



ایجاد نانو کامپوزیت های هیبریدی به صورت درجا به روش فرآیند اصطکاکی اغتشاشی بر روی سطح ورق منیزیمی AZ31

سعید اخوان¹، احسان شریفی^{2*}، احمد تحویلین³، سید هادی عبداللهی⁴، فتح اله کریم زاده⁵

¹ و ³ کارشناسی ارشد مهندسی مواد، شرکت هواپیماسازی ایران (هسا)

² کارشناسی ارشد مهندسی مواد (محقق)

⁴ کارشناسی ارشد مهندسی مواد

⁵ اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان، استاد دانشکده مهندسی مواد

* Email: 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 مکانیکی و سختی آن ها مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت. برای این منظور از سرعت چرخشی 1250 دور بر دقیقه و سرعت پیشروی 40 میلیمتر بر دقیقه و پنج پاس فرآیند استفاده شد. بررسی های پراش پرتو ایکس بر روی این نمونه ها نشان داد که از همان آغاز فرآیند، احیای اکسید نیکل توسط منیزیم زمینه انجام شده و اکسید منیزیم و اتم ها یا مولکول های آزاد نیکل در زمینه شکل گرفتند. سپس اتم ها یا مولکول های نیکل آزاد با آلومینیوم موجود در زمینه به دلیل نیروی محرکه ترمودینامیکی بالاتر نسبت به منیزیم، واکنش داده و ترکیبات بین فلزی بر پایه Al-Ni در زمینه تشکیل گردید. نتایج اندازه گیری سختی برای نمونه های فلز پایه و نانو کامپوزیتی پس از سه پاس به ترتیب 56 و 140 ویکرز بدست آمد. نتایج آزمون کشش نیز نشان داد که استحکام کشش نهایی از مقدار 220 مگاپاسکال برای فلز پایه به حدود 320 مگاپاسکال برای نانو کامپوزیت سطحی بر پایه Mg-Al/Ni-O افزایش یافت.

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

مقدمه

امروزه نیاز به موادی با استحکام و مدول الاستیک بالا و در عین حال وزن پایین، منجر به توسعه کامپوزیت های زمینه فلزی شده است. یکی از مواد مورد استفاده به عنوان زمینه در کامپوزیت های زمینه فلزی، منیزیم می باشد. علت اصلی این موضوع چگالی بسیار پایین منیزیم ($1/73$ گرم بر سانتی متر مکعب) می باشد. کامپوزیتی کردن منیزیم مزایای زیر را در پی خواهد داشت [6 و 7]:

افزایش قابل ملاحظه استحکام و سختی بدون افزایش چشمگیر در چگالی منیزیم
افزایش استحکام خزشی

افزایش پایداری حرارتی به علت کاهش در ضریب انبساط حرارتی

بهبود مقاومت در برابر سایش

مجموعه عوامل ذکر شده موجب کاربرد گسترده کامپوزیت های زمینه منیزیمی در صنایع نظامی، هوافضا و خودروسازی شده است.

بسیار روشن است که خواص مکانیکی کامپوزیت های زمینه فلزی به اندازه و شکل ذرات تقویت کننده، حجم ذرات تقویت کننده در زمینه، و فصل مشترک زمینه و تقویت کننده وابسته می باشد [8]. اصولاً کامپوزیت های زمینه فلزی به دو روش ساخته می شوند: (الف) ذرات تقویت کننده به صورت مستقیم به زمینه اضافه شوند، یا به عبارت دیگر ذرات تقویت کننده قبل از فرآیند کامپوزیت سازی ایجاد شوند، (ب) ذرات تقویت کننده به صورت درجا حین فرآیند کامپوزیت سازی ایجاد شوند [9]. در صورتی که ذرات تقویت کننده قبل از اضافه شدن به زمینه ایجاد شوند (ذرات سرامیکی نظیر SiC , B_4C) اندازه ذرات معمولاً به چند ده میکرون محدود می شوند. همچنین این ذرات به دلیل استحکام و سختی بسیار بالایی که دارند، حتی تحت فرآیندهای مکانیکی-حرارتی نظیر FSP خرد یا شکسته نمی شوند. در صورتی هم که از ذرات نانومتری جهت کامپوزیت سازی استفاده شود، تمایل به کلوخه ای شدن و عدم توزیع یکنواخت تقویت کننده در زمینه به دلیل انرژی سطحی بسیار زیاد، افزایش می یابد [1 و 2]. اما در حالتی که ذرات تقویت کننده حین فرآیند کامپوزیت سازی (به صورت درجا) ایجاد شوند، اتصال بسیار قوی با زمینه خواهند ساخت و کامپوزیت ایجاد شده از لحاظ ترمودینامیکی بسیار پایدار خواهد بود. همچنین در این حالت اندازه ذرات تقویت کننده ایجاد شده، از لحاظ ترمودینامیکی بسیار پایدار خواهد بود. در این حالت اندازه ذرات تقویت کننده ایجاد شده طی فرآیند کامپوزیت سازی به صورت نانومتری می باشد [3].

