

بررسی اثرات ذرات دی سیلیساید مولیبدن (MoSi_2) بر رفتار مکانیکی و الکتریکی ماده مرکب زمینه مس تولید شده به روش اتصال نوردی تجمعی (ARB)

امیرحسین اسلامی^{۱*}، محمد محسن مشکسار^۲ و سید مجتبی زبرد^۳

چکیده

روش تغییر شکل پلاستیک شدید (SPD) به عنوان یکی از روش‌های تولید مواد با اندازه دانه نانومتری مطرح می‌باشد. برای ایجاد یک ساختار با دانه‌های نسبتاً ریز لازم است از راه اعمال کرنش‌های پلاستیک زیاد دانسیته بالایی از نابه‌جایی‌ها بدست آید. فرآیند نورد تجمعی ARB به عنوان یکی از پرکاربردترین روش‌های اعمال تغییر شکل پلاستیک شدید و دستیابی به ساختارهای نانومتری بویژه در ورق‌ها و در بعد صنعتی مطرح می‌باشد. در این پژوهش از فرآیند نورد اتصالی تجمعی برای تولید کامپوزیت Cu/MoSi_2 استفاده شده است. برای این منظور، از مس خالص تجاری و نانو ذرات MoSi_2 استفاده شده است. تعداد پنج مرحله نورد در شرایط بدون روانکار همراه با پیش گرمایش 300°C پیش از هر مرحله نورد بر نمونه‌ها اعمال شده است. نمونه‌های استاندارد از درون قطعات نورد شده تهیه و ریزساختار آن‌ها توسط میکروسکوپ الکترونی و خواص مکانیکی آن‌ها به وسیله آزمون‌های سختی و کشش مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین نقش همزمان ذرات تقویت کننده دی سیلیساید مولیبدن و نورد بر مقاومت الکتریکی کامپوزیت لایه ای به وسیله روش پراب چهار نقطه مورد بررسی قرار گرفت.

واژه‌های کلیدی: فرایند نورد تجمعی، خواص مکانیکی و مقاومت الکتریکی، ساختار لایه ای.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک دانشگاه آزاد اسلامی شیراز.

۲- استاد مهندسی مکانیک دانشگاه آزاد واحد مرودشت.

۳- استاد دانشکده مهندسی مواد دانشگاه شیراز.

*- نویسنده مسئول مقاله: Amir.hossein.E@hotmail.com

پیشگفتار

پیشرفت‌های اخیر در صنایع نظامی، برق و الکترونیک، اتومبیل‌سازی، قطارهای برقی، ابزارهای مغناطیسی و در صنایع پزشکی مستلزم استفاده از مواد با رسانایی بالا، خواص فیزیکی و مکانیکی خوب و هزینه مناسب می‌باشد. به همین منظور پژوهش‌های زیادی درباره مواد مرکب و بویژه آلیاژهای مس صورت گرفته است.

ریز شدن اندازه دانه یکی از روش‌های مهم استحکام بخشی مواد است که نسبت به سایر روش‌های استحکام بخشی از اهمیتی ویژه برخوردار است. با این روش می‌توان همزمان به ترکیب مناسبی از استحکام و چکش‌خواری دست یافت [۱]. در حالیکه در روش‌های دیگر، افزایش استحکام با کاهش چکش‌خواری همراه می‌باشد. یکی از روش‌هایی که ریز شدن اندازه دانه را به همراه دارد تغییر شکل بسیار زیاد و یا شدید^۱ (SPD) می‌باشد. در حقیقت این روش بر پایه ایجاد کرنش‌های پلاستیک بسیار زیاد در ماده استوار و به روش‌های تغییر شکل بسیار زیاد معروف می‌باشند. تغییر شکل‌های شدید پلاستیک ناشی از انواع فرآیندهای مکانیکی می‌تواند سبب ایجاد ساختار نانو و در مواردی تغییر ترکیب شیمیایی گردد [۲-۴]. یکی از روش‌های موفق SPD، اتصال از راه نورد تجمعی اتصالی^۲ (ARB) می‌باشد. فرایند اتصال نورد تجمعی ARB یکی از فرآیندهای تغییر شکل شدید پلاستیک می‌باشد که به وسیله تسوجی و سیتو در سال ۱۹۹۸ برای ساخت مواد حجیم ابداع شد [۵]. در این فرایند تغییر شکل پلاستیک زیادی از راه چند مرحله نورد متوالی انجام می‌گیرد.

مزیت این روش توانایی در تولید ورق با ساختار نانو در مقیاس صنعتی می‌باشد به همین دلیل از این روش بتازگی در تولید کامپوزیت‌های چند لایه استفاده شده است [۶]. این روش در واقع نوعی از فرایند ایجاد تغییر شکل پلاستیک در ماده می‌باشد که به کمک آن‌ها می‌توان بدون تغییر قابل ملاحظه در ابعاد قطعه، کرنش‌های پلاستیک بسیار زیادی در ماده ایجاد نمود. در سال‌های اخیر کامپوزیت‌های فلزی چند لایه به علت

خواص مکانیکی، الکتریکی و مغناطیسی برجسته مورد توجه زیادی واقع شده اند [۶].

ایده کلی برای افزودن ذرات به کامپوزیت‌ها جهت مستحکم کردن و تقویت آن‌ها می‌باشد. خواص مکانیکی و سایشی این کامپوزیت‌های تقویت شده با ذرات می‌تواند به صورت قابل توجهی نسبت به فاز زمینه بهبود یابد [۷].

