

تأثیر پارامترهای فرآیند اصطکاکی اغتشاشی روی ریزساختار و خواص مکانیکی منیزیم

مهدی عزیزیه^{*}، رضا بهادرانی بیرگانی^۱، سحر جعفری^۱، زهره بلک^۱ و مهدی بروجردنیا^۱

چکیده

فرآیند اصطکاکی اغتشاشی به عنوان یکی از فرآیندهای بهبود ریزساختار سطحی مواد مورد توجه است. در این پژوهش تأثیر پارامترهای این فرآیند روی ریزساختار و خواص مکانیکی منطقه اغتشاشی مورد بررسی قرار گرفت. پارامترهای مورد بررسی در این پژوهش سرعت چرخش و طراحی ابزار می‌باشد. از سه ابزار با پین مخروطی، پین بدون رزوه و پین رزوه دار استفاده شد. سرعت چرخش‌های مورد استفاده، ۴۰۰، ۵۰۰، ۶۳۰، ۸۰۰، ۱۰۰۰، ۱۲۵۰ و ۱۶۰۰ دور در دقیقه می‌باشد. بهبود سیلان مواد با افزایش سرعت چرخش موجب از بین رفتن حفرات ایجاد شده در حین فرآیند اصطکاکی اغتشاشی گردید. هم-چنین در ابزار رزوه دار به دلیل بیش‌ترین سیلان مواد بی‌عیب‌ترین حالت از نظر عدم وجود حفرات مشاهده گردید. هم‌چنین به دلیل تغییر شکل بیش‌تر مواد در حالت استفاده از ابزار رزوه دار، مکان‌های جوانه زنی تبلور مجدد بیش‌تر شده و در نتیجه کوچکترین اندازه در این حالت حاصل شد. هم‌چنین تغییر بافت کریستالی در اثر فرآیند اصطکاکی اغتشاشی حاصل گردید. این تغییر به صورتی بود که سطح مقطع نمونه اغتشاشی بیش‌تر شامل صفحه لغزش و دوقلوبی می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: فرآیند اصطکاکی اغتشاشی، منیزیم، ریزساختار، شبکه ششگوشه فشرده، تبلور مجدد

^۱ - گروه مواد، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران
^{*} - نویسنده مسوول مقاله: azizieh@iauhvaz.ac.ir

پیشگفتار

جاذبیت آلیاژهای منیزیم به خاطر استحکام به وزن بالا و در نتیجه کاهش وزن قطعات صنعتی روز به روز در حال افزایش است. این زمینه در صنایع خودروسازی به دلیل کاهش مصرف سوخت حساسیت بالاتری دارد. اما ساخت قطعات از طریق ریخته‌گری به دلیل واکنش پذیری بالای عنصر منیزیم بسیار مشکل می‌باشد. در نتیجه اکثراً از ریخته‌گری اجتناب می‌شود و تمایل برای ساخت قطعات با فرآیندهای شکل‌دهی بیش‌تر است. این در حالی است که منیزیم با توجه ساختار ششگوشه فشرده خود، به دلیل پایین بودن تعداد صفحات لغزش فعال، دارای شکل پذیری مناسبی نیز نمی‌باشد. با این حال کاهش اندازه دانه تأثیر بسیار زیادی روی شکل‌پذیری منیزیم داشته و حتی در مقایسه با آلیاژهای آلومینیوم، ریزدانه‌گی موجب افزایش استحکام همراه با بهبود انعطاف پذیری بیش‌تری می‌شود [۱]. بسیاری از مطالعات روی بهبود ریزساختار آلیاژهای منیزیم و تأثیر کاهش اندازه دانه روی خواص مکانیکی انجام شده است. در آلیاژهای منیزیم به دلیل تفاوت بسیار زیادی که در تنش برشی بحرانی برای لغزش در صفحات {۰۰۱} و بقیه صفحات لغزش وجود دارد، خواص مکانیکی ناهمسانگردی وجود دارد [۲ و ۳]. در نتیجه در قطعات منیزیم کار شده علاوه بر این اندازه دانه، بافت کریستالی تأثیر بسیار زیادی روی خواص مکانیکی دارد [۴ و ۵]. مطالعات اخیر در فرآیند اصطکاکی اغتشاشی نشان داده که کاهش اندازه دانه و همگن‌سازی ریزساختار در آلیاژهای منیزیم در اثر تغییر