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 6 میلیمتر و حاوی 3 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. شکل 1 آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD) این پودر را نشان می دهد [4].

جهت اعمال فرآیند، ورق هایی از جنس AZ31-H24 با طول 20 سانتی متر، عرض 5 سانتی متر و ضخامت 5 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 1 است، استفاده شد. ابزار سخت شده مورد استفاده از جنس فولاد ابزار H13 با قطر شانه و پین 17 سانتی متر و 6 میلیمتر می باشد. مطالعات مروری [2و5] 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 3 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 3 میلیمتر و پهنای 2 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 1500 دور بر دقیقه و سرعت پیشروی 60 میلیمتر بر دقیقه بسته شد. شکل 2 شماتیکی از انجام این فرآیند را نشان می دهد. 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 87 درجه داشته باشد.

نتایج و بحث

فرآیند اصطکاکی اغتشاشی با پارامتر بهینه شده ($W=1250\text{rpm}$ و $V=40\text{mm/min}$) طی پاس های مختلف از یک تا پنج پاس انجام گرفت. نتایج آزمون سختی سنجی از ناحیه کامپوزیتی در پاس های مختلف در شکل 3 ارائه شده است.

همانگونه که ملاحظه می گردد با افزایش تعداد پاس های فرآیند، مقدار سختی ناحیه اغتشاش افزایش می یابد. به گونه ای که تا سه پاس فرآیند، میزان سختی افزایش چشمگیری دارد و پس از آن تغییرات چشمگیری در

مقدار سختی مشاهده نمی شود. در نتیجه در ادامه بررسی های مکانیکی بر پایه سه پاس فرآیند انجام گرفته است. در شکل 4 میانگین اندازه سختی کامپوزیت Mg-Al/NiO پس از سه پاس فرآیند آورده شده است که حدود 140 ویکرز است. این میزان سختی حدود سه برابر سختی فلز پایه می باشد. در حقیقت وجود تقویت کننده های سخت نظیر MgO و NiO در کامپوزیت هیبریدی AZ31-NiO باعث افزایش سختی نسبت به فلز پایه شده است.

الگوی پراش پرتو ایکس نمونه های کامپوزیتی ایجاد شده پس از یک و سه پاس فرآیند اصطکاکی اغتشاشی در شکل 5 ارائه شده است. همتگونه که ملاحظه می گردد، با اعمال فرآیند اصطکاکی اغتشاشی به دلیل حرارت ایجاد شده در ناحیه فرآیند و نیز نرخ کرنش بالا (حدود $56S^{-1}$)، در همان پاس های ابتدایی واکنش احیای اکسید نیکل توسط منیزیم انجام شده و ذرات تقویت کننده MgO، $Al_{12}Mg_{17}$ و ترکیبات بین فلزی بر پایه Al-Ni در زمینه ایجاد شدند. بررسی دقیق تر الگوی پراش پرتو ایکس نشان می دهد که با افزایش تعداد پاس های فرآیند، بر میزان تقویت کننده های ناشی از واکنش میان عناصر Mg-Al-Ni-O افزوده شده است. در حقیقت طی فرآیند اصطکاکی اغتشاشی به دلیل ایجاد تغییر شکل پلاستیک شدید و در نتیجه اختلاط و اغتشاش مواد و بالا بودن دما (حدود 711 درجه کلوین) سرعت نفوذ عناصر افزایش می یابد. این امر منجر به تسریع در واکنش میان عناصر موجود در این سیستم آلیاژی می گردد.