مس خالص در مکان‌هایی که نیاز به استحکام بالا است قابلیت کاربرد ندارد. از سوی دیگر، خواص الکتریکی و حرارتی مس با آلیاژ سازی کاهش می‌یابد. سرامیک‌های پایه سیلیکونی کاندیداهایی مناسب برای کاربردهای دما بالا می‌باشند. مهم‌ترین عضو این گروه دی سیلیسیاید مولیبدن (MoSi_2) است. این ترکیب دارای خواص منحصر به فردی از جمله مقاومت در برابر اکسیداسیون در دماهای بالا، دمای ذوب بالا، استحکام بالا، سختی نسبتا بالا و دانسیته متوسط دارای کاربردهای فراوانی در پوشش فلزات، تولید المنت‌های حرارتی و استفاده در صنایع هوافضا می‌باشد. این ترکیب به دلیل خصوصیات مناسبی که دارد می‌تواند به عنوان عامل تقویت کننده زمینه کامپوزیت عمل نماید. هدف اصلی این پژوهش ایجاد ماده مرکب Cu/MoSi_2 و بررسی ریز ساختار، خواص مکانیکی و مقاومت الکتریکی کامپوزیت لایه ای ناشی از فرایند نورد تجمعی (ARB) می‌باشد.

روش پژوهش

مواد اولیه

مواد مورد استفاده در این پژوهش ورق‌های مس خالص تجاری و پودر MoSi_2 با اندازه ذره ۵۰ نانومتر می‌باشد که ترکیب، ابعاد و ویژگی‌های ورق مس استفاده شده در جداول ۱ و ۲ مشخص شده است. پودر MoSi_2 از راه آسیاب کردن المنت‌های ضایعاتی کوره‌های الکتریکی به مدت زمان ۳۶ ساعت تهیه گردید. از پودر تولید شده آنالیز XRD جهت تعیین فاز و اندازه کریستال‌ها گرفته شد. تصاویر XRD بیانگر این است که اندازه کریستال‌های MoSi_2 پس از ۳۶ ساعت آسیاب با نسبت گلوله به پودر ۱:۲۰ و با سرعت (جنس گلوله‌ها از فولاد هابی با قابلیت عملیات حرارتی و سختی بالا همچون MO40 می‌باشد) 300rpm به اندازه ذره ۵۰ نانومتر

¹ - Sever plastic deformation

² - Accumulated Roll Bonding

استحکام کششی با استفاده از دستگاه Zwick 250 صورت گرفت. در پایان مقاومت الکتریکی نمونه های تولید شده با روش پروب چهار نقطه اندازه گیری شد.

نتایج و بحث

تغییر ساختار لایه ای کامپوزیت Cu/MoSi_2 حین فرایند ARB

شکل ۴ تصویر میکروسکوپی کامپوزیت Cu/MoSi_2 با درصدهای گوناگون حجمی ۱ و ۱/۵ درصد (MoSi_2) تهیه شده تا ۵ سیکل را نشان می دهد. همراه با افزودن ذرات تقویت کننده بین ورق ها کاهش سطح مقطع گوناگون مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به شکل ۴ که تصویر میکروسکوپ الکترونی مقطع کناری ورق ها را نشان می دهد این نتیجه استنباط می شود که در مرحله افزودن پودر MoSi_2 درصد کاهش سطح مقطع بیش از ۶۰ درصد و پس از آن حین فرایند ARB ۵۰ درصد کاهش سطح مقطع، سبب ایجاد جوش سرد مناسب و ماده ای یکپارچه ای شده است. ورق ها تا سیکل پنجم بدون عیب فرآیند ARB را پشت سر گذاشتند، اما افزایش چگالی ناهنجاری و کاهش اندازه دانه سبب افزایش کرنش ماده و در نتیجه تردی گردید که این امر سبب پارگی ورق ها پس از سیکل پنجم ARB شد.

در مورد اثر وجود پودر تقویت کننده بین ورق ها بر چگونگی جوش سرد اختلاف نظر وجود دارد. لیو و همکارانش در پژوهش های خود اشاره کرده اند که حضور ذرات بین ورق ها کیفیت جوش را بهبود می دهد زیرا ذرات با ایجاد تمرکز تنش حین نورد ترک های سطحی را افزایش می دهند [۷].

همچنین، گزارش شده است که حضور ذرات با کاهش سطح تماس فلز-فلز اثر منفی بر کیفیت و استحکام جوش دارد [۸]. با این حال، در این آزمایش با ایجاد کاهش سطح مقطع بالاتر از ۶۰ درصد در مرحله نخست که پودر تقویت کننده بین لایه های مس وجود دارد و کاهش سطح مقطع ۵۰ درصدی در مراحل بعدی ARB جوش سرد مناسب و ماده ای یکپارچه بدست آمد. مشاهدات صورت گرفته در این پژوهش حاکی از آن بود که حضور ذرات تقویت کننده بین ورق ها با کاهش سطح

رسیده است. در شکل ۱ نانو ذرات MoSi_2 نشان داده شده است.

