



بهمنماه ۱۳۹۴

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

مصطفى دادايي دهكردي'، محمد لطفي'، بهمن چشفر'، حميد اميدوار"

شرکت ورق خودرو چهارمحال و بختیاری (کارشناسی ارشد مهندسی مواد)
شرکت آتیه سازان نگین فراز (کارشناسی مهندسی مکانیک)
۳. دانشیار دانشگاه صنعتی امیر کبیر (دکترای مهندسی مواد)

چکیده در این تحقیق، به بررسی خواص مکانیکی و سایشی لایه کامپوزیت سطحی آلیاژ ریختگی AZ91 بـه همراه نانوذرات اکسید آلومینیوم و کاربید سیلیسیم تولید شده با استفاده از فراینـد اصطکاکی همزننـده پرداختـه شـد. تاثیرات نانوذرات مختلف بـر انـدازه دانـه، میکروسـاختار، میکروسـختی، خـواص مکانیکی و سایشی در آلیـاژ 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 Al2O3 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 مستقیما با بهبود سختی و استحکام کامپوزیت ها با سطح تقویت کننده در ارتباط می باشد.

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

¹. Mdi@CBASCO.ir

مقدمه

آلیاژهای منیزیم دارای خواص ویژه ای می باشند که باعث شده این آلیاژها جز مواد استراتژیک محسوب گردند[1]. علت عمده مورد توجه قرار گرفتن این آلیاژها، استحکام و سختی بالا و چگالی پایین در دمای اتاق میباشد [۲]. در میان آلیاژهای منیزیم، آلیاژ AZ۹۱ یکی از پر کاربردترین آنهاست که در مقیاس صنعتی و تجاری بکار میرود و در جایی که نیاز به اسستحکام، داکتیلیته و مقاومت به خزش باشد مورد استفاده قرار می-

گیرد. این آلباژ 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 و۵]. اخیرا 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 ریز ساختار فلزات ابداع شد [۶]. در این روش تغییر شکل پلاستیکی شدید مواد ناشی از چرخش و (۷]. با انتخاب مناسب پارامترهای فرایند و کنترل دمای قطعه، به موازات انجام فرایند می توان به دانه های با اندازه کوچک دست یافت. مطالعاتی در خصوص تأثیر سرعت دورانی و خطی بر تاریخچه دمایی صورت پذیرفت [۶]. یوآن و میشرا^۲ تأثیر اندازه دانه 2011 مایز سرعت دورانی و خطی بر تاریخچه دمایی صورت پذیرفت قرار دادند [۸]. همچنین فرآیند و کنترل دمای قطعه، به موازات انجام فرایند می توان به دانه هایی با اندازه در آلیاژ 2011 ماسب پارامترهای فرایند و کنترل دمای قطعه، به موازات انجام فرایند می توان به دانه هایی با اندازه در آلیاژ 2013 مناسب پارامترهای فرایند و کنترل دمای قطعه، به موازات انجام فرایند می توان به دانه هایی با اندازه در آلیاژ 2013 می می در اندازه دانه 2011 می سرع دما به طور موفقیت آمیزی به منظور ایجاد ریز ساختار، قرار دادند [۸]. همچنین فر آیند SPP همراه با کاهش سریع دما به طور موفقیت آمیزی به منظور ایجاد ریز ساختار، در آلیاژ 2011 می در آلیاز 2013 می و همکاران در تحقیقی به بررسی تائیر فرایند SPP با استفاده از نانوذرات SIG و می دانید (۹] بر روی آلیاژ 2014 پر داختند 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