در شکل 6 نمودار تنش - کرنش بدست آمده از آزمون کشش بر روی نمونه های فلز پایه و نانو کامپوزیت هیبریدی AZ31-NiO ارائه شده است. همانگونه که در این شکل ملاحظه می شود، کامپوزیتی کردن سبب افزایش استحکام کششی و مدول الاستیک و البته کاهش انعطاف پذیری نمونه ها شده است. نتایج حاکی از آن است که در اثر اعمال سه پاس فرآیند اصطکاکی اغتشاشی، استحکام نهایی از 218 مگاپاسکال برای ورق منیزیم تا 320 مگاپاسکال برای نمونه نانو کامپوزیتی افزایش پیدا کرده است. مهم ترین علت افزایش استحکام نانو کامپوزیت نسبت به فلز، مشکل شدن حرکت نابجایی ها در اثر برخورد با نانوذرات (استحکام دهی اوروان) می باشد.

نتایج XRD نشان داد که طی واکنش های زیر، پیک های مربوط به NiO طی هر پاس فرآیند اصطکاکی اغتشاشی ضعیف تر شده و در عوض پیک های مربوط به MgO و تشکیل ترکیبات بین فلزی Al-Ni قویتر می شوند.



تغییر انرژی آزاد گیبس استاندارد نیز با توجه به رابطه زیر محاسبه می شود:

$$\Delta G_T^0 = -362600 + 13.7T$$

نتایج اندازه گیری دما نشان داد که بیشینه دما طی فرآیند اصطکاکی اغتشاشی 711 درجه کلوین می باشد. در این دما تغییر انرژی آزاد گیبس استاندارد واکنش های بالا منفی خواهد بود. بنابراین امکان انجام این واکنش به صورت خود به خودی فراهم است. خود به خودی بودن این واکنش ها شرط ترمودینامیکی انجام واکنش ها را توجیه می کند اما باید شرط سینتیکی واکنش ها نیز بررسی شود. غالباً بیشینه دما در FSW/FSP آلیاژهای آلومینیوم و کامپوزیت های آن ها، کمتر از دمای ذوب منیزیم می باشد [3]. در این حالت واکنش میان Mg و NiO به علت انجام واکنش در حالت جامد بسیار ضعیف است و سرعت واکنش ها توسط نفوذ کنترل می گردد. بنابراین سرعت این واکنش ها به سطح تماس اولیه، اندازه ذرات و فاکتورهای موثر بر نرخ نفوذ مانند چگالی عیوب، دمای موضعی و مرفولوژی تولید وابسته می باشد. اغلب در یک سیستم فعال شده توسط حرارت¹ موقعیت واکنش دهنده ها ثابت می باشد و واکنش در اطراف یک ذره بزرگ انجام می شود. لذا در این گونه سیستم ها نرخ نفوذ و به تبع آن سرعت واکنش در حالت جامد کم است [3]. طی فرآیند اصطکاکی اغتشاشی چرخش بین رزوه دار منجر به تغییر شکل پلاستیک شدید در ناحیه اغتشاش با نرخ کرنش بین 10²- و 10³ کرنش بیشتر از 40 می شود. این امر شکسته شدن فیلم اکسیدی اطراف Mg و مخلوط شدن Mg و NiO را به همراه دارد. در این حالت به صورت درجا یک تماس اولیه بسیار عالی میان Mg و NiO ایجاد خواهد شد. در نتیجه نفوذ میان آن ها تسریع می شود. از طرف دیگر شار نفوذی به صورت مستقیم با شیب غلظتی اجزاء تقویت کننده در فصل مشترک آن ها متناسب است. برای یک نفوذ پایدار² غلظت اجزاء در فصل مشترک به صورت تدریجی تغییر می کند. در این حالت تعادل میان اتم ها توسط نفوذ کنترل می شود. در حالیکه نفوذ طی فرآیند اصطکاکی اغتشاشی با نفوذ پایدار متفاوت می باشد. در این حالت غلظت تعادلی اتم ها بین دو جزء متفاوت، طی تغییر شکل پلاستیک شدید دگرگون شده و یک سطح تماس جدید با ترکیب بسیار متفاوت جهت تشکیل یک کوپل نفوذی جدید ایجاد می شود. در این حالت اختلاف بسیار زیاد غلظت اتم ها در فصل مشترک، بهبود شار نفوذی را به همراه خواهد داشت. علاوه بر این طی تغییر شکل پلاستیک شدید حین فرآیند اصطکاکی اغتشاشی، چگالی بسیار بالایی از عیوب ساختاری نظیر نا به جایی ایجاد می شود. بنابراین نرخ نفوذ به دلیل ایجاد مکانیزم Pipe diffusion تسریع می شود. از طرف دیگر براساس تئوری سینتیک واکنش، مولکول ها یا اتم های واکنش دهنده برای واکنش با یکدیگر، ابتدا باید از سد انرژی فعال سازی عبور کنند. یعنی برای انجام واکنش، مولکول ها یا اتم های واکنش دهنده باید مقداری انرژی اضافی حین فرآیند به دست آورند، هرچند که نیروی ترمودینامیکی کافی جهت انجام واکنش موجود باشد. به این انرژی، انرژی اکتیواسیون³ گفته می شود.