تولید کامپوزیت لایه ای Cu/MoSi_2

برای انجام فرآیند در ابتدا ورق های مس در ابعاد مشخص برشکاری شدند. از دو نوار مسی به ضخامت ۱ میلی متر و ابعاد ۱۲×۵ سانتی متر برای شروع فرآیند استفاده شد. جهت ساخت کامپوزیت ابتدا ورق ها با استون شسته و چربی زدایی گردید سپس برای ایجاد پیوند با استحکام بیش تر از سمباده سیمی دوار که قابلیت بسته شدن بر روی دستگاه دریل را دارد با اندازه قطر سیم $۰/۴$ میلی متر استفاده شد. روند انجام فرایند ARB برای کامپوزیت Cu/MoSi_2 در شکل ۳ نشان داده شده است. استفاده از سمباده سیمی بالاترین زبری سطح را ایجاد کرده و سبب ایجاد قویترین اتصال لایه ای بین ورق ها می شود. در این پژوهش بمنظور مقایسه و برآورد تأثیر افزودن ذرات MoSi_2 دو نوع کامپوزیت با درصدهای حجمی ۱ و ۱/۵ درصد دی سیلیساید مولیبدن ساخته شد. پس از آماده سازی سطوح بین دو ورق مس با ابعاد یکسان یک لایه پودر MoSi_2 (۱٪ و ۱/۵٪ حجمی) با الک به گونه ای یکنواخت پراکنده شد. سپس دو انتهای مجموعه ورق ها با سیم مسی بسته شدند تا حین نورد روی هم نلغزند. پس از پیش گرمایش (300°C به مدت ۱۰ دقیقه) ورق ها با یک کاهش بیش از ۶۰ درصد سطح مقطع نورد شدند. نمونه پس از پاس صفرم از وسط نصف و پس از آماده سازی دوباره و مهار چهار گوشه آن و اعمال پیش گرمایش دوباره تحت نورد با ۵۰ درصد کاهش ضخامت قرار گرفت و این فرآیند تا ۵ مرحله ادامه پیدا کرد. تمام فرآیندهای نورد بدون استفاده از روانکار با سرعت ۴۰ دور بر دقیقه و قطر غلطک ۱۸۰ میلی متر انجام شد.

پس از تولید کامپوزیت مورد نظر نمونه هایی از هر مرحله فرآیند ARB جهت انجام آزمایش ها تهیه گردید. روش جوش خوردن ورق ها، چگونگی توزیع ذرات MoSi_2 در زمینه مس و ریز ساختار با استفاده از میکروسکوپ الکترونی (SEM) مورد مطالعه قرار گرفت و در نهایت، برای مطالعه خواص مکانیکی بیشینه (استحکام کششی، مقدار افزایش طول و منحنی های تنش و کرنش) آزمون

آگلومره های ذرات پودر زیاد است که این باعث افت شدید شکل پذیری و کاهش داکتیلیته ماده می شود.

استحکام کششی کامپوزیت های Cu/MoSi_2 تولید شده به روش ARB

بمنظور بررسی استحکام کامپوزیت های مس تقویت شده با ذرات دی سیلیساید مولیبدن با درصدهای حجمی ۱ و ۱/۵ درصد طی مراحل گوناگون فرآیند از آزمون کشش تک محوری استفاده گردید. نتایج بدست آمده از منحنی تنش- کرنش در سیکل های گوناگون فرآیند ARB در شکل ۵ نشان داده شده است. بر اساس شکل ۶ استحکام کششی کامپوزیت Cu/MoSi_2 با افزایش سیکل های فرآیند ARB افزایش یافته است. همان گونه که در شکل ۶ مشاهده می شود، در پاس های ابتدایی فرآیند ARB که شامل نرخ های کار سختی بالاتر می باشد افزایش استحکام از کار سختی ماده سرچشمه می گیرد. همچنین، روشن است که کاهش اندازه دانه سبب افزایش استحکام نهایی ماده می شود. مطابق شکل ۶ مقایسه بین استحکام کششی کامپوزیت های Cu/MoSi_2 و مس خالص ARB شده مشاهده می شود حضور ذرات تقویت کننده MoSi_2 تاثیر بسزایی در افزایش استحکام داشته است. افزون بر این، بر اساس شکل ۷ بطور کلی می توان مشاهده کرد که حضور ذرات تقویت کننده MoSi_2 باعث افزایش تردی و در پی آن کاهش در نرخ کرنش می گردد. بر اساس شکل ۶ با افزایش تعداد سیکل های نورد، استحکام کششی برای هر دو نمونه کامپوزیت افزایش می یابد. بر اساس نتایج پژوهش های گزارش شده به وسیله سایتو^۲ افزایش استحکام در فرآیند نورد تجمعی شامل دو مکانیزم اصلی استحکام بخشی می باشد: الف) افزایش کرنش سختی ناشی از ناهمگایی ها و ب) بهبود و اصلاح اندازه دانه [۵]. بطور کلی با توجه به شکل ۷ می توان دریافت که افزایش طول کامپوزیت در طی مراحل ARB کم تر از مس خالص ARB شده می باشد که این می تواند به دلیل حضور ذرات MoSi_2 و نحوه پراکندگی آن در ماتریس مس باشد. همچنین، با افزایش تعداد سیکل های فرآیند ARB نقش ذرات تقویت کننده

تماس فلز- فلز و همچنین بدلیل تجمع و آگلومره شدن ذرات اثر منفی بر کیفیت و استحکام جوش دارد. همان گونه که در شکل نیز قابل مشاهده است با افزایش سیکل های نورد ضخامت لایه های شامل ذرات MoSi_2 کاهش یافته و در نتیجه، ذرات در زمینه مسی پخش شده اند. همچنین، همان گونه که از شکل برداشت می شود، با افزایش سیکل های ARB شاهد پخش شدن یکنواخت تر ذرات MoSi_2 در زمینه مس می باشیم.

روشن است که با پیشرفت فرآیند ARB تعداد لایه ها به گونه ای مداوم افزایش یافته که سبب افزایش همگنی توزیع در جهت عمود ورق می شود. مطلب دیگر که باید مد نظر داشت، بحث وجود یک تنش آستانه ای لازم جهت برقراری پیوند بین لایه های فلزی است. اگر مقدار تنش بکار رفته از مقدار تنش آستانه ای کم تر باشد، سطوح بکر فلز نمی توانند پیوندی قوی با هم برقرار کنند. این تنش آستانه ای با حضور ذرات افزایش می یابد که بر مبنای فرضیه سد انرژی^۱ است و پیشنهاد می کند که باید بر یک سد انرژی پیش از این که دو فلز با هم اتصال برقرار کنند، غلبه کرد. بالاتر از این مقدار استحکام پیوند ایجاد شده به سرعت افزایش می یابد و کم تر از این مقدار نیز آلودگی های موجود در سطح، تماس دو فلز بکر با هم را به تاخیر می اندازند و سبب کاهش استحکام پیوند ایجاد شده می شود [۹].