شکل پلاستیک شدید و تبلور مجدد دینامیک ایجاد می‌شود. علاوه بر این تغییر بافت کریستالی که در اثر فرآیند اصطکاکی اغتشاشی اتفاق می‌افتد در مطالعات بسیاری مورد بررسی قرار گرفته است [۷ و ۸]. هم‌چنین مطالعات بسیار زیادی روی ارتباط بین اندازه دانه و خواص مکانیکی آلیاژهای منیزیم و تطابق آن با رابطه هال-پچ انجام شده است. اما تأثیر سرعت چرخش و نوع ابزار روی تغییرات اندازه دانه و بافت کریستالی آلیاژهای منیزیم انجام نشده است. در این پژوهش هدف بررسی تأثیر سرعت چرخش و شکل ابزار روی اندازه دانه و تغییرات بافت کریستالی فلز منیزیم ریخته‌گی می‌باشد. هم‌چنین تأثیر پارامترهای فرآیند اصطکاکی اغتشاشی روی سختی منطقه اغتشاشی بررسی می‌شود.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش از شمش منیزیم با خلوص ۹۹/۷ درصد به عنوان ماده اولیه استفاده شد. از این شمش قطعاتی با ضخامت ۱۰ میلی‌متر و ابعاد ۱۰×۷ سانتیمتر بریده شد. سپس برای ثابت ماندن پارامترهای فرآیند اصطکاکی اغتشاشی، دو سطح قطعات بریده شده، کاملاً تراز و صیقلی گردید. ابزارهای مورد استفاده برای فرآیند اصطکاکی اغتشاشی، از جنس فولاد گرمکار H13 ساخته شد، که پس از تراشکاری، تحت عملیات حرارتی قرار گرفت و سختی آن به ۵۰ HRC رسید. در این پژوهش از سه نوع ابزار با پین رزوه دار، بدون رزوه و مخروطی شکل استفاده شده که در شکل ۱ قابل مشاهده هستند.



شکل ۱- ابزارهای مورد استفاده: از سمت چپ، ساده، رزوه دار و مخروطی

بودن حجم مواد سیلان کننده در اثر کاهش حجم مواد قرار گرفته بین پین و شانه ابزار می‌باشد. در حالی که در پین مخروطی حجم مواد در حال سیلان اطراف پین به دلیل پایین بودن اندازه پین کمتر است. با این حال در نمونه‌های اصطکاکی اغتشاشی شده با ابزار استوانه‌ای بدون رزوه در سرعت‌های چرخش بالا (۱۲۵۰ و ۱۶۰۰ دور در دقیقه) حفرات باز هم در قسمت پیشرونده مشاهده می‌شود. به طور کلی در فرآیند اصطکاکی اغتشاشی به دلیل هم جهت بودن سرعت خطی ابزار چرخنده با جهت حرکت ابزار در قسمت پیشرونده، میزان سیلان ابزار در قسمت پیشرونده بیش از قسمت پسرونده ابزار می‌باشد. در نتیجه مواد از قسمت پیشرونده ابزار کنده شده و به قسمت پسرونده حرکت می‌کنند (شکل ۵). در این حالت حفراتی در قسمت پیشرونده مشاهده می‌شود. این حفرات در قسمت پیشرونده تمامی نمونه‌های در اشکال ۲، ۳ و ۴ دیده می‌شود. با افزایش سرعت چرخش، به دلیل افزایش سیلان، مواد وارد شده به قسمت پسرونده امکان حرکت به سمت قسمت پیشرونده را پیدا می‌کنند. در نتیجه در این نمونه‌ها حفره‌ای در قسمت پیشرونده دیده نمی‌شود. اما با افزایش سرعت چرخش ابزار در نتیجه افزایش سیلان، مواد وارد شده به قسمت پیشرونده دوباره به سمت پسرونده می‌روند و باز هم حفراتی در قسمت پیشرونده مشاهده می‌شود. به همین ترتیب امکان ایجاد و یا عدم ایجاد حفرات با افزایش سرعت چرخش وجود دارد. با این حال، در نمونه‌های اصطکاکی اغتشاشی شده با ابزار استوانه‌ای رزوه‌دار، به دلیل افزایش سیلان مواد در اطراف پین در اثر وجود رزوه، در سرعت‌های بیش‌تر از ۵۰۰ دور در دقیقه حفره‌ای دیده نمی‌شود. رزوه‌های اطراف پین موجب می‌شود که علاوه بر سیلان مواد حول ابزار، مواد به صورت ماریچی به سمت پایین حرکت می‌کنند. این حالت در شکل ۶ دیده می‌شود. در نتیجه علاوه بر حرکت چرخشی مواد، سیلان مواد به صورت بالا به پایین در اطراف پین و پایین به بالا در مناطق دورتر از پین اتفاق می‌افتد. در نتیجه پس از کنده شدن مواد از قسمت پیشرونده، امکان بردن این منطقه وجود خواهد داشت. تنها در سرعت‌های چرخش پایین به دلیل کم بودن هر دو نوع سیلان، احتمال باقیمانده حفرات وجود خواهد داشت. حتی در

فرآیند اصطکاکی اغتشاشی با سرعت‌های چرخش ۴۰۰، ۵۰۰، ۶۳۰، ۸۰۰، ۱۰۰۰، ۱۲۵۰ و ۱۶۰۰ دور در دقیقه و سرعت پیشروی ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه انجام شد. پس از انجام فرآیند اصطکاکی اغتشاشی روی نمونه‌ها، از هر نمونه مقاطع عرضی تهیه و مورد بررسی قرار گرفت. ابتدا برای بررسی تاثیر پارامترهای فرآیند روی تغییرات سختی، آزمون میکروسختی در سطح مقطع روی خطی موازی و در عمق ۲ میلی‌متری از لبه نمونه، با فواصل ۱ میلی‌متر انجام شد. سپس بررسی‌های ریزساختاری نمونه با میکروسکوپ نوری، پس از پولیش و اچ کردن با محلول پیکرال انجام شد. در نهایت از منطقه اغتشاشی نمونه‌ها، آزمون تفرق اشعه ایکس انجام گردید. در آزمون تفرق اشعه ایکس هدف مطالعه تاثیر پارامترهای فرآیند روی بافت کریستالی نمونه‌های اصطکاکی اغتشاشی شده، بود.

