



بررسی تاثیرات فرایند اصطکاکی همزننده بر خواص مکانیکی و تریبولوژی لایه کامپوزیت سطحی آلیاژ منیزیم AZ91

مصطفی دادایی دهکردی^۱، محمد لطفی^۲، بهمن چشفر^۱، حمید امیدوار^۳

۱. شرکت ورق خودرو چهارمحال و بختیاری (کارشناسی ارشد مهندسی مواد)

۲. شرکت آتیه سازان نگین فراز (کارشناسی مهندسی مکانیک)

۳. دانشیار دانشگاه صنعتی امیرکبیر (دکترای مهندسی مواد)

چکیده

در این تحقیق، به بررسی خواص مکانیکی و سایشی لایه کامپوزیت سطحی آلیاژ ریختگی AZ91 به همراه نانوذرات اکسید آلومینیوم و کاربید سیلیسیم تولید شده با استفاده از فرایند اصطکاکی همزننده پرداخته شد. تاثیرات نانوذرات مختلف بر اندازه دانه، میکروساختار، میکروسختی، خواص مکانیکی و سایشی در آلیاژ AZ91 مورد بررسی قرار گرفت.

بهترین توزیع ذرات تقویت کننده منجر به اندازه دانه کوچکتر، سختی و استحکام تسلیم و کششی بالاتر در لایه-های کامپوزیتی و در نتیجه بهبود مقاومت سایش می شود. سختی بالاتر AZ91-SiC نسبت به AZ91 باعث نرخ سایش کمتر در نمونه SiC می شود. همچنین مشاهده شد که مقاومت به سایش مواد با افزایش مقادیر سختی بالا می رود. به طور کلی با افزودن ذرات تقویت کننده، مقاومت سایش افزایش می یابد که این مستقیماً با بهبود سختی و استحکام کامپوزیت ها با سطح تقویت کننده در ارتباط می باشد.

واژه های کلیدی: فرایند اصطکاکی اغتشاشی، تبلور مجدد، نانو کامپوزیت، خواص سایشی.

مقدمه

آلیاژهای منیزیم دارای خواص ویژه ای می باشند که باعث شده این آلیاژها جز مواد استراتژیک محسوب گردند [۱]. علت عمده مورد توجه قرار گرفتن این آلیاژها، استحکام و سختی بالا و چگالی پایین در دمای اتاق می باشد [۲]. در میان آلیاژهای منیزیم، آلیاژ AZ91 یکی از پرکاربردترین آنهاست که در مقیاس صنعتی و تجاری بکار می رود و در جایی که نیاز به استحکام، داکتیلیته و مقاومت به خزش باشد مورد استفاده قرار می گیرد. این آلیاژ خواص مکانیکی خوب، قابلیت ریختگی عالی و مقاومت به خوردگی را دارد [۳].

کامپوزیت های زمینه منیزیمی، نسبت به فلز پایه دارای خواص مکانیکی بهتری هستند [۴ و ۵]. اخیراً کامپوزیت های سطحی به دلیل اینکه باعث بهبود خواص مکانیکی سطحی بدون تغییر میکروساختار و خواص فلز پایه می باشند کاربردهای زیادی پیدا کرده اند. روش های مختلفی برای تولید کامپوزیت های سطحی وجود دارد، که در این مقاله فرایند اغتشاشی اصطکاکی (FSP) مورد بررسی قرار می گیرد. این فرایند به عنوان روشی برای اصلاح ریزساختار فلزات ابداع شد [۶]. در این روش تغییر شکل پلاستیکی شدید مواد ناشی از چرخش و حرکت پین ایجاد می گردد که منجر به ایجاد ساختار تبلور مجدد یافته ای شده که در آن رسوبات حل می شوند [۷]. با انتخاب مناسب پارامترهای فرایند و کنترل دمای قطعه، به موازات انجام فرایند می توان به دانه هایی با اندازه کوچک دست یافت. مطالعاتی در خصوص تأثیر سرعت دورانی و خطی بر تاریخچه دمایی صورت پذیرفت [۶]. یوآن و میشر^۲ تأثیر اندازه دانه AZ31 حاصله از FSP را بر خواص مکانیکی و تغییرات بافت مورد مطالعه قرار دادند [۸]. همچنین فرآیند FSP همراه با کاهش سریع دما به طور موفقیت آمیزی به منظور ایجاد ریزساختار، در آلیاژ AZ31 استفاده شد [۹]. دادایی و همکاران در تحقیقی به بررسی تأثیر فرایند FSP با استفاده از نانوذرات SiC و Al₂O₃ بر روی آلیاژ AZ91 پرداختند و مشاهده نمودند که این ذرات بر روی کاهش اندازه دانه ها تأثیر می گذارند و سختی را افزایش و خواص مکانیکی را بهبود می بخشد. آنها همچنین گزارش کردند که ذرات SiC سختی و مقاومت مکانیکی بیشتری نسبت به ذرات Al₂O₃ ایجاد می نمایند [۱۰].