مسئله ای که وجود دارد این است که نخست، در حالت حضور ذرات، تنش آستانه ای بیش تری برای غلبه بر لایه اکسیدی سطح نیاز داریم تا مقابله فلزات بکر زیر سطحی را با هم داشته باشیم و دوم، اگر چه ذرات به شکسته شدن لایه اکسیدی در سطح کمک کرده اند، اما از طرفی نیز خود به عنوان مانعی در جهت تماس سطوح بکر فلزات با همدیگر و برقراری پیوند می باشد.

شایان ذکر است که بمنظور دستیابی به ویژگی های بهینه یک کامپوزیت، بویژه بهترین ترکیب استحکام بالا و شکل پذیری مناسب، تقویت کننده ای ریز و کسرحجمی بالایی از ذرات لازم است، اما بکارگیری این دو با هم با مشکلاتی همراه است زیرا در کامپوزیت ها با ذرات ریز، تمایل به توزیع نا یکنواخت ذرات و ایجاد خوشه ها و

² -Saito

¹ -energy barrier theory

کننده MoSi_2 به صورت یکنواختی در ماتریس مس پراکنده شده اند لذا، تاثیر حضور ذرات MoSi_2 آشکار شده و افزایش مقاومت الکتریکی را سبب می شود. همچنین، تغییرات کرنش اعمالی و در نتیجه دانسیته نابه جایی و مرز مشترک های موجود در ساختار و یا سطوح مشترک بین لایه ای بدلیل کوتاه کردن حرکت مسیر آزاد الکترون ها از دیگر عوامل تاثیرگذار بر مقاومت الکتریکی می باشند [۱۲]. بنابراین، می توان نتیجه گرفت که در مجموع، افزایش درصد حجمی حضور ذرات تقویت کننده MoSi_2 و افزایش سیکل های فرایند ARB به دلیل افزایش دانسیته عوامل منحرف کننده الکترون باعث افزایش مقاومت الکتریکی می شود.

نتیجه گیری

در این پژوهش از فرایند نورد تجمعی به گونه موفقیت آمیز در تولید کامپوزیت Cu/MoSi_2 استفاده گردید. تا سیکل پنجم نورد اتصالی تجمعی نمونه ها دارای شکل پذیری مناسب و قطعاتی بدون عیب ماکروسکوپی بدست آمد. همچنین، نتایج نشان دادند که:

۱- با افزایش سیکل های فرایند ARB، یکنواختی توزیع ذرات و همچنین، کیفیت اتصال میان ذرات MoSi_2 در ماتریس مس بهبود یافته است. کامپوزیت تولید شده در مرحله پنجم نشانگر توزیع یکنواخت و پیوند قوی میان ذرات تقویت کننده MoSi_2 و ماتریس مس می باشد.

۲- استحکام کششی کامپوزیت با افزایش سیکل های فرایند ARB افزایش یافته است. همچنین، شاهد کاهش کرنش و داکتلیته و افزایش تردی در طی مراحل ARB می باشیم.

۳- با افزایش سیکل های فرایند ARB، شاهد افزایش چشمگیری در سختی کامپوزیت Cu/MoSi_2 هستیم به گونه ای که میکرو سختی برای هر دو نمونه به ترتیب از مقادیر اولیه ۶۱ به ۱۵۸ و ۱۶۶ مگا پاسکال در پاس پنجم رسیده است.

۴- می توان نتیجه گرفت که در مجموع، افزایش درصد حجمی حضور ذرات تقویت کننده MoSi_2 و افزایش سیکل های فرایند ARB بدلیل افزایش دانسیته عوامل

MoSi_2 بدلیل پراکندگی یکنواخت افزایش می یابد که این تغییرات در مجموع سبب کاهش داکتلیته در کامپوزیت یاد شده می گردد.

میکروسختی

برای اندازه گیری سختی نمونه ها از دستگاه سختی سنج ویکرز با بار ۲۵ گرم و زمان توقف ۱۰ ثانیه استفاده گردید. صفحه RD-ND نمونه ها در سیکل های گوناگون فرایند ARB مورد سختی سنجی قرار گرفت. همان گونه که در شکل ۸ مشاهده می شود و همچنان که انتظار می رود با افزایش پاس های فرایند سختی نمونه ها افزایش می یابد و نرخ افزایش سختی در پاس های اولیه بیش تر از پاس های بعدی است زیرا عمده تجمع نابه جایی ها و کار سختی در پاس های اولیه رخ می دهد [۵]. شکل ۸ افزایش میکروسختی با افزایش تعداد پاس های فرایند را نشان می دهد. میکرو سختی برای هر دو نمونه به ترتیب از مقادیر اولیه ۶۱ به ۱۵۸ و ۱۶۶ مگا پاسکال برای کامپوزیت Cu/MoSi_2 با درصد های گوناگون حجمی افزایش می یابد. مشاهده می شود که پس از نورد اتصالی اولیه مس و ذرات تقویت کننده، افزایش قابل ملاحظه ای در سختی کامپوزیت ها رخ می دهد. افزایش سریع سختی با کاهش کرنش ها می تواند به سخت شدن کرنشی مربوط باشد [۹]. رفتار سخت شدن نشانگر اشباعی از کرنش های بزرگ در مواد فوق العاده ریزدانه که با روش های تغییر شکل شدید پلاستیک ایجاد شده اند می باشد [۱۰، ۱۱].