نتایج و بحث

تصاویر مقطع نمونه‌های اصطکاکی اغتشاشی شده با سه ابزار استوانه‌ای بدون رزوه، مخروطی و استوانه‌ای رزوه دار در سرعت‌های چرخش مختلف به ترتیب در شکل‌های ۲، ۳ و ۴ مشاهده می‌شود. همان‌گونه که در این اشکال ملاحظه می‌شود که با افزایش سرعت چرخش، میزان حفرات ایجاد شده کاهش یافته است. این پدیده به دلیل افزایش میزان سیلان مواد می‌باشد. هم‌چنین در اثر افزایش سرعت چرخش، دمای منطقه اغتشاشی متاثر از اصطکاک افزایش یافته و مواد با تنش برشی بسیار کمتری دچار تغییر شکل پلاستیک و سیلان می‌شوند. مقایسه شکل ۲ و ۳ نشان‌دهنده کاهش میزان حفرات در نمونه‌های اصطکاکی اغتشاشی شده با ابزار استوانه‌ای بدون رزوه در مقایسه با ابزار مخروطی بدون زوه می‌باشد. در ابزار استوانه‌ای بدون رزوه در سرعت‌های ۸۰۰ تا ۱۰۰۰ دور در دقیقه حفره‌ای دیده نمی‌شود و میزان حفرات در سرعت‌های چرخش ۱۲۵۰ و ۱۶۰۰ هم بسیار کوچکتر از حالت مشابه در نمونه‌های اصطکاکی اغتشاشی شده با ابزار مخروطی است. در حالی که در نمونه‌های اصطکاکی اغتشاشی شده با ابزار مخروطی در همه نمونه‌ها کم و بیش حفره وجود دارد. وجود حفرات در نمونه‌های اصطکاکی اغتشاشی شده با ابزار مخروطی به دلیل پایین

شده در فرآیند اصطکاکی اغتشاشی حالت خود تنظیم کننده داشته و دما از حد مشخصی بالاتر نمی‌رود. نکته دیگری که در شکل ۸ قابل مشاهده است، بالا بودن اندازه دانه نمونه‌های اصطکاکی اغتشاشی شده با پین مخروطی نسبت به بقیه نمونه‌هاست. در حالی که نمونه‌های اصطکاکی اغتشاشی با پین رزوه‌دار کمترین اندازه دانه را در همه سرعت‌های چرخش دارند. اندازه دانه در مکانیزم تبلور مجدد نسبت مستقیم با تعداد مکان‌های مستعد جوانه‌زنی دارد. مکان‌های جوانه‌زنی تبلور مجدد، مرزدانه‌های با زاویه زیاد و مکان‌های تجمع نابجایی هستند [۷]. هرچه میزان تغییر شکل ماده بیش‌تر شود، به دلیل مکانیزم‌های لغزش و تولید نابجایی، میزان مکان‌های جوانه‌زنی تبلور مجدد بیش‌تر می‌شود. به طور مشخص در حالت استفاده از ابزار رزوه‌دار، به دلیل تغییر شکل بیش‌تری که ناشی از وجود رزوه‌ها در ماده اتفاق می‌افتد، تعداد مکان‌های جوانه‌زنی تبلور مجدد بیش‌تر شده و در نتیجه ریزساختار نهایی ریزتر خواهد شد. به همین علت بدیهی است که در حالت استفاده از پین مخروطی به دلیل تغییر شکل اعمال شده کمتر، اندازه دانه‌های درشت‌تری خواهیم داشت.

