

بررسی رفتار ساختاری، مکانیکی و الکتریکی کامپوزیت لایه ای مس تولید شده به روش اتصال نورد تجمعی (ARB)

امیرحسین اسلامی*^۱، سید مجتبی زبرجد^۲، محمد محسن مشکسار^۳

۱- مربی، دانشگاه علمی و کاربردی جهاد دانشگاهی مشهد، مشهد، ایران

۲- استاد، دانشکده مهندسی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

۳- استاد، دانشکده مهندسی، واحد مرودشت، دانشگاه آزاد اسلامی، مرودشت، شیراز، ایران

*Amir.hossein.E@hotmail.com

(تاریخ دریافت: ۹۲/۰۷/۱۰، تاریخ پذیرش: ۹۲/۱۰/۰۴)

چکیده

فرآیند نورد تجمعی ARB به عنوان یکی از پر کاربردترین روش های اعمال تغییر شکل شدید پلاستیک و دستیابی به ساختارهای با اندازه دانه نانومتری در ورق ها در بعد صنعتی مطرح می باشد. در پژوهش حاضر به منظور بهبود و افزایش رسانایی و استحکام، کامپوزیت لایه ای مس با استفاده از روش نورد اتصالی تجمعی تولید گردید. تعداد هفت مرحله نورد تحت شرایط بدون روانکار بر نمونه ها اعمال گردید. پس از تهیه کامپوزیت به منظور بررسی خواص آنها، آنالیزهای مکانیکی، ساختاری و الکتریکی در مراحل مختلف فرایند انجام شد. با انجام آزمایش های مکانیکی: سختی، تنش تسلیم، استحکام و چکش خواری بررسی گردید. این آزمایشها نشان دادند که سختی، تنش تسلیم و استحکام با افزایش مراحل ARB بطور چشمگیری افزایش می یابد. همچنین به منظور بررسی تغییرات ساختار لایه ای، از میکروسکوپ نوری استفاده شد. در نهایت از روش پراب چهار نقطه برای اندازه گیری مقاومت الکتریکی مس خالص ARB شده در مراحل مختلف استفاده گردید.

واژه های کلیدی:

اتصال نورد تجمعی، کامپوزیت لایه ای، خواص مکانیکی، مقاومت الکتریکی.

۱- مقدمه

اعمال کرنش های بسیار بزرگ با استفاده از فرآیند های تغییر شکل پلاستیکی شدید، ریزساختارهایی با دانه های بسیار ریز در مواد ایجاد می کنند. فرآیند های ویژه ای مانند اکستروژن در کانال های هم مقطع زاویه دار (ECAP^۱)، اکستروژن و فشار سیکلی (CEC^۲)، پیچش تحت فشار های بالا (HPT^۳) و اتصال نورد تجمعی (ARB^۴) نمونه هایی از فرآیند های تغییر شکل پلاستیکی شدید شناخته شده می باشند [۱-۲]. ویژگی مشترک

پیشرفت های دهه های اخیر سبب شده است که در صنایع مختلف نیاز به وجود و ساخت مواد جدید با خواص فیزیکی و مکانیکی مناسب احساس شود. اصولاً به اثبات رسیده است که فلزات و مواد فوق ریزدانه با اندازه کمتر از ۱ میکرون خواص فیزیکی و مکانیکی مناسبی را نسبت به مواد با اندازه دانه معمولی ایجاد می کند. از روش های جدید تولید مواد با اندازه دانه نانو متری، روش تغییر فرم پلاستیک شدید است. امروزه با

جدول (۱): مشخصات ورق های اولیه مورد استفاده

ابعاد ورق	ترکیب شیمیایی (درصد وزنی)	جنس ورق
۱۲۰×۵۰×۱ mm	۹۸/۴Cu, ۰/۶۸Zn, ۰/۱۸Fe, ۰/۲۲Pb, ۰/۴۸Co, ۰/۰۱۹Sn, ۰/۰۱۲Cd, ۰/۰۰۹Cr	مس خالص تجاری