مقایسه ای بین مقاومت الکتریکی کامپوزیت Cu/MoSi_2 و مس خالص ARB شده

تغییرات مقاومت الکتریکی اندازه گیری شده در مراحل گوناگون ARB در دو گروه کامپوزیت Cu/MoSi_2 و مس خالص ARB شده در شکل ۹ مشاهده می شود. بر اساس شکل در مراحل اولیه مقاومت الکتریکی هر دو گروه به مس خالص نزدیک است. لایه بیرونی همه نمونه ها فلز مس می باشد که ضخامت آن در مراحل ابتدایی زیادتر است. بنابراین، بیش تر الکترون ها از فلز مس سطح عبور کرده و تاثیر سایر لایه ها ناچیز می باشد، ولی با ادامه فرایند ARB لایه های مس نازک تر شده و ذرات تقویت

ذرات درماتریس باشد. همچنین، با استفاده از این روش می توان خواص مکانیکی و فیزیکی کامپوزیت‌های مورد نظر را بهبود بخشید.

منحرف کننده الکترون باعث افزایش مقاومت الکتریکی می شود.

بررسی این نتایج می تواند ثابت کند که فرایند نورد اتصالی تجمعی می تواند فرایندی بسیار مفید و تاثیرگذار در تولید مواد ریز دانه با استحکام بالا و توزیع و یکنواختی

References

- 1- علی یزدانی، "تولید کامپوزیت های نانوساختار آلومینیوم-کربید بور به روش اتصال تجمعی نورد"، نشریه مواد نوین ، دوره اول، شماره ۳، ص ۲۳-۳۲، بهار ۱۳۹۰.
- 2- S. C. Tjong, and H. Chen, "Nanocrystalline Materials and Coatings", Materials Science and Engineering, Vol. 45, pp. 1-88, 2004.
- 3- B.A. Movchan, and FD. Lemkey, "Mechanical Properties of Fine-Crystalline Two-Phase materials", Mater Sci Eng A; 224:136-45, 1997.
- 4- Y. S. Kim, S. H. Kang, and D. H. Shin, "Effect of Rolling Direction on the Microstructure and Mechanical Properties of Accumulative Roll Bonding (ARB) Processed Commercially Pure 1050 Aluminum Alloy", Materials Science Forum, Vols. 503-504, pp. 681-686, 2006.
- 5- N. Tsuji, Y. Ito, Y. Saito, and Y. Minamino, "Strength and Ductility of Ultra-Fine Grained Aluminum and Iron Produced by ARB and Annealing", Scripta Mater ; 47:893-9, 2002.
- 6- K. M. Shorowordi, A. S. M. A. Haseeb, and J. P. Celis, "Tribo-surface Characteristics of Al-B₄C and Al-SiC Composites Worn under Different Contact Pressures", Wear, Vol. 261, pp. 634-641, 2006.
- 7- J. Mc. Keown, A. Misra, H. Kung, RG. Hoagland, and M. Nastasi. "Microstructures and Strength of Nano Scale Cu-Ag multilayers", Scripta Mater; 46:593-8, 2002.
- 8- H. Sekine and R. Chen. "A Combined Microstructure Strengthening Analysis of SiCp/Al Metal Matrix Composites", Composites, Vol. 26, pp. 183-8, 1995.
- 9- M. Alizadeh, "Comparison of Nanostructured Al/B₄C Composite Produced by ARB and Al/B₄C Composite produced by RRB Process", Materials Science and Engineering A 528, 578-582, 2010.
- 10- Y. Estrin, RJ. Helming, SC. Baik, HS. Kim, and HG. Brokmeier, "Microstructure and Texture Development in Copper and aluminum Under ECAP", Ultrafine Grained Materials III. Warrendale, PA: TMS; 2004.
- 11- Huang X, Kamikawa N, and Hansen N. Strengthening Mechanisms in Nanostructured Aluminum. Mater Sci Eng A; 483:102-4, 2008.
- 12- L. Ghalandari and M. M. Moshksar, "High Strength and High Conductive Cu/Ag Multilayer Produced by ARB", Journal of Alloys and Compounds, Vol. 506, pp. 172-178, 2010.

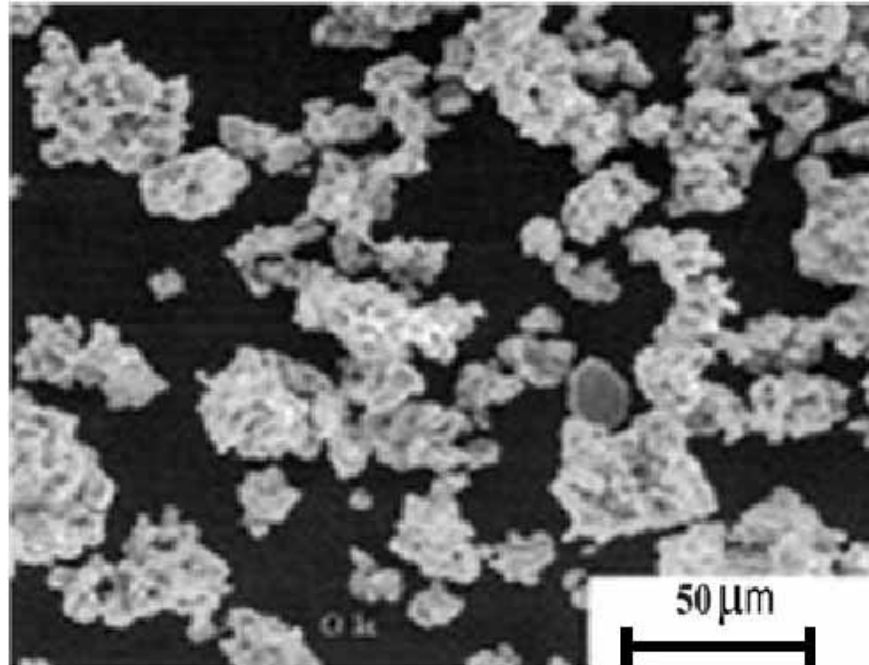
پیوست‌ها

جدول ۱- مشخصات ورق های اولیه مورد استفاده.

