نمونه نانو کامپوزیتی در بار ۱۰ نیوتن و پس از طی مسافت ۱۰۰۰ متر



شکل ۱۰: ذرات سایش نمونه فلز پایه در بار ۱۰ نیوتن پس از طی مسافت ۱۰۰۰ متر



شکل ۱۱: سطح سایش فلز پایه در بار ۴۰ نیوتن پس از طی مسافت ۱۰۰۰ متر



شکل ۱۲: الف) ذرات سایش نمونه فلز پایه در بار ۴۰ نیوتن پس از مسافت ۱۰۰۰ متر (ب) ذرات ناشی از رخداد

سایش خراشان با مکانیزم خستگی (ج) ذرات ناشی از رخداد سایش ورقه ای