جدول (۲): خواص مکانیکی فلز مس بکار رفته در تحقیق

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

۲-۲- تولید کامپوزیت لایه ای مس

آزمایشات بر روی ورق مس خالص تجاری صورت گرفته شد. 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 بیشتر از سمباده سیمی دوار که قابلیت بسته شدن بر روی دستگاه دریل را دارد با اندازه قطر سیم ۰/۴ میلیمتر استفاده شد. استفاده از سمباده سیمی بالاترین زبری سطح را ایجاد کرده و سبب ایجاد قویترین اتصال لایه ای بین ورق ها می شود. بدین ترتیب دو سطح برشکاری شده روی هم قرار گرفتند و توسط سیم های مسی چهار گوشه آن مقید شد ضخامت ساندویچ اولیه ۲ میلی متر بود که پس از پاس صفرم به ۱ میلی متر کاهش ضخامت داد (۵۰٪ کاهش ضخامت). دستگاه نورد مورد استفاده دارای غلطک هایی به قطر ۱۸۰ میلیمتر و با سرعت نورد ۴۰ دور بر دقیقه تنظیم شد. نمونه پس از پاس صفرم از وسط نصف و پس از آماده سازی مجدد و مهار چهار گوشه آن و اعمال پیش گرمایش ۳۰۰°C به مدت ۵ دقیقه مجدداً تحت نورد با ۵۰٪ کاهش ضخامت قرار گرفت. این فرآیند تا هفت سیکل بدون روانکار انجام پذیرفت. پس از هر مرحله نورد نمونه هایی جهت انجام آزمایشات تهیه گردید.

همه این فرآیندها ثابت ماندن ابعاد قطعه کار حین فرآیند شکل دهی می باشد. فرآیند نورد تجمعی به عنوان یک روش اعمال تغییر شکل شدید پلاستیک و دستیابی به ساختاری با اندازه دانه نانومتری توسط سایتو و همکارانش در سال ۱۹۹۸ میلادی معرفی شد [۳].

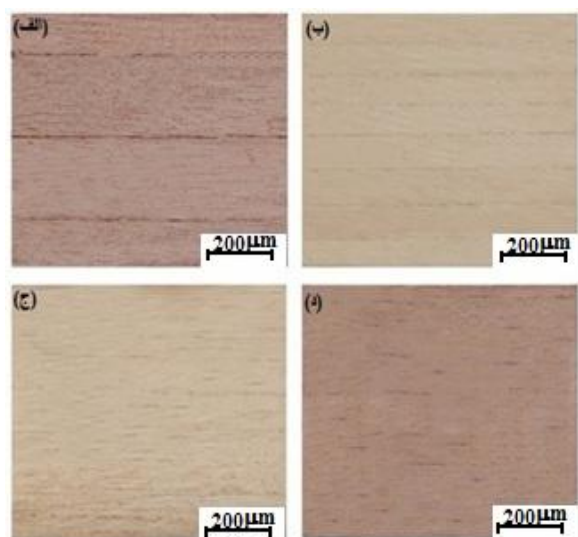
در این فرایند تغییر شکل پلاستیک زیادی از طریق چند مرحله نورد متوالی انجام می گیرد. مزیت این روش توانایی در تولید ورق با ساختار نانو در مقیاس صنعتی می باشد به همین دلیل از این روش اخیراً در تولید کامپوزیت های چند لایه استفاده شده است [۴]. در سالهای اخیر کامپوزیت های فلزی چند لایه به علت خواص مکانیکی، الکتریکی و مغناطیسی برجسته مورد توجه زیادی واقع شده اند [۵]. همچنین با توسعه روزافزون صنایع الکترونیک و کاربرد فراوان مس در صنعت نیاز به آلیاژهای مس که استحکام و قدرت هدایت الکتریسیته بالا داشته باشند به شدت افزایش یافته است. به همین منظور در صنعت استفاده از مس خالص با ساختار دانه هایی با مقیاس نانو که با تغییر شکل مومسان شدید تولید می شوند توسعه زیادی یافته است [۳-۶]. در این تحقیق به منظور تکامل ساختار، ایجاد ساختار ریز دانه، افزایش استحکام و سختی، مس خالص تجاری تحت فرآیند ARB قرار گرفت و در هر مرحله ریز ساختار، خواص مکانیکی و نهایتاً مقاومت الکتریکی آن مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت.

۲- مواد و روش تحقیق

۲-۱- مواد اولیه

مواد مورد استفاده در این پژوهش ورق های مس خالص تجاری می باشد که ترکیب و ابعاد آن در جدول ۱ و ویژگی های آن در جدول ۲ مشخص شده است.