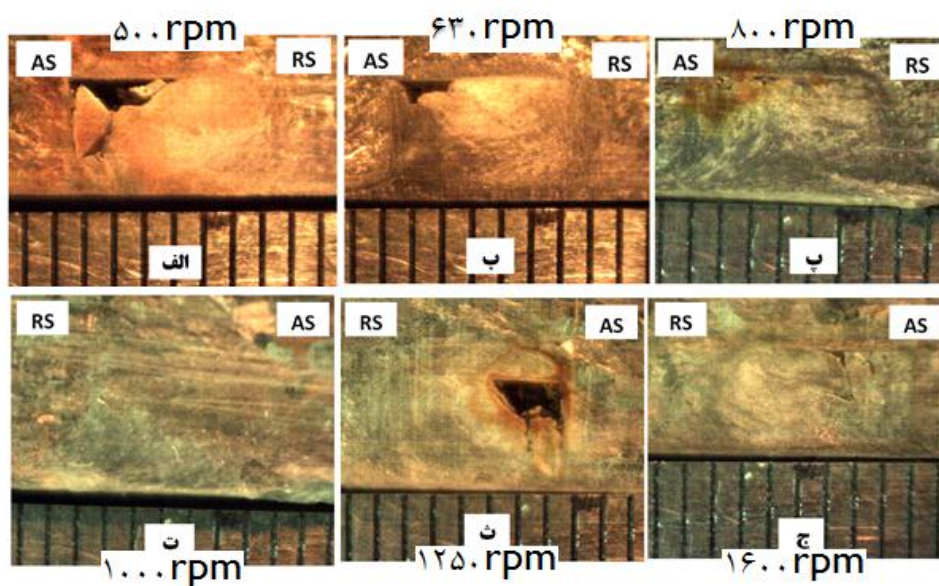
شکل ۹ سختی منطقه اغتشاشی در نمونه‌های اصطکاکی اغتشاشی با ابزارهای مختلف و در سرعت‌های چرخش متفاوت قابل مشاهده است. با توجه به اینکه سختی اولیه نمونه قبل از فرآیند حدود ۳۰ ویکرز اندازه‌گیری شد، افزایش چندانی در میزان سختی در اثر فرآیند مشاهده نگردید. تنها در نمونه‌های با سرعت چرخش پایین مقداری سختی افزایش یافت. افزایش جزئی عدد سختی در نمونه‌های اصطکاکی اغتشاشی شده به دلیل کاهش اندازه دانه در اثر مکانیزم تبلور مجدد می‌باشد. با این حال به دلیل از بین رفتن نابجایی‌ها در این مکانیزم، افزایش جزئی سختی تنها ناشی از کاهش اندازه دانه می‌باشد. در شکل ۹ مشخص است که با افزایش سرعت چرخش ابزار، سختی در همه نمونه‌ها روند کاهشی دارد که در اثر افزایش اندازه دانه در نتیجه افزایش حرارت ورودی می‌باشد. بالا بودن عدد سختی در نمونه‌های اصطکاکی اغتشاشی با ابزار رزوه‌دار به دلیل ریزدانه‌گی این نمونه‌ها نسبت به سایر نمونه‌ها می‌باشد.

نمونه اصطکاکی اغتشاشی شده با سرعت ۵۰۰ دور در دقیقه باز هم حفره در قسمت پیشرونده اتفاق می‌افتد.

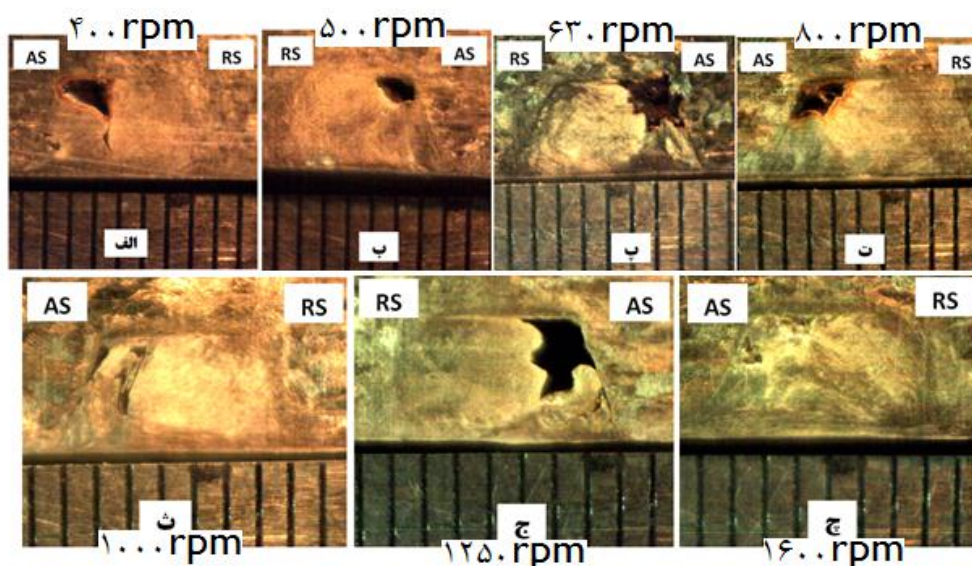
ریزساختار منطقه اغتشاشی نمونه اصطکاکی اغتشاشی شده با ابزار استوانه‌ای بدون رزوه در شکل ۷ دیده می‌شود. نکته مشخصی که در این تصاویر دیده می‌شود تفاوت شکل و اندازه دانه‌ها در نمونه‌های مختلف می‌باشد. در فرآیند اصطکاکی اغتشاشی به دلیل تغییر شکل دردمای بالا، تبلور مجدد دینامیک اتفاق می‌افتد. در نتیجه ساختار اولیه در اثر این فرآیند دچار ریزدانه‌گی می‌شود (شکل ۷). اما با افزایش سرعت چرخش ابزار - با وجود افزایش نرخ کرنش و در نتیجه افزایش چگالی نابجایی و مرزدانه و افزایش مناطق جوانه‌زنی تبلور مجدد - به دلیل افزایش دمای منطقه اغتشاشی، رشد دانه شدت بیش‌تری می‌یابد. به عبارت دیگر در سرعت‌های چرخش بالاتر کارنرمی از کارسختی پیشی گرفته و رشد دانه اتفاق می‌افتد. این حالت در شکل ۷ قابل مشاهده می‌باشد. نمونه‌ای که با سرعت ۶۳۰ دور در دقیقه تحت فرآیند قرار گرفته دارای دانه‌های درشت‌تری نسبت به نمونه ۵۰۰ دور در دقیقه می‌باشد. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد، با افزایش بیش‌تر سرعت چرخش ابزار، اندازه دانه منطقه اغتشاشی بزرگتر می‌شود. تغییرات اندازه دانه با تغییرات سرعت چرخش برای تمامی نمونه‌ها در شکل ۸ نشان داده شده است. نکته مشترک تمامی نمونه‌ها افزایش اندازه دانه با افزایش سرعت چرخش ابزار می‌باشد. با این حال مقایسه نمونه‌های مختلف نشان می‌دهد که ریزترین اندازه دانه مربوط به ابزار استوانه‌ای رزوه‌دار می‌باشد. علاوه بر این شیب افزایش اندازه دانه با افزایش سرعت چرخش روند کاهشی داشته و مشخصاً اختلاف اندازه دانه نمونه‌های اصطکاکی اغتشاشی شده با سرعت ۱۶۰۰ دور در دقیقه نسبت به نمونه اصطکاکی اغتشاشی شده با سرعت ۱۲۵۰ دور در دقیقه بسیار اندک می‌باشد. این حالت به دلیل کاهش گرمای حاصل از اصطکاک به دلیل افزایش لایه‌های خمیری اطراف پین در سرعت‌های چرخش بالا می‌باشد. به عبارت دیگر در سرعت چرخش بالا به دلیل افزایش حرارت، مقدار زیادی از مواد اطراف پین به صورت خمیری درآمده و در نتیجه میزان اصطکاک بین پین و قطعه کاهش می‌یابد. در نتیجه می‌توان گفت گرمای ایجاد