مواد و روش تحقیق

ماده مورد مطالعه در این تحقیق آلیاژ منیزیم AZ91 می باشد که ترکیب شیمیایی آن در جدول (۱) بیان می گردد. جهت ساخت نمونه های کامپوزیتی، شیاری به عمق ۲mm و عرض ۱mm و طول ۱۰۰mm در سطح نمونه های AZ91 ایجاد می شود. شیاریها توسط نانوذرات (به اندازه دانه 30nm) کاربید سیلیسیم (SiC) و یا اکسید آلومینیوم (Al₂O₃) به مقدار 0.63g پر شده و سطح شیاری توسط ابزار بدون پین بسته می شود. در این تحقیق از پین استوانه ای رزوه دار با قطر شان، قطر پین، ارتفاع پین و گام رزوه به ترتیب ۱۸، ۶، ۴ و ۳ میلی متر با سختی ۶۰ را کول C استفاده گردید. تعداد پاس ها از یک تا چهار انتخاب شد. جهت دوران ابزار هم در پاس اول

1. Friction Stir Processing

2. Yuan And Mishra

ساعتگرد و در هر پاس تغییر می کرد. در پاس اول از سرعت دورانی ۱۴۰۰ rpm و سرعت پیشروی mm/min ۳۰ و در پاس دوم به بعد از سرعت دورانی ۹۵۰ rpm و سرعت پیشروی mm/min ۴۲ استفاده شد. برای بررسی تاثیر خنک کار از مخلوط یخ خشک و اتانول استفاده گردید.

جهت انجام مطالعات ریزساختاری از میکروسکوپ نوری (OM)، میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی (FESEM) استفاده شد. جهت بررسی خواص مکانیکی نمونه‌های کشش به صورت طولی از ناحیه FSP شده طبق استاندارد زیراندازه ASTM E8 با نرخ کرنش 10^{-5} - 10^{-6} تهیه شدند، میکروسختی نمونه‌ها توسط دستگاه ریزسختی سنج با اعمال بار ۱۰۰ g در مدت ۱۰ ثانیه اندازه گیری شد. نمونه‌های تست سایش بر اساس استاندارد ASTM G 99 ساخته شدند. روش مورد استفاده روش پین بر روی دیسک بود. تست سایش بر روی نمونه‌های FSP شده به همراه نانو ذرات انجام گردید. پین مورد استفاده دارای قطر ۵ mm و طول ۴۰ mm (از سطح نمونه FSP شده که توسط دستگاه وایرکات شکل می گیرد) و دیسک بکار رفته به قطر ۴۵ mm و ضخامت ۴ mm از جنس فولاد ریختگری آستنیتی با سختی Hv ۲۰۰ می باشد. نیروی ثابت ۵۰ N و سرعت ۱ mm/min برای فاصله ۵۰۰ m بکار می رود.

نتایج و بحث

- بررسی ریزساختار

ساختار آلیاژ AZ91 مورد استفاده از نوع ریخته گری بوده و از رسوبات بتا ($Mg_{17}Al_{12}$) در زمینه فاز α تشکیل شده‌اند و دارای دانه‌هایی با اندازه متوسط ۱۰۰ میکرومتر با توزیع غیریکنواخت می باشند. فرآیند اصطکاک اغتشاشی با ایجاد حرارت و نرخ کرنش لازم برای دانه‌بندی مجدد دینامیکی^۱ باعث تغییر در ریزساختار ماده گشته که ساختار درشت و غیر یکنواخت ماده خام، به ساختاری با اندازه دانه کوچک و توزیع یکنواخت تبدیل گردد.

با توجه به جدول ۲، اندازه دانه در نمونه FSP شده یک و چهار پاسبه کاهش پیدا می کند، علت این تغییرات در ناحیه SZ تبلور مجدد دینامیکی است. تشکیل دانه‌های جدید و مهاجرت مرز دانه‌های با زاویه زیاد، سبب ایجاد ساختار ریزدانه با دانه‌های هم‌محور در ناحیه SZ می شوند [۱۱]. میانگین اندازه دانه در SZ بدلیل زیر کاهش می یابد: (۱) دانه‌های SZ به علت تبلور مجدد جدید با تغییر قرم پلاستیکی از پاس جدید شروع به کاهش می یابند. (۲) ذرات نانو سائز در یک ناحیه بزرگتر جداگانه توزیع می شود و با افزایش تعداد پاس اندازه خوشه‌ها کاهش می یابد در نتیجه تعداد محل‌های جوانه زنی و موانع، محدودیت رشد دانه‌ها را افزایش می دهد. مشاهده می شود که اندازه متوسط دانه‌ها در اثر استفاده از خنک کاری نسبت به حالتی که از خنک کاری استفاده نگردد کاهش

^۱. Dynamic Recrystallization

یافت. اثر دما در هنگام انجام فرآیند اصطکاک اغتشاشی با استفاده از معادله زینر-هالمن^۱، قابل توضیح است [۱۲].

$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \quad (1)$$

استفاده از خنک کاری سبب افزایش پارامتر Z می شود زیرا دمای قطعه بلافاصله بعد از عبور ابزار به شدت افت پیدا کرده و در عین حال $\dot{\epsilon}$ نیز افزایش می یابد زیرا ماده با دمای پایین تر، توانایی کمتری برای تغییر فرم دارد. بنابراین تغییر شکل پلاستیکی شدید محدود به ناحیه بسیار کوچکی اطراف پین ایجاد شده که نرخ کرنش بسیار بالایی در این ناحیه را سبب می شود. براین دو اثر باعث کاهش اندازه دانه (d) می شود. ذرات تقویت کننده باعث اصلاح میکروساختار به علت هسته گذاری دانه ها در حین تبلور مجدد و محدود شدن رشد دانه ها می شوند. علت اصلاح دانه در نمونه های کامپوزیتی شامل موارد زیر می باشد: (i) قابلیت ذرات SiC و Al_2O_3 در جوانه زنی دانه منیزیم در حین تبلور مجدد و (ii) رشد محدود دانه های تبلور مجدد مانند اتصال بوسیله ذرات SiC و Al_2O_3 .