¹ Thermally activated system

² Steady state

³ Activation energy

تغییر شکل پلاستیک شدید طی فرآیند اصطکاکی اغتشاشی به عنوان یک فعال کننده مکانیکی، انرژی فعال سازی واکنش و به تبع آن دمای انجام واکنش را کاهش داده و نرخ نفوذ را افزایش می دهد.

فعال کننده مکانیکی طی فرآیند اصطکاکی اغتشاشی از راه های زیر به دست می آید:

ابتدا طی تغییر شکل پلاستیک شدید، هنگامی که نا به جایی ها در صفحه لغزشی حرکت می کنند، انرژی مکانیکی را به انرژی سینتیکی اتم ها تبدیل کرده و تحرک پذیری اتم ها را بهبود می دهد. دوم طی تغییر شکل پلاستیک شدید، باندهای شیمیایی در جامد شکسته می شود. این امر باعث دگرگون شدن ساختار کریستالی ماده و در نتیجه نفوذ راحت اتم ها یا مولکول های واکنش دهنده به ساختار نامنظم جامد و انجام واکنش می شود. سوم، تغییر شکل پلاستیک شدید باعث کاهش اندازه دانه های زمینه می شود. یک ساختار فوق ریزدانه باعث کاهش دمای آغاز واکنش و افزایش سرعت واکنش می شود. تحقیقات نشان می دهد که اندازه دانه های تبلور مجدد یافته جدید اطراف پین طی فرآیند اصطکاکی اغتشاشی در محدوده $100-25$ نانومتر است [3].

بنابراین منطقی به نظر می رسد که واکنش میان NiO و دانه های ریز زمینه به طور ذاتی طی FSP بهبود یابد.

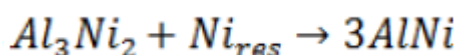
با توجه به واکنش های (1) و (2) واکنش میان محلول جامد α -Mg و NiO را می توان به دو مرحله تقسیم کرد. ابتدا NiO با Mg برای ایجاد MgO و اتم های آزاد Ni واکنش می دهد، سپس Ni ایجاد شده در مرحله اول با Al موجود در زمینه (حدود 3 درصد وزنی) برای ایجاد ترکیبات بین فلزی بر پایه Al-Ni واکنش می دهد. هنگامی که واکنش اول انجام شد، ذرات MgO به صورت درجا در زمینه ایجاد می شوند. در فرآیند FSP ابتدا ذرات NiO به صورت بسیار یکنواخت در زمینه α -Mg توزیع و توسط زمینه احاطه می گردند. در این حالت طی تغییر شکل پلاستیک شدید، سرعت واکنش میان زمینه و ذره به طور چشمگیری افزایش خواهد یافت. به طوریکه تعداد زیادی از ذرات MgO در فصل مشترک Mg/NiO هسته گذاری و رشد می کنند. همچنین طی تغییر شکل پلاستیک ذرات MgO به سرعت از ذرات NiO که واکنش نداده اند جدا و در زمینه توزیع می شوند. وجود آلومینیوم، حلالیت نیکل در منیزیم را به دلیل تشکیل ترکیبات بین فلزی Al-Ni کاهش می دهد. در این پژوهش طی فرآیند اصطکاکی اغتشاشی ترکیبات بین فلزی AlNi و Al_3Ni_2 در زمینه ایجاد شدند. هنگامی که واکنش (1) انجام شد، اتم های آزاد نیکل در زمینه رها شدند. سپس به دلیل نیروی محرکه ترمودینامیکی بالاتر اتم های آزاد نیکل جهت واکنش با آلومینیوم در مقایسه با منیزیم، ترکیبات بین فلزی بر پایه Al-Ni تشکیل شدند.