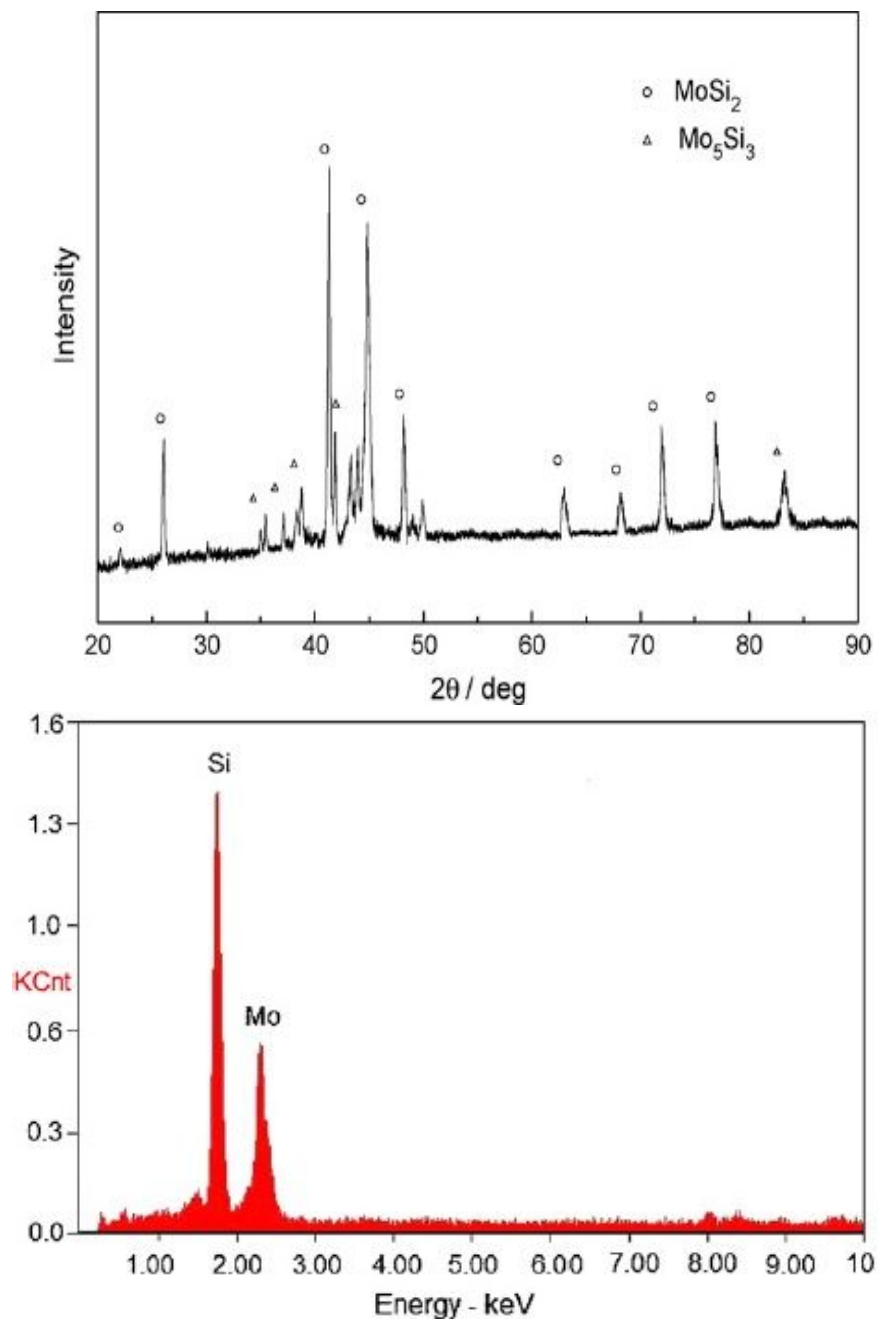
جنس ورق	ترکیب شیمیایی (درصد حجمی)	ابعاد ورق
مس خالص تجاری	۹۸,۴Cu, ۰,۶۸Zn, ۰,۱۸Fe, ۰,۵۲Pb, ۰,۴۸Co, ۰,۰۱۹Sn, ۰,۰۱۲Cd, ۰,۰۰۹Cr	۱۲۰×۵۰×۱ mm

جدول ۲- خواص مکانیکی فلز مس بکار رفته در پژوهش.

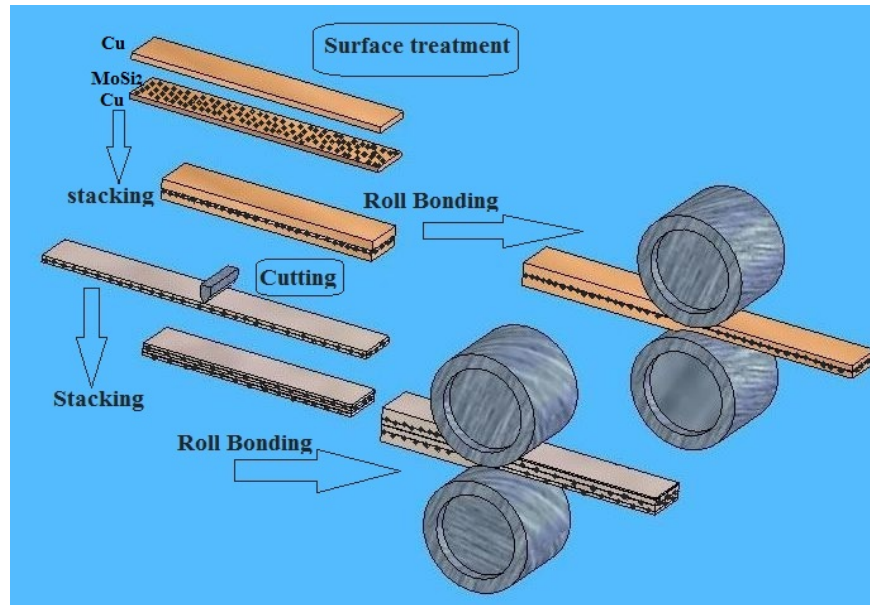
فلز	افزایش طول (%)	سختی (HV)	استحکام تسلیم (Mpa)
مس	۳۲/۸	۶۲	۸۷/۵