جدول ۲ همچنین نشان می دهد که اندازه میانگین دانه در نمونه با ذرات SiC نسبت به Al_2O_3 بسیار کوچکتر است. تمایل ذرات SiC به توزیع جداگانه در AZ91 موجب اصلاح بیشتر دانه ها می گردد. همانطور که از تصویر SEM مقطع ناحیه SZ نمونه FSP شده (شکل ۱) مشخص است، اندازه دانه در این ناحیه به طور قابل توجهی کاهش یافته و ذرات پودر در داخل زمینه مخصوصا در مرزدانه ها پخش می شوند. مطابق شکل ۱ می توان نتیجه گرفت که ذرات SiC خاصیت خیس شوندگی بهتری نسبت به ذرات Al_2O_3 در منیزیم AZ91 دارند بنابراین ذرات آلومینا بیشتر آگومره می شوند. ذرات آلومینای نانوسایز آگومره توزیع خوبی در زمینه ندارد، و خوشه هایی در حدود $0.1-0.2 \mu m$ در SZ تشکیل می دهند که بسیار بزرگتر از اندازه نانوذرات (۳۰ nm) است. تعداد خوشه های SiC ناچیزتر و اندازه کوچکتری نسبت به Al_2O_3 دارند. اغلب میکروخوشه های Al_2O_3 در مرز دانه ها و نانو ذرات جداگانه SiC درون دانه ها و در طول مرزدانه ها قرار می گیرند.

- سختی

بهبود سختی در شرایط خاص به سبب دو عامل ریزساختار در کنار حضور نابجایی های باقیمانده است [۱۲]. مرز دانه ها موانع اصلی برای لغزش نابجایی ها هستند و مواد با اندازه دانه کوچک و دارای مرز دانه های بیشتر، سختی و استحکام بالایی را ارائه می دهند زیرا که در حرکت نابجایی ها محدودیت ایجاد می کند [۱۳]. مطابق جدول ۲ و شکل ۲، استفاده از نانو ذرات SiC و Al_2O_3 ساختار را اصلاح و میکروسختی را افزایش می بخشد، علت را می توان در حضور ذرات سرامیکی نسبتا سخت در زمینه، محدودیت زیاد متمرکز شده از تغییر فرم زمینه در حین تست سختی و کاهش در اندازه دانه دانست. همچنین سختی نمونه های حاوی نانوذرات SiC نسبت به نمونه

¹. Zener-Holloman

مشابه همراه با Al_2O_3 بیشتر است که دلیل آن را می توان در خیس شونده گی بالاتر ذرات SiC با زمینه و ایجاد ساختار ریزدانه تر در این نمونه ها دانست. استفاده از خنک کار در حین فرایند FSP، سبب کاهش میزان شار حرارتی در اطراف ابزار و ریزدانه تر شدن ساختار می گردد و همین امر سبب افزایش سختی در نمونه های سرد شده می شود. در ضمن همانگونه که مشخص است، میزان سختی حاصله در نقاط مختلف، به میزان قابل توجهی از سختی فلز پایه بیشتر است که علت اصلی آن را در حل و شکسته شدن فاز بتای موجود در فلز پایه، حذف عیوب ریختگی و ریز شدن ساختار در اثر استفاده از فرایند FSP و فاز تقویت کننده دانست. در فرآیند اصطکاک اغتشاشی همراه با نانوذرات سه عامل باعث افزایش سختی می شوند، ریز شدن اندازه دانه ها، پدیدار شدن فازهای تقویت کننده درون ماتریس و تفاوت بین ضریب انبساط حرارتی مواد تقویت کننده و ماتریس [۱۴].

- خواص کششی

با توجه به جدول ۳ و شکل ۳، با اعمال فرایند FSP، تنش تسلیم، استحکام کششی و مخصوصاً درصد ازدیاد طول به طور چشمگیری افزایش می یابد. فلز پایه AZ9۱ ریخته گری شده، دارای دانه های درشت است و تغییر شکل آن به علت ساختار هگزاگونال، به شدت محدود می باشد. پس از FSP سه عامل اصلی بر خواص کششی تاثیر می گذارند: (۱) حفره و تخلخل های ریختگی بدلیل FSP ناپدید می شوند. (۲) اندازه دانه نمونه FSP از نمونه ریختگی چندین برابر کمتر است (مطابق جدول ۲). میکروساختار هم محور ریز مطابق با معادله هال-پچ^۱ (معادله (۲))، استحکام بالایی را نتیجه می دهد و به بهبود مقاومت در برابر رشد ترک در زمینه در حین افزایش ازدیاد طول منجر می شود. (۳) رسوبات سخت درشت بتا در اطراف مرز دانه ها که مکان های ممتازی برای شروع ترک هستند، حل می شوند [۱۵].

$$\sigma = \sigma_0 + kd^{-\frac{1}{2}} \quad (2)$$

K ضریب هال-پچ و d قطر دانه زمینه است.