پس از این، با افزایش سرعت چرخش روند افزایش شدت ادامه می‌یابد. صفحات (۱۰۱۲) و (۱۰۱۳) که صفحات فعال در مکانیزم دوقلویی هستند نیز با افزایش سرعت چرخش با افزایش شدت روبرو هستند. البته با توجه به شکل ۱۲ چون صفحه (۱۰۱۳) به مرکز منطقه اغتشاشی نزدیکتر است به مقدار بیش‌تری توسط پراش اشعه ایکس قابل اندازه‌گیری است. همان‌گونه که در شکل ۱۱ دیده می‌شود، شدت صفحه (۱۰۱۳) پس از فرآیند اصطکاکی اغتشاشی در تمامی سرعت‌های چرخش، بیش‌تر از نمونه اولیه است. شبکه ششگوشه فشرده منیزیم به دلیل پایین بودن تعداد سیستم‌های لغزش در هنگام اعمال تغییرشکل بسیار مستعد دوقلویی می‌باشد. با توجه به اینکه در فرآیند اصطکاکی اغتشاشی تغییر شکل بالایی به قطعه وارد می‌شود، امکان تغییر شکل تنها به کمک لغزش امکان‌پذیر نبوده و مکانیزم غالب دوقلویی می‌باشد. این حالت در سرعت‌های چرخش پایین که نمونه در دماهای پایین تحت تغییر شکل قرار می‌گیرد، شدت بیش‌تری دارد. به شکلی که در سرعت‌های کمتر از ۸۰۰ دور در دقیقه صفحه لغزش شدت کمتری داشته و صفحه دوقلویی نقش بیش‌تری در تغییر شکل دارد. اما در سرعت‌های بالای ۸۰۰ دور در دقیقه به دلیل افزایش دمای منطقه اغتشاشی، احتمال لغزش افزایش یافته و در نتیجه آن، شدت پیک صفحه لغزش به سرعت افزایش می‌یابد. با این حال حتی در سرعت‌های چرخش بالا، شدت صفحه دوقلویی بیش‌تر از صفحه لغزش است. حتی صفحه (۱۰۱۰) که صفحه لغزش منشوری شبکه ششگوشه فشرده است، به دلیل نرخ کرنش فرآیند اصطکاکی اغتشاشی نقش چندانی در تغییر شکل نداشته و تغییر شدتی در این صفحه اتفاق نمی‌افتد.