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 خواص مکانیکی آن ها مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت.

نتایج بررسی سختی سنجی از ناحیه کامپوزیتی نشان داد که اعمال فرآیند اصطکاکی اغتشاشی با سرعت چرخشی ابزار حدود 1250 دور بر دقیقه، سرعت پیشروی معادل 40 میلیمتر بر دقیقه و 5 پاس فرآیند منجر به ایجاد بیشترین سختی خواهد شد.

نتایج بررسی های فازی توسط الگوی پراش پرتو ایکس نشان می دهد که از همان آغاز فرآیند، واکنش احیای اکسید نیکل توسط Mg انجام گرفته است که نتیجه آن ایجاد اکسید منیزیم و مولکول ها یا اتم های نیکل آزاد در زمینه می باشد. سپس اتم ها یا مولکول های نیکل آزاد ایجاد شده با آلومینیوم موجود در زمینه به علت نیرو محرکه ترمودینامیکی بیشتر نسبت به منیزیم واکنش داده و ترکیبات بین فلزی Al_3Ni_2 و $AlNi$ ایجاد می گردند. همچنین مشخص شد که از یک طرف با افزایش پاس های فرآیند بر میزان تقویت کننده های حاصل از واکنش های درجا افزوده می شود و از طرف دیگر ترکیب بین فلزی Al_3Ni_2 ایجاد شده در پاس های قبلی، با نیکل آزاد موجود در زمینه در مراحل (پاس های) بعدی فرآیند، واکنش می دهد. این امر منجر به تشکیل ترکیب بین فلزی $AlNi$ طی واکنش مقابل می گردد.



بررسی خواص مکانیکی نمونه نانو کامپوزیتی حاوی ذرات تقویت کننده در سیستم آلیاژی Mg-Al/NiO نشان می دهد که پس از اعمال 3 پاس فرآیند، سختی نمونه کامپوزیتی به بیشینه خود یعنی 2/5 برابر فلز پایه رسید. همچنین در اثر حضور این ذرات تقویت کننده و مشکل شدن حرکت نا به جایی ها طبق مکانیزم اوروان، میزان استحکام کششی نانو کامپوزیت Mg-Al/NiO پس از اعمال 3 پاس فرآیند به مقدار 320 مگاپاسکال می رسد.

مراجع

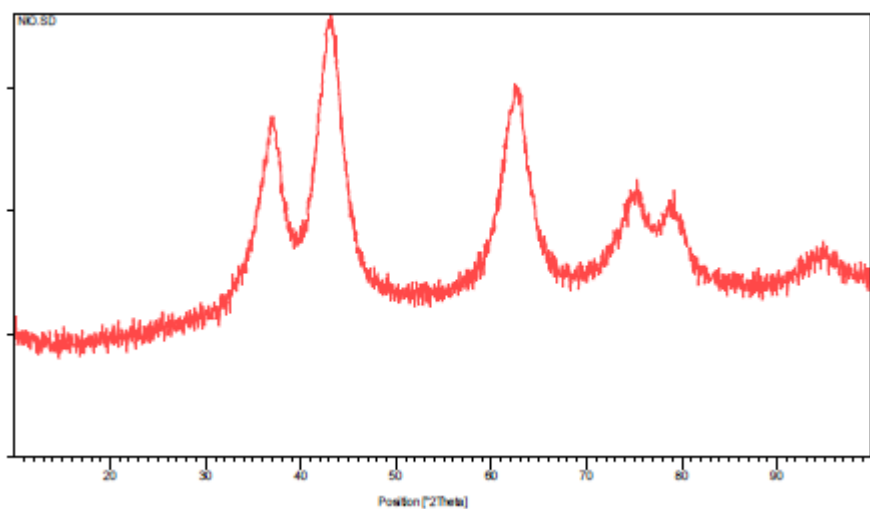
[1] J. Qian, J. Li, J. Xiong, F. Zhang, X. Lin, " In situ synthesizing Al_3Ni for fabrication of intermetallic-reinforced aluminum alloy composites by friction stir processing", *Journal of Materials Science and Engineering A.*, Vol. 550, pp. 279– 285, 2012.