مواد و روش تحقيق

ماده مورد مطالعه در این تحقیق آلیاژ منیزیم AZ۹۱ میباشد 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 AZ۹۱ ایجاد می شود. شیارها توسط نانو ذرات (به اندازه دانه 30nm) کاربید سیلیسیم (SiC) و یا اکسید آلومینیوم (AI₁O₇) به مقدار 0.63g پر شده و سطح شیار توسط ابزار بدون پین بسته می شود. در این تحقیق از پین استوانه ای رزوه دار با قطر شانه، قطر پین، ارتفاع پین و گام رزوه به ترتیب ۸۱، ۶، ۴ و ۳ میلیمتر با سختی ۶۰ راکول 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 ۳۳۸/min و سرعت پیشروی ۳۰۰ و ۳۰ و در پاس دوم به بعد از سرعت دورانی ۹۵۰ rpm و سرعت پیشروی ۴۲ mm/min 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 نمونه های کشش به صورت طولی از ناحیه FSP شده طبق استاندارد زیراندازه EST MS با نرخ کرنش ⁽⁻۵۶-۱۰ تهیه شدند، میکروسختی نمونه ها توسط دستگاه ریزسختی سنج با اعمال بار و ۲۰۱ در مدت ۱۰ ثانیه اندازه گیری شد. نمونه های تست سایش بر اساس استاندارد G99 شده به همراه نانو ذرات انجام گردید. پین مورد استفاده دارای دیسک بود. تست سایش بر روی نمونه های FSP شده به همراه نانو ذرات انجام گردید. پین مورد استفاده دارای قطر mm ۵ و طول mm ۴ (از سطح نمونه SPP شده که توسط دستگاه وایر کات شکل می گیرد) و دیسک بکار رفته به قطر mm ۵ و ضخامت mm ۴ از جنس فولاد ریختگری آستنیتی با سختی با سختی با سختی می ایر در این نیروی ثابت N۰۰ و سرعت سایت ۲۰۰ ایر ای ۲۰۰ می می می می می می در دارای

نتايج و بحث

- بررسی ریزساختار ساختار آلیاژ AZ91 مورد استفاده از نوع ریخته گری بوده و از رسوبات بتا (Mg_{1v}Al_{1v}) در زمینه فاز α تشکیل شدهاند و دارای دانه هایی با اندازه متوسط ۱۰۰ میکرومتر با توزیع غیریکنواخت می باشند. فر آیند اصطکاک اغتشاشی با ایجاد حرارت و نرخ کرنش لازم برای دانه بندی مجدد دینامیکی' 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 پاسه کاهش پیدا می کند، علت این تغییرات در ناحیه SZ تبلورمجدد دینامیکی است. تشکیل دانههای جدید و مهاجرت مرزدانههای با زاویه زیاد، سبب ایجاد ساختار ریزدانه با دانههای هممحور در ناحیه SZ می شوند [۱۱]. میانگین اندازه دانه در SZ بدلایل زیر کاهش می یابد: ۱) دانههای SZ به علت تبلورمجدد جدید با تغییر قرم پلاستیکی از پاس جدید شروع به کاهش می یابند. ۲) ذرات نانوسایز در یک ناحیه بزرگتر جداگانه توزیع می شود و با افزایش تعداد پاس اندازه خوشهها کاهش می یابد در نتیجه تعداد محل های جوانه زنی و موانع، محدودیت رشد دانه ها 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

¹. Dynamic Recrystallization

بررسى تاثيرات فرايند اصطكاكي ...

یافت. اثر دما در هنگام انجام فر آیند اصطکاک اغتشاشی با استفاده از معادله زنر -هالمن'، قابل توضیح است [۱۲].

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

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 غ 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. برایند این دو اثر باعث کاهش اندازه دانه (b) می شود. ذرات تقویت کننده باعث اصلاح میکروساختار به علت هسته گذاری دانه ها در حین تبلورمجدد و محدود شدن رشد دانه ها می شوند. علت اصلاح دانه در نمونه های کامپوزیتی شامل موارد زیر می باشد: i) قابلیت ذرات SiC رشد دانه ها می شوند. علت اصلاح دانه در نمونه های کامپوزیتی شامل موارد زیر می باشد: i) قابلیت ذرات SiC

است. تمایل ذرات SiC به توزیع جداگانه در AZ۹۱ 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 مO₇IA در منیزیم AZ۹۱ دارند بنابراین ذرات آلومینا بیشتر آلگومره می شوند. ذرات آلومینای نانوسایز آگلومره توزیع خوبی در زمینه ندارد، و خوشه هایی در حدود Mµ۰۰-۱/۰ در SZ تشکیل می دهند که بسیار بزرگتر از اندازه نانوذرات (۳۰ nm) است. تعداد خوشه هایی SiC ناچیزتر و اندازه کوچکتری نسبت به مرزدانه ها قرار می-گیرند.

- سختی بهبود سختی در شرایط خاص به سبب دو عامل ریز ساختار 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 زیراکه در حرکت نابجایی ها محدودیت ایجاد می کند [۱۳]. مطابق جدول ۲ و شکل ۲، استفاده از نانو ذرات SiC و ۲۰_۲م ساختار را اصلاح و میکروسختی را افزایش می بخشند، 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 نانو ذرات SiC نسبت به نمونه

¹. Zener-Holloman

مشابه همراه با ۹۰٬۹۲۰ بیشتر است که دلیل آن را می توان در خیس شوندگی 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. درضمن 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

با توجه به جدول ۳ و شکل ۳، با اعمال فرایند FSP، تنش تسلیم، استحکام کششی و مخصوصا درصد ازدیاد طول به طور چشمگیری افزایش مییابد. فلز پایه AZ۹۱ ریخته گری شده، دارای دانههای 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 دانهها که مکان های ممتازی برای شروع

خواص کششی

K ضريب هال-پچ و d قطر دانه زمينه است.