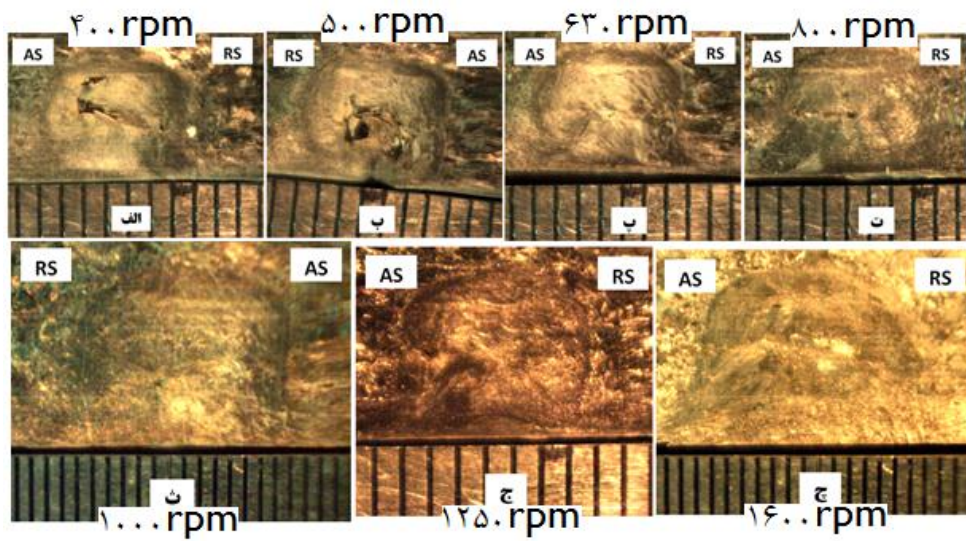
نتایج پراش پرتو ایکس نمونه‌های اصطکاکی اغتشاشی با ابزار رزوه‌دار در شکل ۱۰ قابل مشاهده می‌باشد. با توجه به خالص بودن ماده مورد استفاده تنها پیکهای منیزیم در این اشکال دیده می‌شود. از روی تغییرات شدت پیکها می‌توان تاثیر سرعت چرخش روی بافت کریستالی منطقه اغتشاشی را به طور مقایسه‌ای بررسی نمود. در شکل ۱۱ تاثیر سرعت چرخش روی تغییرات شدت صفحات لغزش دوقلویی و صفحات غیرفعال در تغییرشکل مشاهده می‌شود. در این شکل، محور عمودی ضریب تغییرات شدت پیکها در اثر انجام فرآیند می‌باشد. به عبارت دیگر در صورتی که پس از انجام فرآیند، ضریب تغییرات شدت پیک برابر یک باشد، تغییر در شدت آن صفحه مشخص، اتفاق نیافتاده است. کاهش و یا افزایش ضریب تغییرات از مقدار یک، نشان‌دهنده کاهش و یا افزایش شدت صفحه مورد نظر پس از انجام فرآیند می‌باشد. همان‌گونه که در شکل ۱۱ دیده می‌شود، صفحه اصلی لغزش در شبکه ششگوشه فشرده (۰۰۰۱) دارای بیش‌ترین تغییرات در حین فرآیند می‌باشد. با توجه به تغییر شکل شدید انجام شده حول پین، بررسی‌های انجام شده روی بافت کریستالی نمونه‌های اصطکاکی اغتشاشی نشان‌دهنده قرارگیری این صفحه لغزش حول پین چرخنده می‌باشد که در شکل ۱۲ دیده می‌شود. با توجه به اینکه آزمایش پراش اشعه ایکس روی مرکز منطقه اغتشاشی انجام گرفته است، بیش‌ترین تغییرات در جهت‌گیری صفحه (۰۰۰۱) اتفاق می‌افتد. با توجه به شکل ۱۱ در اثر انجام فرآیند اصطکاکی اغتشاشی در سرعت چرخش پایین، شدت این صفحه نسبت به نمونه اولیه کاهش یافته است. با افزایش سرعت چرخش میزان شدت این صفحه افزایش یافته به شکلی که در سرعت چرخش ۸۰۰ دور در دقیقه مقدار شدت این صفحه مشابه نمونه اولیه می‌باشد.



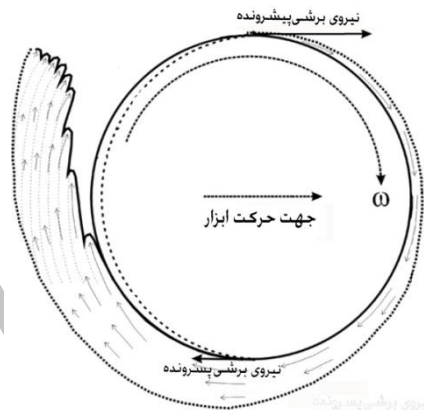
شکل ۲- سطح مقطع نمونه های اصطکاکی اغتشاشی شده با بین استوانه ای بدون رزوه.



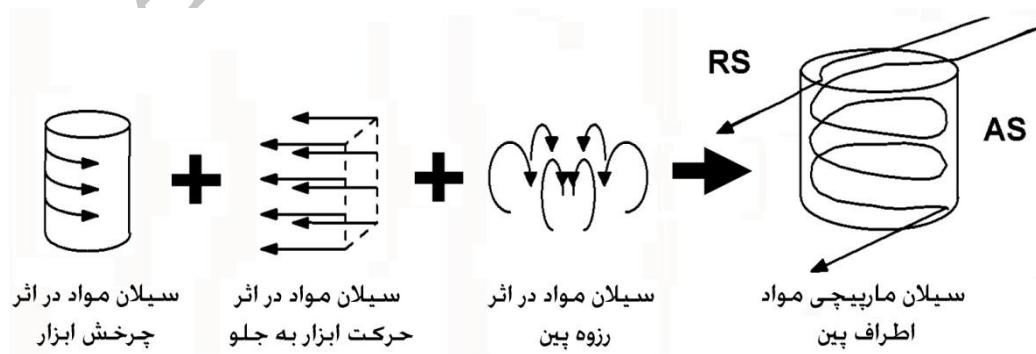
شکل ۳- سطح مقطع نمونه های اصطکاکی اغتشاشی شده با بین مخروطی.