استحکام کششی و ازدیاد طول نمونه تک پاسه با SiC و Al_2O_3 در مقایسه با نمونه بدون پودر کاهش نشان می دهد. توزیع غیر یکنواخت و آگلومره شدن نانوذرات، شروع و گسترش ترک را افزایش و استحکام و ازدیاد طول را کاهش می بخشد. در نمونه Al_2O_3 (در مقایسه با SiC) اندازه دانه بزرگتر باعث کاهش بیشتر استحکام می گردد، خوشه های بزرگ آلومینا با مکان های مناسب برای شروع ترک، ازدیاد طول را کاهش می دهد. خاطر نشان می شود که مقادیر تنش کششی و درصد ازدیاد طول برای نمونه FSP شده با یک پاس به همراه استفاده از نانوذرات SiC و Al_2O_3 از نمونه ریختگی بیشتر است. اثر متقابل نابجایی ها با نانو ذرات افزایش می یابد، استحکام نمونه های کامپوزیتی مطابق مکانیزم ارووان است. ارووان با ذرات نانو سایز پراکنده در زمینه و شکل حلقه های نابجایی ها (مانند خطوط نابجایی و محل تقاطع ذرات) در ارتباط است.

^۱ . Hall-Petch

با افزایش تعداد پاس، استحکام و ازدیاد طول نسبت به حالت تک پاس افزایش می‌یابد، در این نمونه‌ها ذرات بطور یکنواخت‌تری توزیع و از آگلومره‌های تولید شده در پاس اول کاسته می‌شود. اندازه دانه ریزتر بر استحکام با افزایش تعداد پاس تاثیر بیشتری می‌گذارد که به این دلایل است: (۱) در کامپوزیت‌هایی با ذرات تقویت‌کننده، ذرات درون دانه‌های ریز قرار می‌گیرند. استحکام بخشی ارووان می‌تواند بسیار قابل توجه باشد. (۲) با افزایش تعداد پاس و کاهش اندازه خوشه‌ها، فصل مشترک زمینه/ذرات می‌تواند بهبود یابد. در تمامی حالات ملاحظه می‌شود که استحکام و ازدیاد طول نمونه‌های حاوی SiC نسبت به نمونه‌های Al_2O_3 بالاتر است زیرا همانگونه که اشاره شد، نانوذرات SiC اندازه دانه‌های حاصله کوچکتر و خوشه‌های تشکیل شده کمتری را ایجاد می‌کنند، علت را می‌توان در میزان خیس شوندگی بهتر ذرات SiC با زمینه نسبت به ذرات Al_2O_3 دانست.

- بررسی خواص سایشی

حضور ذرات تقویت‌کننده، نیروی مستقیم بین سطح نمونه و دیسک را کاهش و جهت نیروی ذرات تقویت‌کننده، نیروی مستقیم را کاهش می‌دهد [۱۵]. بهترین توزیع ذرات تقویت‌کننده منجر به اندازه دانه کوچک‌تر و سختی بالاتر در لایه‌های کامپوزیتی و در نتیجه بهبود مقاومت سایش می‌شود. تصاویر SEM سطح سایش هر دو نمونه کامپوزیتی و معمولی در شکل ۴ نشان داده شده است. شکل شیارهای عمیق مستقیم را که نشان‌دهنده سایش چسبنده^۱ هستند بر روی سطح فلز پایه نشان می‌دهد و بیانگر این مطلب است که فاز بتای ترد و خشن مانع از سایش نمی‌شود، از طرفی تکه‌های فلزی آزاد بر روی سطح سایش فلز پایه نشان می‌دهد که سایش رفتگی معتدل نیز رخ می‌دهد. چندین سایش چسبنده بوسیله خراب شدن شدید سطح بدست می‌آید. مواد انتقالی (برداشته شده از سطح AZ۹۱ با دیسک فولادی) می‌توانند در حین لغزش اکسید شوند و ذرات جدا شده فلزی بزرگ تولید گردد [۱۵، ۱۲]. ذرات جدا شده منجر به سایش رفتگی و افزایش نرخ سایش فلز پایه می‌شود. با مقایسه شکل ۴a و c، این نتیجه حاصل می‌شود که سایش آلیاژ پایه AZ۹۱ شدیدتر از نانو کامپوزیت SiC- AZ۹۱ و AZ۹۱- Al_2O_3 است؛ زیرا میزان نفوذ بین به داخل سطح آلیاژ و نیز عرض ناحیه سایش بیشتر است. با توجه به این شکل، به نظر می‌رسد که دو مکانیزم سایش غالب عبارتند از سایش رفتگی که در آلیاژ پایه AZ۹۱ اتفاق می‌افتد و دیگری لایه‌لایه شدن که دلیل عمده سایش نانو کامپوزیت می‌باشد.