استحکام کششی و ازدیاد طول نمونه تک پاسه با SiC و Al_rO_r و Al_rO_r 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_rO_r (در مقایسه با SiC) اندازه دانه بزر گتر 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 Plac از نمونه ریختگی بیشتر است. اثر متقابل نابجایی ها با نانو ذرات افزایش می یابد، استحکام نمونه های کامپوزیتی مطابق مکانیزم ارووان است. اووان با ذرات نانو سایز پراکنده در زمینه و شکل حلقه های نابجایی ها (مانند خطوط نابجایی و محل تقاطع ذرات) در ارتباط است.

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

¹. Hall-Petch

بررسى تاثيرات فرايند اصطكاكي ...

با افزایش تعداد پاس، استحکام و ازدیاد طول نسبت به حالت تک پاس افزایش می یابد، در این نمونه ها ذرات بطور یکنواخت تری توزیع و از آگلومره های تولید شده در پاس اول کاسته می شود. اندازه دانه ریز تر بر استحکام با افزایش تعداد پاس تاثیر بیشتری می گذارد که به این دلایل است: ۱) در کامپوزیت هایی با ذرات تقویت کننده، ذرات درون دانه های ریز قرار می گیرند. استحکام بخشی ارووان می تواند بسیار قابل توجه باشد. ۲) با افزایش تعداد پاس و کاهش اندازه خوشه ها، فصل مشترک زمینه /ذرات می تواند بهبود یابد. در تمامی حالات ملاحظه می شود که استحکام و ازدیاد طول نمونه های حاوی SiC نسبت به نمونه های ۳۰ مالاتر است زیرا همانگونه که اشاره شد، نانوذرات SiC اندازه دانه های حاصله کوچکتر و خوشه های تشکیل شده کمتری را ایجاد می-کنند، علت را می توان در میزان خیس شوندگی بهتر ذرات SiC با زمینه نسبت به ذرات به درات ماری مانگونه

- بررسی خواص سایشی

جدایش محصولات سایش گوشهدار شده که حفرات و فرورفتگیهای ناهمگون کم عمق را به جا می گذارنـد. اینها ویژگی های سایش از نوع لایهلایه شدن هستند. در چنین پدیدهای، جوانهزنی و رشـد تـرک رخ مـی دهـد زیرا این مکانیزم سبب تغییر فرم لایههای زیر سطحی می شود. در شکل ۴d سطح سایش نانو کامپوزیت با تعـداد زیادی از شیارها و نشانههای سایش که بیشتر موازی جهت سایش هستند پوشـیده شـده است. ایـن ویژگیها مختص سایش از نوع رفتگی هستند که در آن ذرات سخت بـین دو سطح، سطوح را شخم زده و ذرات بسیار

¹. Adhesive

ریزی را از آنها جدا می کند. این ذرات عمدتا شامل تکههای فلز پایـه کارسـخت شـده و همچنـین ذرات ریـز کامپوزیتی میباشند.

مکانیزم سایش غالب در نمونه ،Al_rO ، سلیش رفتگی است. حضور خوشه های درشت آلومینا (۷m µ) و بی نقصي كم آن با زمينه سبب لايه لايه شدگي زير لايه ماتريكس در برخي مكانهاي سطح سايش مي شود. 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 AZ۹۱-Al_rO_r در حین لغزش میباشد. تصاویر SEM سطح سایش نمونه ۴ پاس با SiC و Al_rO_r در شکل ۵ آمده است. توزیع یکنواخت ذرات تقویت کننده (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 شـدگی لایـههـای زیـر سطحي يا چسبنده كاهش مي يابد. توزيع ذرات Al_rO_r منجر به فصل مشترك بي عيب بين ذرات و زمينه شـده و مانع لایه لایه شدگی لایه های زیر سطحی می گردد. 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 منحني ضريب اصطكاك را بوجود مي آورد. در حقيقت برايند انباشتگي و حذف ذرات باقي مانده سايش سبب نوسان شدید در ضریب اصطکاک می شود. افزودن تقویت کننده، مکانیزم سایش را از سایش شدید به نرم تغییر مىدهد و نوسانات را كاهش مىبخشد. رنج پايين تر نوسان وابسته به نمونـه ۴ پاس بـا بهتـرين توزيـع و بـالاترين سختی است. در شکل ۶ میانگین ضریب اصطکاک در فلز پایه کمترین مقدار و برابر ۲۱/۰ می باشد. ماکزیمم مقدار ضريب اصطكاك مربوط به نمونه FSP با SiC و SiC (۴۸ (۴۵ ، و ۱/۴۵) است. وجود ذرات تقويت-کننده جهت نیروی تماس را کاهش و در نتیجه ضریب اصطکاک را افزایش میدهد. از طرف دیگر ذرات تقویت کننده، موانع را فعال و لغزش بین پین و دیسک را متوقیف می کنند و در نتیجه ضریب اصطکاک را افزایش میدهند. بهترین توزیع ذرات منجر به پوشش بهتر سطح کامپوزیت و در نتیجه بالا رفتن ضریب اصطكاك مي شود [16].