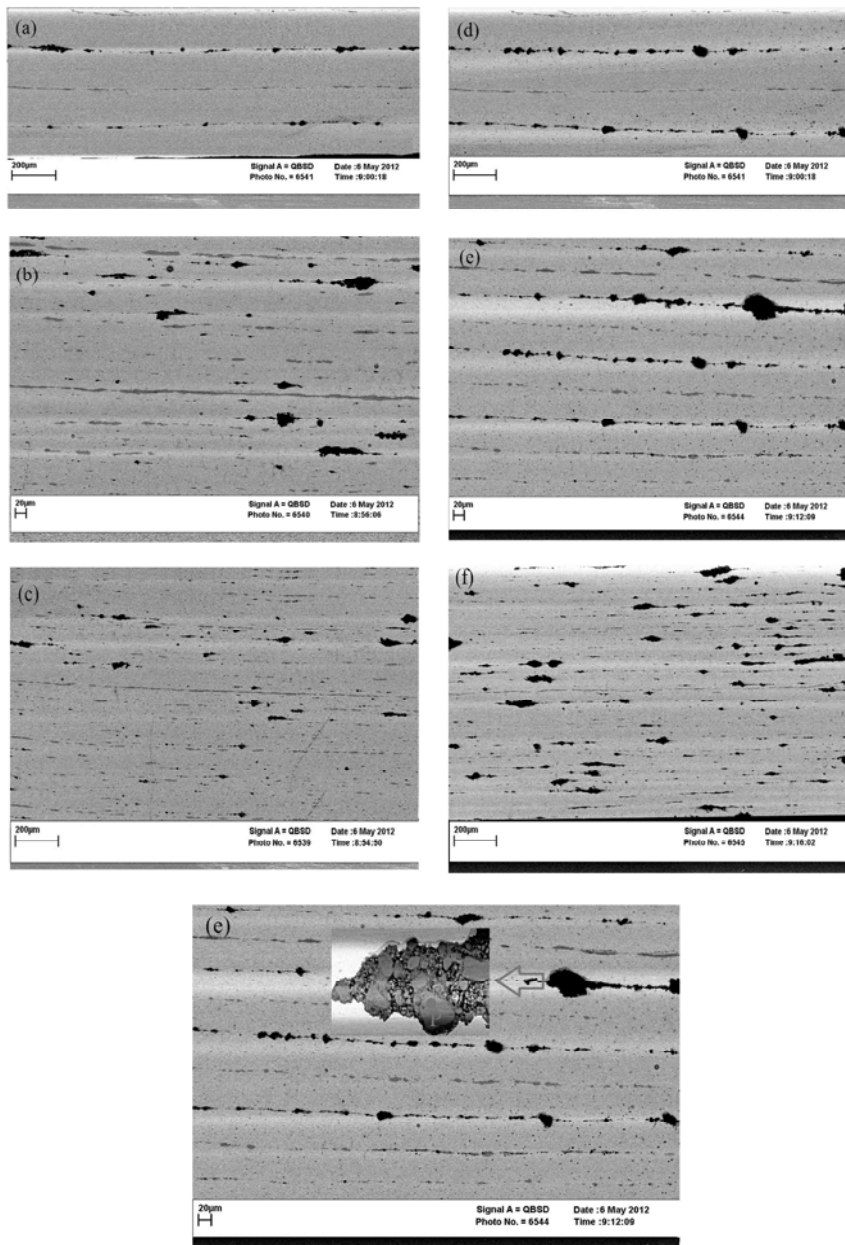
شکل ۱- تصویر میکروسکوپ TEM از نانو ذرات MoSi_2 .



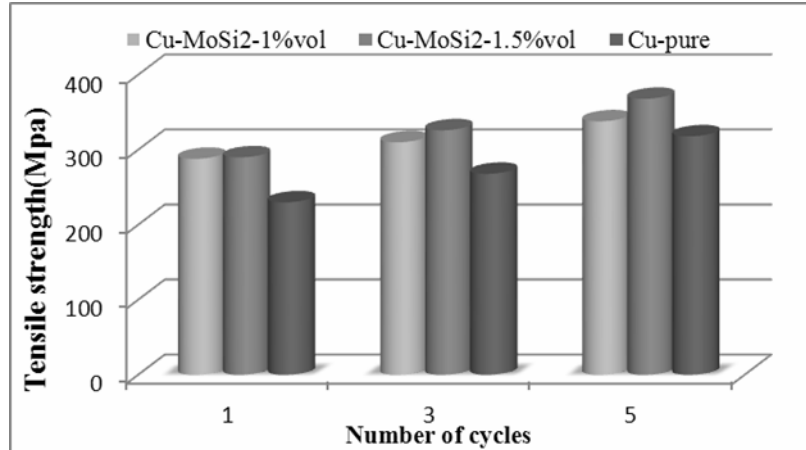
شکل ۲- تصاویر XRD از پودر MoSi_2 .