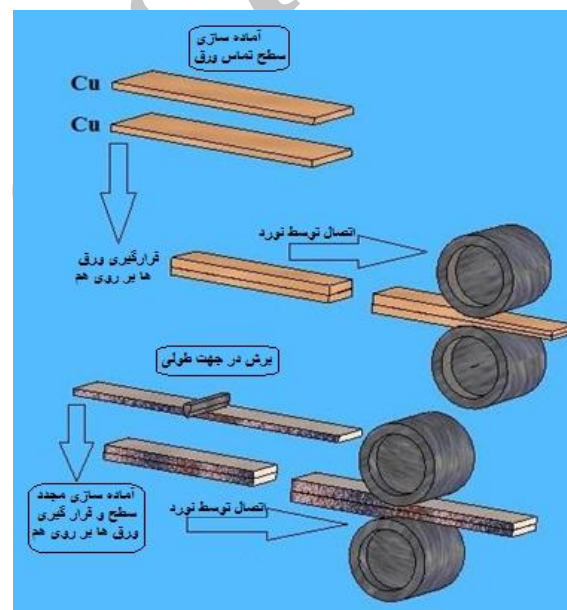
نمونه‌ها در سیکل هشتم معیوب شدند به همین دلیل نمونه‌های تولید شده تا سیکل هفتم مورد توجه قرار گرفتند. افزایش چگالی نابه‌جایی و کاهش اندازه دانه سبب افزایش کرنش ماده و در نتیجه تردی می‌شود این امر سبب پارگی ورق‌ها پس از سیکل هفتم ARB شد. همانطور که در تصاویر قابل رؤیت است اتصال لایه‌های مس با ۵۰٪ کاهش ضخامت به خوبی صورت می‌گیرد. در مراحل بالای ARB لایه‌ها به صورت یکپارچه و منسجم درآمده و به جز مراحل اولیه فرآیند ARB، تشخیص و رؤیت لایه‌ها دشوار می‌باشد. این بدان معناست که با پیشرفت فرآیند ARB، تعداد لایه‌ها بگونه‌ای مداوم افزایش می‌یابد.



شکل (۲): تصاویر میکروسکوپ نوری بترتیب (الف): پاس اول، (ب): پاس سوم، (ج): پاس پنجم، (د): پاس هفتم بزرگنمایی 200X.

با افزایش تعداد سیکل‌های فرآیند ARB از آنجایی که اندازه تغییر شکل اعمالی به ماده افزایش می‌یابد. در نتیجه جهت کاهش انرژی سیستم مرزهای کم زاویه و سپس با زاویه بزرگ در ساختار حاصل و ماده ریز دانه‌تر می‌شود [۵]. در نتیجه می‌توان ریز شدن ساختار را به تبدیل مرزهای کم زاویه فرعی ناشی از آرایش نابه‌جایی‌ها به مرزهای تصادفی با زاویه بالا نسبت داد.

سطح مقطع کناری ورق‌های جوش خورده پس از سنباده زنی و پولیش با پارچه و خمیر الماسه، با میکروسکوپ نوری بررسی گردید تا نحوه جوش خوردن ورق‌ها مشاهده شود. همچنین به منظور مطالعه خواص مکانیکی (حداکثر استحکام کششی، مقدار افزایش طول و منحنی‌های تنش و کرنش) آزمون استحکام کششی با استفاده از دستگاه Zwick 250 (بر اساس استاندارد ASTM-E8M) صورت گرفت. همچنین مقاومت الکتریکی نمونه‌های تولید شده با روش پراب چهار نقطه اندازه‌گیری شد. روند انجام فرآیند ARB برای کامپوزیت مس در شکل ۱ نشان داده شده است.