نتيجه گيري

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 می شود. کامپوزیت و نانو کامپوزیت
تولیدی با ذرات تقویت کننده دارای درصد ازدیاد طول کمتری نسبت به نمونه FSP شده می باشند در حالی که تنش تسلیم و استحکام کششی آن بیشتر است. افزایش تعداد پاس های FSP منجر به توزیع
بهتر نانوذرات در ماتریکس، ساختار ریزدانه تر به همراه سختی، استکام و ازدیاد طول می گردد.

¹. Delamination

بررسى تاثيرات فرايند اصطكاكي ...

مراجع

- 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.
- 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.
- 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 AZ۹۱

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 نمونه های تولید شده در شرایط مختلف FSP

تعداد پاس	نوع پودر	خنک کار	تعويض جهت دوران	میانگین اندازه دانه(µm)	میانگین سختی (HV)
١	-	No	No	۱۴/۹	۶۷
١	Al _y O _y	No	No	۱۳/۵	٧٢
١	Al _y O _r	No	No	۱۳/۹	٧.
١	SiC	Yes	No	۱۲/۹	٧۶
١	Al _y O _y	Yes	No	۱۳/۲	ν٣/۵
۲	SiC	No	No	1./1	۸.
۲	Al _y O _y	No	No	17.1	٧٧/٣
۲	SiC	Yes	No	٩/٣	٨٧
۲	Al _y O _y	Yes	No	1 • /۵	AY
۲	SiC	Yes	Yes	۵/۹۴	٩٨
۲	Al _y O _y	Yes	Yes	۶/۹	۹.1۶
۴	SiC	No	No	۲/۹۵	1.1
۴	Al _y O _r	No	No	۴/۲	1/۵
۴	SiC	Yes	No	1/V	110/۴
۴	Al _y O _r	Yes	No	۲/V	۱۱۰/۸
۴	SiC	Yes	Yes	۰/۲	180/2
۴	Al _v O _r	Yes	Yes	• /V	189/0

Samp	le	UTS (MPa)	Elongation (%)	FI (MPa · %)
As-recei	ived	124.56	10.1	1258.05
FSP-No particle		203.65	14.04	2859.24
FSP-SiC	1 pass 2 pass 4 pass	171.57 306.63 390.71	12 13.05 16.56	2058.84 4001.52 6470.15
FSP-Al ₂ O ₃	1 pass 2 pass 4 pass	155 287.67 372.96	11 12.51 16.05	1705 3598.75 5986

جدول ۳: خواص مکانیکی نمونههای مختلف

(FI stands for formability index)



شکل ۱: تصویر SEM از مقطع کامپوزیت. c، AZ۹۱–Al_vO_r (b، AZ۹۱–SiC (a) آنالیز EDS نقطه ۱ (ذرات



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



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



شکل۴. تصاویر SEM سطح سایش مربوط به (a,b) فلز پایه، (c-f) نمونههای FSP شده پس از تست سایش، (c,d) نمونههای حاوی ذرات SiC، (e,f) نمونههای حاوی ۳۵٫۰



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



شکل ۶: تغییر ضریب اصطکاک در: a) فلز پایه، b) نمونه یک پاس FSP شده با ذرات c،SiC) نمونه یک پاس FSP شکل ۶: تغییر ضریب اصطکاک در: a) فلز پایه، b) نمونه یک پاس FSP شده با ذرات Al₁Or. شده با ذرات FSP شده با ذرات Al₁Or.