در تصویر ۴b، تعدادی از ترک‌های کوچک قابل مشاهده هستند. تقاطع یا افزایش میزان چنین ترک‌هایی سبب جدایش محصولات سایش گوشه‌دار شده که حفرات و فرورفتگی‌های ناهمگون کم عمق را به جا می‌گذارند. این‌ها ویژگی‌های سایش از نوع لایه‌لایه شدن هستند. در چنین پدیده‌ای، جوانه‌زنی و رشد ترک رخ می‌دهد زیرا این مکانیزم سبب تغییر فرم لایه‌های زیر سطحی می‌شود. در شکل ۴d سطح سایش نانو کامپوزیت با تعداد زیادی از شیارها و نشانه‌های سایش که بیشتر موازی جهت سایش هستند پوشیده شده است. این ویژگی‌ها مختص سایش از نوع رفتگی هستند که در آن ذرات سخت بین دو سطح، سطوح را شخم زده و ذرات بسیار

^۱ . Adhesive

ریزی را از آن‌ها جدا می‌کند. این ذرات عمدتاً شامل تکه‌های فلز پایه کارسخت شده و همچنین ذرات ریز کامپوزیتی می‌باشند.

مکانیزم سایش غالب در نمونه Al_2O_3 ، سلیش رفتگی است. حضور خوشه‌های درشت آلومینا (μm) و بی‌نقصی کم آن با زمینه سبب لایه لایه شدگی^۱ زیر لایه ماتریکس در برخی مکان‌های سطح سایش می‌شود. مکانیزم سایش رفتگی موجب ایجاد ذرات باقی‌مانده شده که بوضوح در سطح سایش دیده می‌شود. تولید ذرات باقی‌مانده آزاد به علت برداشت و اکسید شدن زمینه و ذرات آلومینا کشیده شده به بیرون لایه کامپوزیتی $AZ91-Al_2O_3$ در حین لغزش می‌باشد. تصاویر SEM سطح سایش نمونه ۴ پاس با SiC و Al_2O_3 در شکل ۵ آمده است. توزیع یکنواخت ذرات تقویت‌کننده (با منطقه تیره و روشن یا خوشه‌ها) در نمونه ۴ پاس یک سطح سایش یکنواخت با مکانیزم سایش رفتگی ملایم را نتیجه می‌دهد. در این نمونه، لایه لایه شدگی لایه‌های زیر سطحی یا چسبنده کاهش می‌یابد. توزیع ذرات Al_2O_3 منجر به فصل مشترک بی‌عیب بین ذرات و زمینه شده و مانع لایه لایه شدگی لایه‌های زیر سطحی می‌گردد. شکل ۶ تغییرات ضریب اصطکاک فلز پایه و نمونه FSP در موقعیت‌های مختلف را نشان می‌دهد. سایش چسبنده شدید مکانیزم سایش غالب فلز پایه است و نوسان در منحنی ضریب اصطکاک را بوجود می‌آورد. در حقیقت برآیند انباشتگی و حذف ذرات باقی‌مانده سایش سبب نوسان شدید در ضریب اصطکاک می‌شود. افزودن تقویت‌کننده، مکانیزم سایش را از سایش شدید به نرم تغییر می‌دهد و نوسانات را کاهش می‌بخشد. رنج پایین‌تر نوسان وابسته به نمونه ۴ پاس با بهترین توزیع و بالاترین سختی است. در شکل ۶ میانگین ضریب اصطکاک در فلز پایه کمترین مقدار و برابر ۰/۲۱ می‌باشد. ماکزیم مقدار ضریب اصطکاک مربوط به نمونه FSP با SiC و Al_2O_3 (۰/۴۵ و ۰/۴۸) است. وجود ذرات تقویت‌کننده جهت نیروی تماس را کاهش و در نتیجه ضریب اصطکاک را افزایش می‌دهد. از طرف دیگر ذرات تقویت‌کننده، موانع را فعال و لغزش بین پین و دیسک را متوقف می‌کنند و در نتیجه ضریب اصطکاک را افزایش می‌دهند. بهترین توزیع ذرات منجر به پوشش بهتر سطح کامپوزیت و در نتیجه بالا رفتن ضریب اصطکاک می‌شود [۱۵].

نتیجه‌گیری

۱- اعمال فرایند FSP بر روی آلیاژ AZ91 سبب کاهش اندازه دانه، افزایش سختی، افزایش تنش تسلیم و افزایش چشمگیر میزان ازدیاد طول و بهبود مقاومت سایش می‌شود. کامپوزیت و نانو کامپوزیت تولیدی با ذرات تقویت‌کننده دارای درصد ازدیاد طول کمتری نسبت به نمونه FSP شده می‌باشند در حالی که تنش تسلیم و استحکام کششی آن بیشتر است. افزایش تعداد پاس‌های FSP منجر به توزیع بهتر نانو ذرات در ماتریکس، ساختار ریزدانه‌تر به همراه سختی، استحکام و ازدیاد طول می‌گردد.

^۱ . Delamination

۲- نانوذرات SiC نسبت به Al_2O_3 خیس شوندگی بهتری با زمینه AZ91 دارند. به هر حال ذرات SiC در تمام SZ بصورت یکنواخت توزیع نمی‌شود. لایه‌های نانوکامپوزیتی ایجاد شده با SiC اندازه دانه کوچکتر و سختی، استحکام، ازدیاد طول و مقاومت سایش بالاتری را نسبت به ذرات Al_2O_3 ارائه می‌دهد.