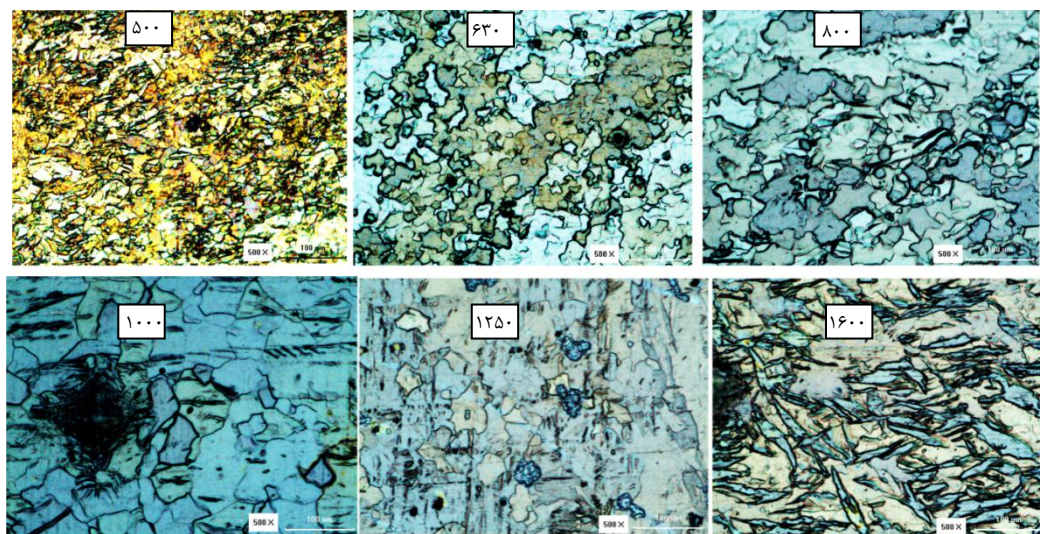
شکل ۴- سطح مقطع نمونه‌های اصطکاکی اغتشاشی شده با بین رزوه دار.



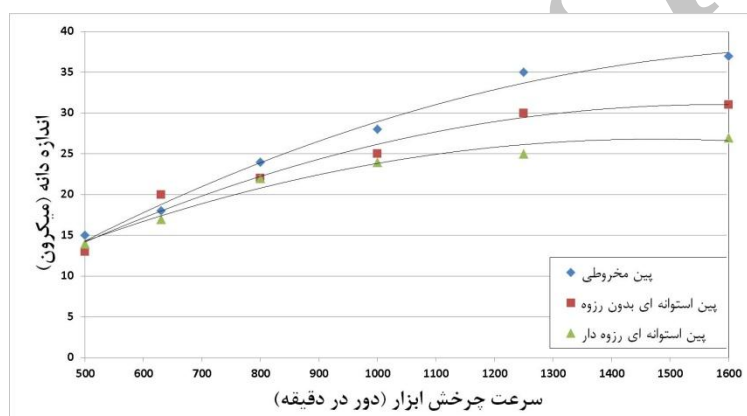
شکل ۵- سیلان مواد اطراف بین چرخنده.



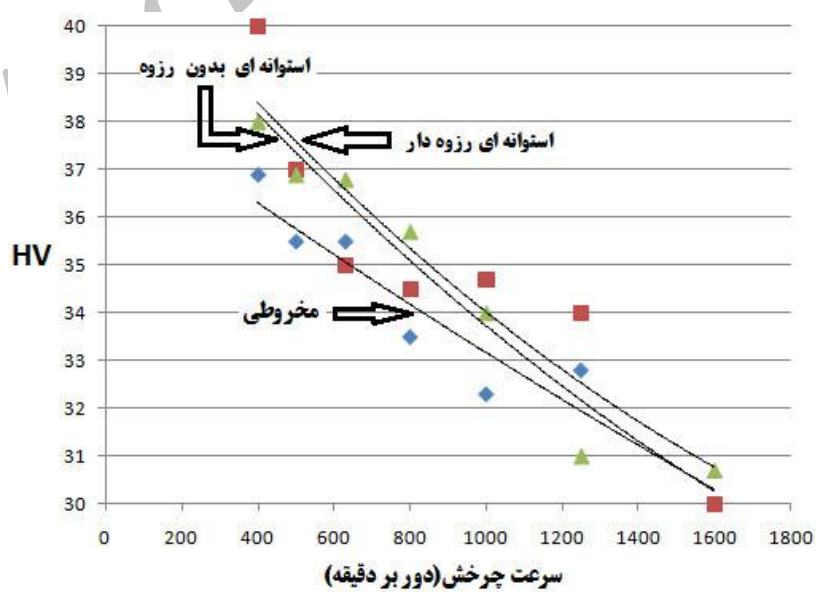
شکل ۶- سیلان مواد در اثر حرکت چرخشی، روبه جلو و رزوه های اطراف بین رزوه دار.



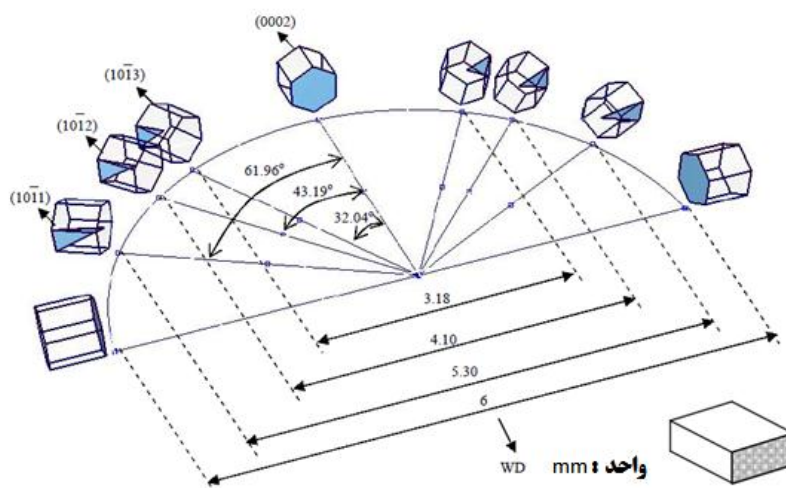
شکل ۷- ریز ساختار منطقه اغتشاشی بوسیله بین استوانه‌ای بدون رزوه در سرعت‌های چرخش مختلف.