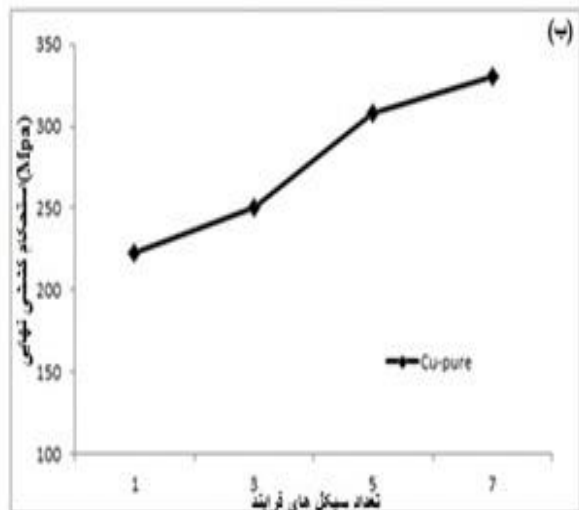
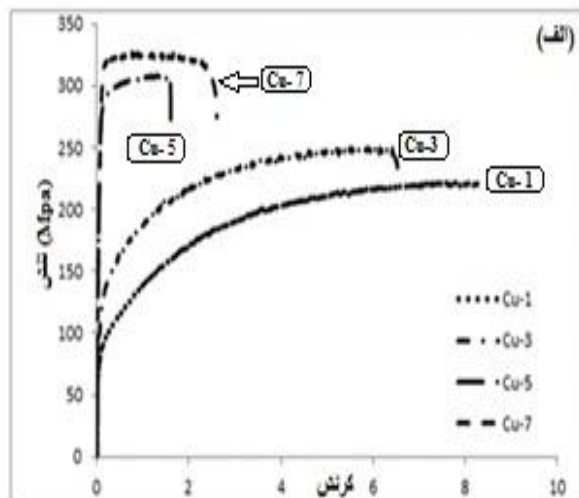
شکل (۱): شماتیکی از مراحل مختلف فرآیند اتصال نورد تجمعی.

۳- نتایج و بحث

۳-۱ بررسی تحولات ریز ساختاری کامپوزیت مس حین فرآیند ARB

تحولات ریز ساختاری مس خالص ARB شده توسط میکروسکوپ نوری مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۲ صفحات جانبی مس خالص تجاری پس از هفت سیکل فرآیند نورد تجمعی را نشان می‌دهد. مطابق شکل ورق‌ها تا سیکل هفتم بدون عیب و پارگی فرآیند ARB را پشت سر گذاشتند ولی

σ_p بر اساس فرضیه سخت شدن ناهنجاری به صورت ($\sigma_p \propto \rho^{1/2}$) محاسبه می‌شود و σ_b نیز بر اساس فرضیه استحکام هال-پیچ $\sigma_b \propto d^{1/2}$ محاسبه شده که d فاصله میان مرزهای غیرقابل نفوذ می‌باشد [۱۰-۱۲]. تا سیکل سوم کرنش سختی یا سخت شدن، ناهنجاری‌ها نقش اصلی را در افزایش استحکام بازی می‌کند و تشکیل دانه‌های زیرمیکرونی یا سلول‌های ناهنجاری سبب افزایش استحکام می‌شود [۱۱]. از سیکل چهارم افزایش استحکام با توجه به ساختار دانه و شکل‌گیری دانه‌های فوق-عاده ریز می‌باشد و تأثیر کرنش سختی کمتر می‌گردد. عوامل مختلفی در افزایش استحکام کامپوزیت‌ها تولید شده به روش ARB تأثیرگذار می‌باشند.



شکل (۳): منحنی تنش-کرنش مس در سیکل‌های مختلف فرایند ARB:

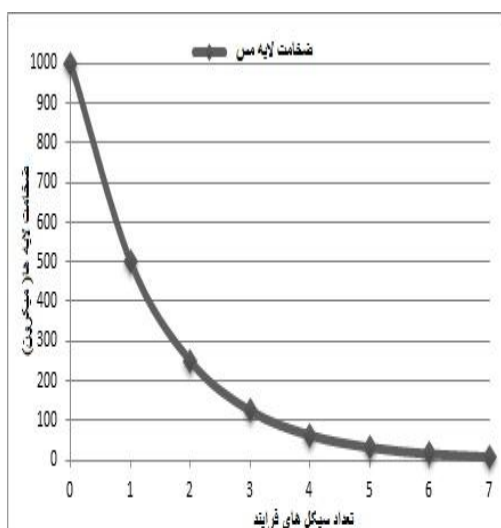
(الف): منحنی تنش-کرنش، (ب): منحنی استحکام کششی نهایی.