مراجع

1. C. I. Chang, Y. N. Wang, H. R. Pei, C. J. Lee, J. C. Huang, "On the Hardening of Friction Stir Processed Mg-AZ31 Based Composites with 5–20% Nano-ZrO₂ and Nano-SiO₂ Particles". *Materials Transactions*, Vol. 47, No. 12, 2006, 2942 to 2949.
2. P. Cavaliere, P.P. De Marco, "Friction stir processing of AM60B magnesium alloy sheets. *Materials Science and Engineering*", A 462, 2007, 393–397.
3. CHEN Ti-jun, ZHU Zhan-ming, LI Yuan-dong, MA Ying, HAO Yuan, "Friction stir processing of thixoformed AZ91D magnesium alloy and fabrication of Al-rich surface". *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* 20, 2010, 34-42.
4. Kun Wu, Kunkun Deng, Kaibo Nie, Yewei Wu, Xiaojun Wang, Xiaoshi Hu, Mingyi Zheng, "Microstructure and mechanical properties of SiCp/AZ91 composite deformed through a combination of forging and extrusion process". *Materials and Design*, 2010.
5. K.K. Deng, K.Wu, Y.W. Wu, K.B. Nie, M.Y. Zheng, "Effect of submicron size SiC particulates on microstructure and mechanical properties of AZ91 magnesium matrix composites". *Alloys and Compounds*, 504 p, 2010, 542-547.
6. R.S. Mishra, Z.Y. Ma, "Friction stir welding and processing", *Materials Science and Engineering R* 50, 2005, 1–78.
7. Parviz Asadi, Ghader Faraji, Mohammad K. Besharati, "Producing of AZ91/SiC composite by friction stir processing (FSP)". *Advanced Manufacturing Technology*. 51: 14.
8. Yuan, W., Mishra, R. S. "Grain size and texture effects on deformation behavior of AZ31 magnesium alloy". *Materials Science and Engineering: A*. 558, 2012, 716-24.
9. C.I. Chang, X.H. Du, J.C. Huang, "Producing nanograined microstructure in Mg-Al-Zn alloy by two-step friction stir processing". *Scr. Mater*, 2008, 356-359.
10. Mostafa Dadaei, Hamid Omidvar, Behrouz Bagheri, Mohammad Jahazi, Mahmoud Abbasi, "The effect of SiC/Al₂O₃ particles used during FSP on mechanical properties of AZ91 magnesium alloy", *IJMR_MK111025 – 25*, 2013, 11-13.
11. Parviz Asadi, Ghader Faraji, Mohammad K. Besharati, "Producing of AZ91/SiC composite by friction stir processing (FSP)". *Int J Adv Manuf Technol*: p. DOI 10.1007/s00170-010-2600-z.
12. Tutunchilar S, Haghpanahi M, Besharati Givi MK, Asadi P, Bahemmat P (2012) Simulation of material flow in friction stir processing of a cast Al-Si alloy. *Mater Des* 40:415–426
13. M. Guerra, C. Schmidt, J.C. McClure, L.E. Murr, A.C. Nunes, "Flow patterns during friction stir welding". *Materials Characterization*, 49 p, 2003, 95- 101.
14. Mahmoud Abbasi, "The effect of SiC/Al₂O₃ particles used during FSP on mechanical properties of AZ91 magnesium alloy", *IJMR_MK111025 – 25*. 11.13, May 2013.
15. Ghader Faraji, Parviz Asadi, "Characterization of AZ91/alumina nano composite produced by FSP", *Material and science and engineering A* 528, 2011, 2431-2440.

جدول ۱: ترکیب شیمیایی آلیاژ AZ91

Element	Al	Zn	Mn	Si	Cu	Ni	Fe	Mg
Wt.%	9.1	0.68	0.14	0.085	0.0097	0.001	0.0021	Balance

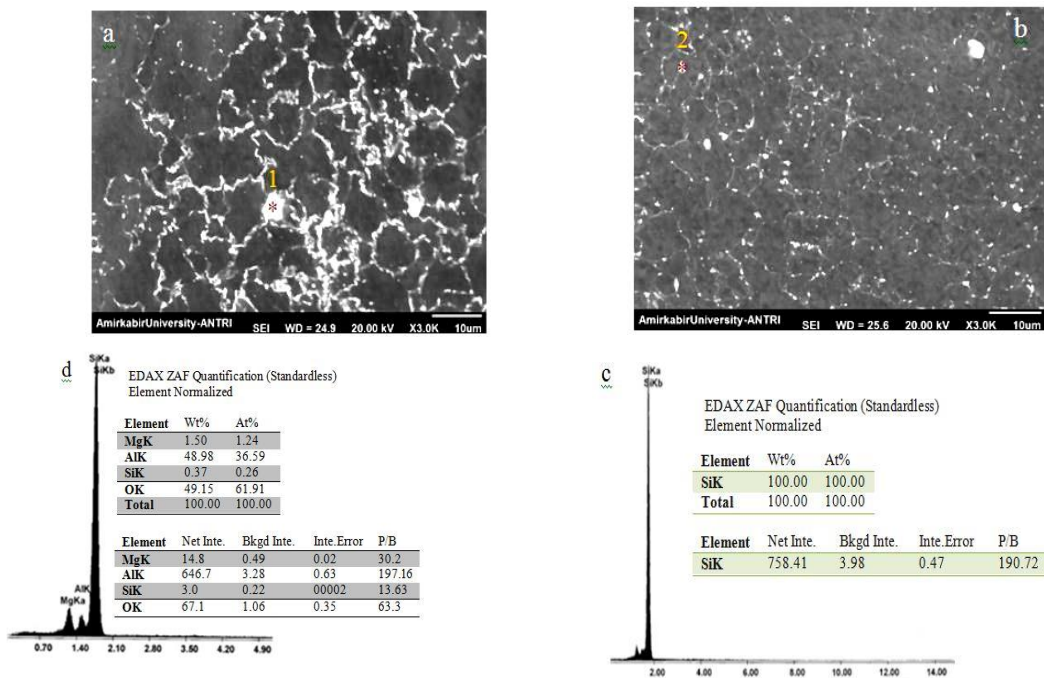
جدول ۲: میانگین اندازه دانه و سختی در ناحیه SZ نمونه‌های تولید شده در شرایط مختلف FSP