شکل ۸- تأثیر سرعت چرخش روی اندازه دانه منطقه اغتشاشی.



شکل ۹- تأثیر سرعت چرخش روی سختی منطقه اغتشاشی.



شکل ۱۲- نحوه قرارگیری صفحات لغزش و دوقلویی در سطح مقطع نمونه اصطکاکی اغتشاشی شده.

کریستالی منیزیم که با حمایت معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز انجام گرفت.

Reference

1. Y.N. Wang, C.I. Chang, C.J. Lee, H.K. Lin and J.C. Huang, "Texture and weak grain size dependence in friction stir processed Mg-Al-Zn alloy", Scripta Materialia Vol. 55, pp. 637-640, 2006.
2. L. E. Murr, "A Review of FSW Research on Dissimilar Metal and Alloy Systems", Journal of Materials Engineering and Performance, Vol. 19, pp 1071-1089, 2010.
3. S. Charit, and R.S. Mishra, "Abnormal grain growth in friction stir processed alloys", Scripta Materialia, Vol. 58, pp. 367-371, 2008.
4. C.I. Chang, X.H. Du, and J.C. Huang, "Achieving ultrafine grain size in Mg-Al-Zn alloy by friction stir processing", Scripta Materialia, Vol. 57, pp. 209-212, 2007.
5. J. Tewari, J.E. Spowart, A.M. Gokhale, and R.S. Mishra, and D.B. Miracle, "Characterization of the effects of friction stir processing on microstructural changes in DRA composites", Materials Science and

نتیجه گیری

در این پژوهش ریزساختار و خواص مکانیکی نمونه‌های اصطکاکی اغتشاشی با ابزارها و سرعت‌های چرخش مختلف مورد بررسی قرار گرفت. تشکیل حفرات در قطعات اصطکاکی اغتشاشی شده در سرعت چرخش پایین در منطقه پیشرونده مشاهده گردید. با افزایش سرعت چرخش، به دلیل افزایش سیلان مواد، میزان این حفرات کاهش پیدا کرد. با افزایش بیش‌تر سرعت چرخش، به دلیل کنده شدن دوباره مواد از قسمت پیشرونده، حفراتی در نمونه‌های اصطکاکی اغتشاشی شده با ابزار مخروطی و بدون رزوه مشاهده شد. البته در ابزار رزوه دار به دلیل جهت‌گیری‌های مختلف حرکت مواد، در سرعت‌های بسیار بالا حفره‌ای مشاهده نگردید. بهبود اندازه دانه‌های در اثر مکانیزم تبلور مجدد در حین فرآیند اصطکاکی اغتشاشی قابل مشاهده بود که در نمونه اصطکاکی اغتشاشی شده با ابزار رزوه دار ریزترین دانه‌ها بدست آمد. با این حال به دلیل از بین رفتن نابجایی‌ها در مکانیزم تبلور مجدد وجود تعداد زیادی مرز فرعی، که کمتر نقش استحکام دهی دارند، افزایش سختی بسیار جزئی می‌باشد. همچنین بافت کریستالی مرکز سطح مقطع نمونه‌های اصطکاکی اغتشاشی شده بیش‌تر شامل صفحه لغزش (۰۰۰۱) و (۱۰۱۳) می‌باشد.

سپاسگزاری: این مقاله مستخرج از طرح پژوهشی با عنوان بررسی تأثیر فرآیند اصطکاکی اغتشاشی بر روی بافت

8. Z.Y. Ma, S.R. Sharma, R.S. Mishra, "Effect of friction stir processing on the microstructure of cast A356 aluminum", *Materials Science and Engineering*, Vol. A433 pp. 269–278, 2006.
۹. م. عزیزیه، ع. صادقی، ا.ح. کوبی، "بررسی ریزساختار و ویژگی‌های مکانیکی اتصال اصطکاکی اغتشاشی آلومینیوم ۱۱۰۰ به AZ31 مجله مواد نوین، دوره ۲، شماره ۲، زمستان ۱۳۹۰"
- Engineering, Vol. A428, pp. 80–90, 2006.
6. S.R. Sharma, Z.Y. Ma, R.S. Mishra, "Effect of friction stir processing on fatigue behavior of A356 alloy" *Scripta Materialia*, Vol. 51, pp. 237–241, 2004,
7. P. cavaliere, p. p. de marco, "Effect of friction stir processing on mechanical and microstructural properties of AM60B Magnesium alloy", *Journal of Materials Science*, Vol. 41, pp. 3459–3464, 2006.

Archive of SID