[2] 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.

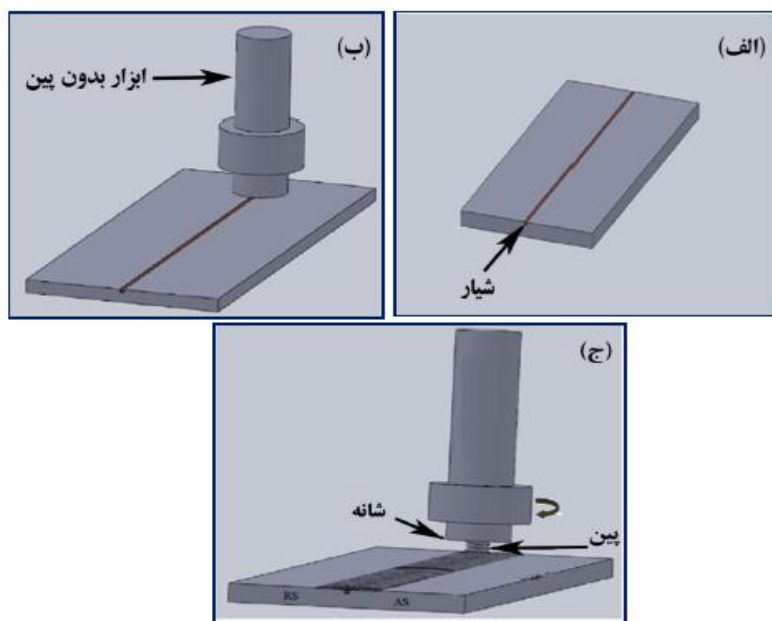
- [3] Sun, Q.Y. Shi, Y.J. Sun , G.Q. Chen, " Microstructure and mechanical property of nano-SiCp reinforced high strength Mg bulk composites produced by friction stir processing", *Journal of Materials Science and Engineering A*, Vol. 547, pp. 32– 37, 2012.
- [4] C.W. Chung, R.G. Ding, M. Gao, "Microstructure and mechanical properties of an as-cast AZ91 magnesium alloy processed by equal channel angular pressing", *journal of Materials Science and Engineering*, Vol. 4, pp. 1-5, 2009.
- [5] 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.
- [6] J. Qian, J. Li, J. Xiong, F. Zhang, X. Lin, " In situ synthesizing Al₃Ni for fabrication of intermetallic-reinforced aluminum alloy composites by friction stir processing", *journal of Materials Science and Engineering A.*, Vol. 550, pp. 279– 285, 2012.
- [7] R.S. Mishra, Z.Y. Ma, "Friction stire welding and processing", *Journal of MateriaScience And Engineering.*, R. 50, pp. 1-78, 2005.
- [8] Olsen, Korrosionseigenschaften von neuen magnesium legierungen, *Metall*, Vol 46, pp 6, 1992.
- [9] Mahoney Y M.W., Rhodes C.G., Flintoff J.G., Spurling R.A., Bingal., " Properties of Friction-Stir-Welded 7075 T651 Aluminum"., Vol. 29., pp.1955., 1988.