تعداد پاس	نوع بودر	خنک‌کار	تعویض جهت دوران	میانگین اندازه دانه (μm)	میانگین سختی (HV)
۱	-	No	No	۱۴/۹	۶۷
۱	Al ₂ O ₃	No	No	۱۳/۵	۷۲
۱	Al ₂ O ₃	No	No	۱۳/۹	۷۰
۱	SiC	Yes	No	۱۲/۹	۷۶
۱	Al ₂ O ₃	Yes	No	۱۳/۲	۷۳/۵
۲	SiC	No	No	۱۰/۱	۸۰
۲	Al ₂ O ₃	No	No	۱۲/۱	۷۷/۳
۲	SiC	Yes	No	۹/۳	۸۷
۲	Al ₂ O ₃	Yes	No	۱۰/۵	۸۲
۲	SiC	Yes	Yes	۵/۹۴	۹۸
۲	Al ₂ O ₃	Yes	Yes	۶/۹	۹۰/۶
۴	SiC	No	No	۲/۹۵	۱۰۷
۴	Al ₂ O ₃	No	No	۴/۲	۱۰۰/۵
۴	SiC	Yes	No	۱/۷	۱۱۵/۴
۴	Al ₂ O ₃	Yes	No	۲/۷	۱۱۰/۸
۴	SiC	Yes	Yes	۰/۲	۱۳۵/۷
۴	Al ₂ O ₃	Yes	Yes	۰/۷	۱۲۹/۵

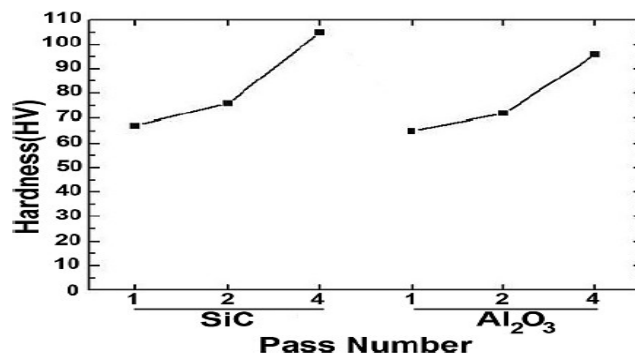
جدول ۳: خواص مکانیکی نمونه‌های مختلف

Sample	UTS (MPa)	Elongation (%)	FI (MPa · %)
As-received	124.56	10.1	1258.05
FSP-No particle	203.65	14.04	2859.24
FSP-SiC	1 pass	12	2058.84
	2 pass	13.05	4001.52
	4 pass	16.56	6470.15
FSP-Al ₂ O ₃	1 pass	11	1705
	2 pass	12.51	3598.75
	4 pass	16.05	5986

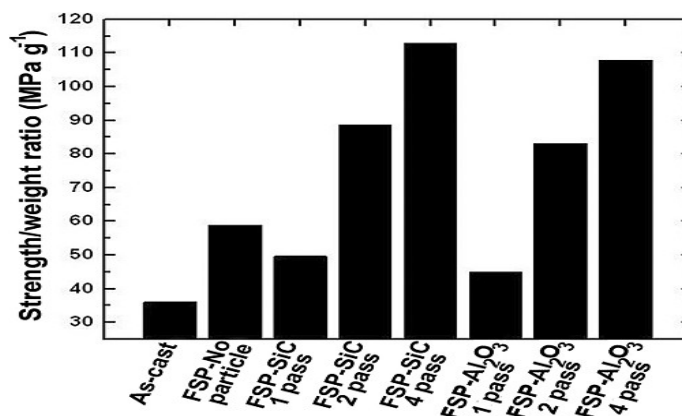
(FI stands for formability index)



شکل ۱: تصویر SEM از مقطع کامپوزیت. (a) AZ91-SiC، (b) AZ91-Al₂O₃، (c) آنالیز EDS نقطه ۱ (ذرات آگلومره شده SiC)، (d) آنالیز EDS نقطه ۲ (ناحیه مجاور ذرات Al₂O₃).