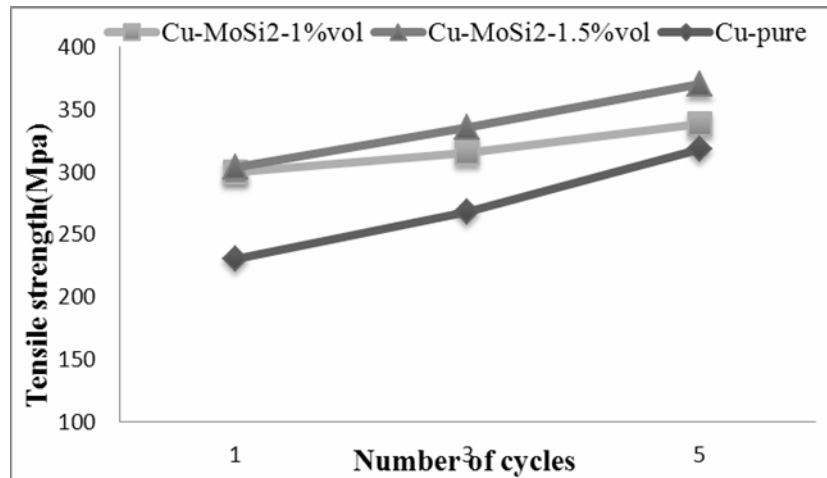
شکل ۳- شماتیکی از مراحل گوناگون فرایند اتصال نورد تجمعی.



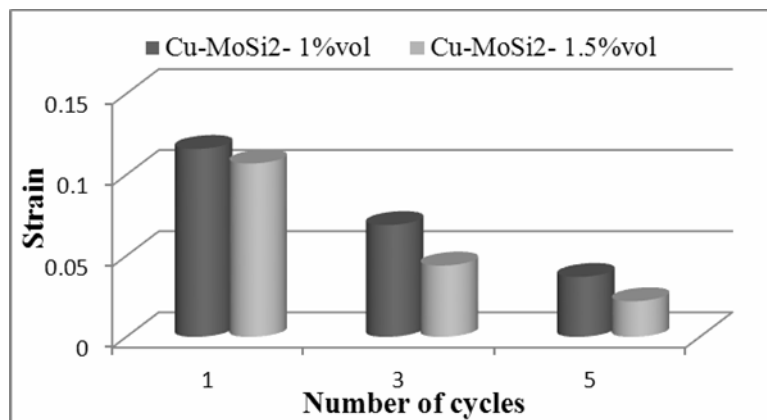
شکل ۴- تصاویر میکروسکوپ SEM مراحل (a) پاس نخست، (b) پاس سوم، (c) پاس پنجم با ۱٪ حجمی پودر MoSi_2 - (d) پاس نخست، (e) پاس سوم، (f) پاس پنجم با ۱٫۵٪ حجمی پودر MoSi_2 - (e) بزرگنمایی ذرات MoSi_2 در کامپوزیت.



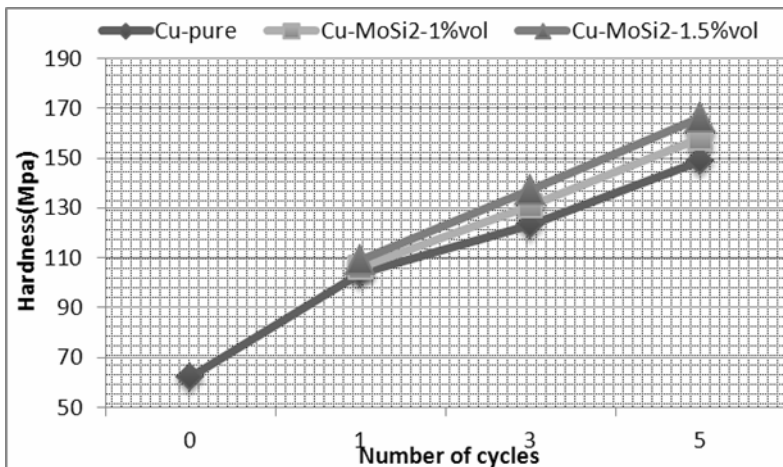
شکل ۵- نتایج بدست آمده از منحنی تنش- کرنش در سیکل‌های گوناگون فرآیند ARB



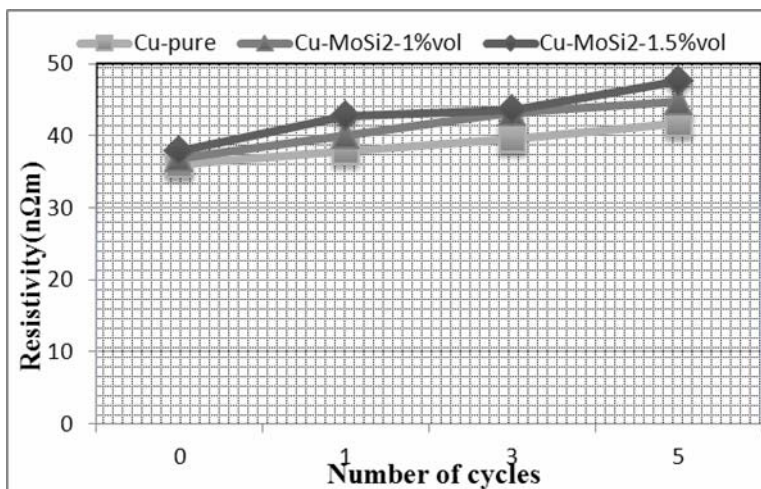
شکل ۶- مقایسه بین استحکام کششی کامپوزیت های Cu/MoSi_2 و مس خالص ARB شده



شکل ۷- مقایسه کرنش و افزایش طول کامپوزیت Cu/MoSi_2 با درصدهای حجمی ۱٪ و ۱.۵٪



شکل ۸- مقایسه میکروسختی کامپوزیت های Cu/MoSi_2 و مس خالص ARB شده



شکل ۹- تغییرات مقاومت الکتریکی در طی فرایند ARB