جدول 1: مشخصات دستگاه فرآیند اصطکاکی اغتشاشی

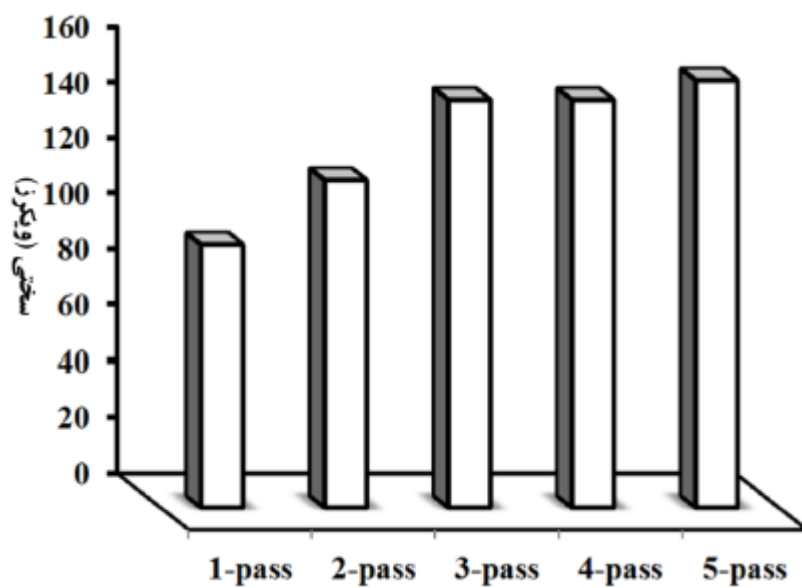
توان موتور اصلی	7 اسب بخار
سرعت دورانی	40 تا 2000 دور بر دقیقه
توان موتور محرک میز کار	2 اسب بخار
سرعت پیشروی میز کار	30 تا 600 میلیمتر بر دقیقه
زاویه چرخش فک نسبت به میز کار	0 تا 90