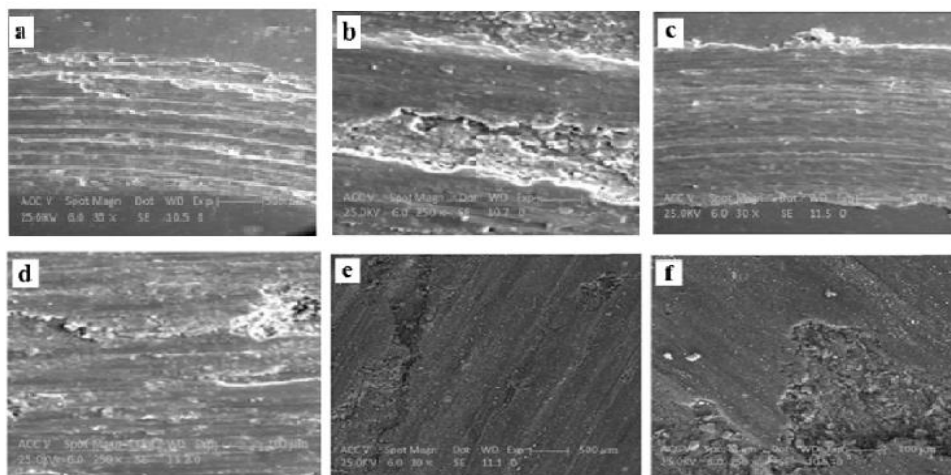


شکل ۲: تاثیرات نوع ذرات و تعداد پاس بر روی سختی

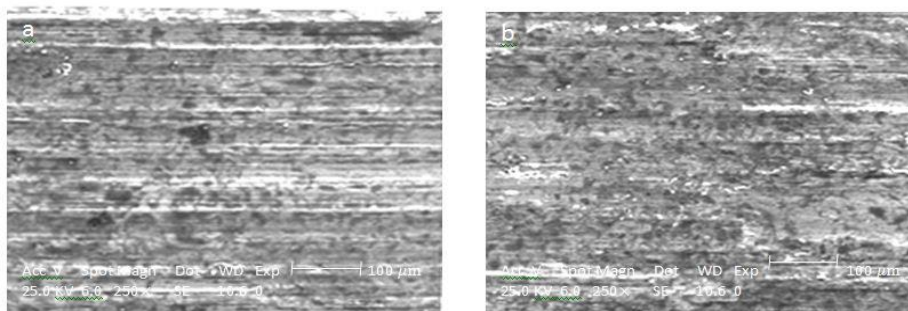


شکل ۳: تاثیرات پارامترهای مختلف فرایند FSP بر روی نسبت استحکام

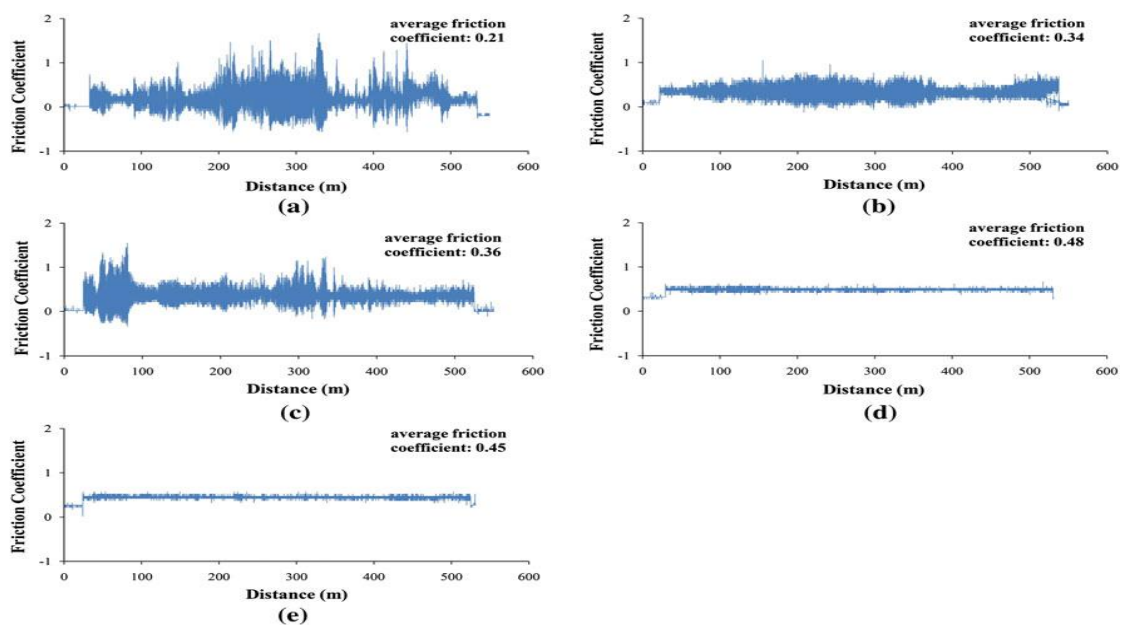
شانزدهمین سمینار ملی مهندسی سطح



شکل ۴. تصاویر SEM سطح سایش مربوط به فلز پایه، (a,b) نمونه‌های FSP شده پس از تست سایش، (c,d) نمونه‌های حاوی ذرات SiC، (e,f) نمونه‌های حاوی Al_2O_3



شکل ۵: تصاویر SEM سطح سایش یافته از نمونه ۴ پاس FSP شده: (a) با ذرات SiC و (b) با ذرات Al_2O_3 .



شکل ۶: تغییر ضریب اصطکاک در: (a) فلز پایه، (b) نمونه یک پاس FSP شده با ذرات SiC، (c) نمونه یک پاس FSP شده با ذرات Al_2O_3 ، (d) نمونه چهار پاس FSP شده با ذرات SiC و (e) نمونه چهار پاس FSP شده با ذرات Al_2O_3 .