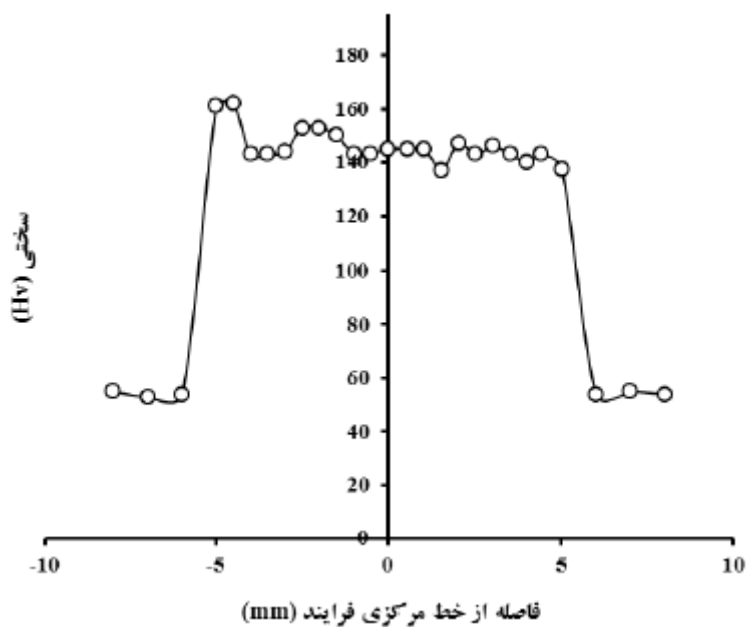
شکل 1: الگوی پراش پرتو ایکس ذرات NiO



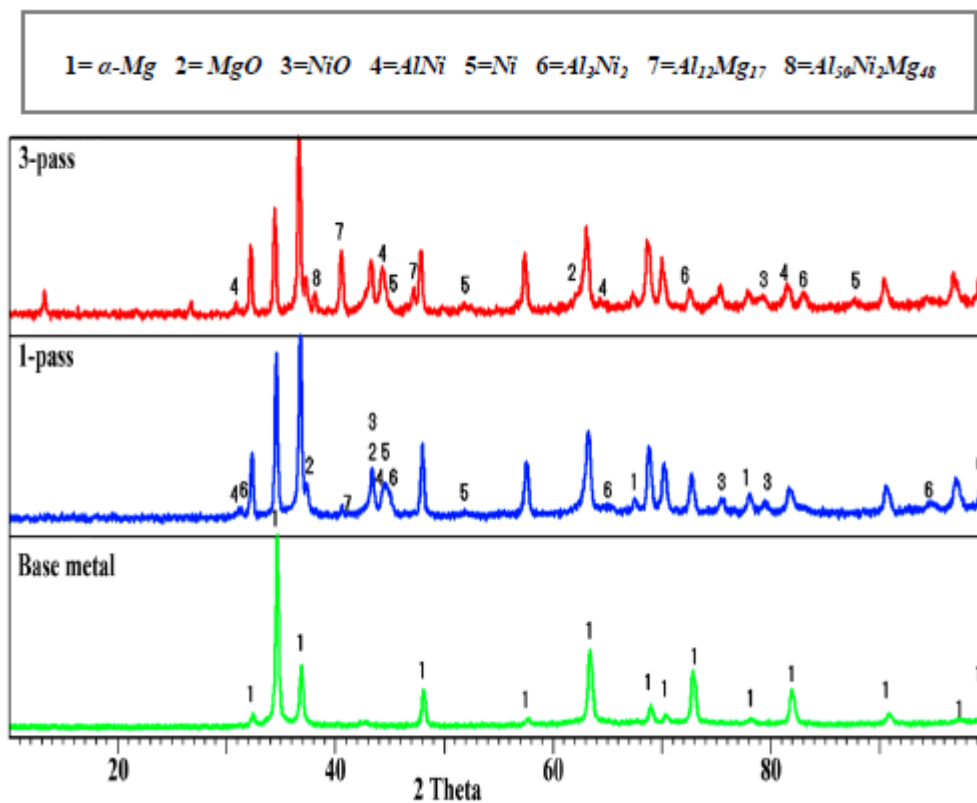
شکل 2: شماتیکی از انجام فرآیند، (الف) ایجاد شیار سطحی و پر کردن آن با ذرات (ب) اعمال ابزار بدون پین (ج) اعمال فرآیند با ابزار اصلی



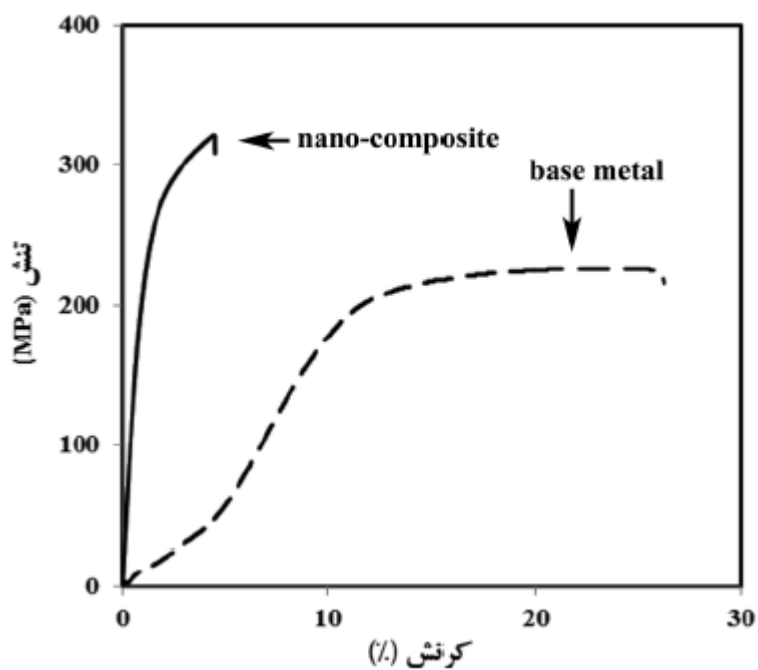
شکل 3: تاثیر تعداد پاس فرآیند بر میانگین سختی ناحیه اغتشاش



شکل 4: توزیع سختی در کامپوزیت های AZ31-NiO



شکل 5: الگوی پراش پرتو ایکس برای نمونه های کامپوزیتی و فلز پایه



شکل 6: نمودار تنش - کرنش مهندسی مربوط به فلز پایه و نمونه نانو کامپوزیتی