تسوجی و همکارانش، مکانیزم تشکیل این دانه‌های بسیار ظریف را در مورد تجمعی به این صورت پیشنهاد دادند: ساختار مورد تجمعی یافته، ساختاری شدیداً فشرده است و ناهمسانی‌های موضعی زیادی دارد که شامل نابجایی‌های وابسته به موقعیت (GNBs) می‌باشند. در این مکانهای ناهمسانی، کرنش بحرانی مرزهای فرعی کم زاویه را به مرز دانه‌های پر زاویه تبدیل می‌کند و ساختار بسیار ظریف به وجود می‌آورد. تغییرات پیوسته در ناهمسانی زاویه‌های با منظم شدن مجدد نابجایی‌های وابسته به موقعیت (GNBs) در اثر نفوذ کوتاه دامنه، به مرز صفحه‌ای تبدیل می‌گردد [۶-۹].

این نفوذ کوتاه دامنه حتی در دمای محیط نیز می‌تواند صورت گیرد که علت آنرا می‌توان بالا رفتن دمای موضعی نمونه در اثر کرنش شدید پلاستیک دانست. مرز دانه‌های پر زاویه که در اثر تغییر شکل به وجود آمده‌اند، باعث تقسیم و ریز شدن دانه‌های محتوی نابجایی‌های وابسته به موقعیت می‌شوند تا وقتی که بازیابی رخ دهد و مرز دانه‌های پایدار تشکیل گردد [۸].

۲-۳- بررسی خواص مکانیکی مس ARB شده

خواص مکانیکی مس خالص تجاری تحت فرآیند ARB در مراحل مختلف فرآیند مورد بررسی قرار گرفت. جهت بررسی خواص مکانیکی آزمون‌های کشش تک محوری و ریزسختی سنجی بر روی نمونه‌ها صورت گرفت. منحنی تنش-کرنش در سیکل‌های مختلف در شکل ۳ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود استحکام کششی در دو سیکل اولیه فرایند ARB افزایش چشمگیری داشته است و سپس با افزایش کرنش مقدار آن تدریجاً افزایش یافته است. این روند افزایشی تا پاس هفتم فرآیند ARB ادامه یافته و پس از هفت سیکل فرایند ARB حدود ۱.۵ برابر بزرگتر از استحکام اولیه ورق مس می‌باشد (۲۳۱ MPa). افزایش استحکام مس خالص تحت فرآیند ARB قرار گرفته به سبب کرنش سختی یا تقویت ناهنجاری‌ها (σ_p) و بهبود اندازه دانه و استحکام مرزها (σ_b) می‌باشد [۹].

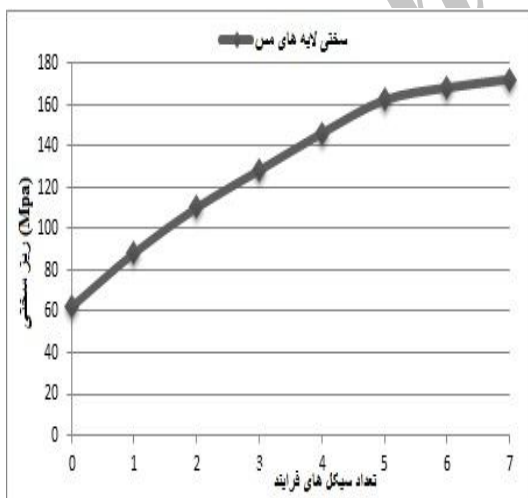


شکل (۴): منحنی تغییرات ضخامت لایه های مس در طی فرایند ARB

۳-۳- نتایج ریزسختی سنجی مس تحت فرایند ARB

برای اندازه گیری سختی نمونه‌ها، صفحه جانبی نمونه‌ها در سیکل‌های مختلف فرایند ARB تحت ریزسختی‌سنجی قرار گرفت (شکل ۵).

افزایش سریع سختی حدود ۱.۵ برابر نسبت به مس خالص پس از پاس سوم ایجاد گردیده است. افزایش سریع سختی با کاهش کرنش‌ها می‌تواند به سخت شدن کرنشی مربوط باشد [۱۴].



شکل (۵): نتایج ریزسختی سنجی مربوط به لایه های مس طی سیکل های

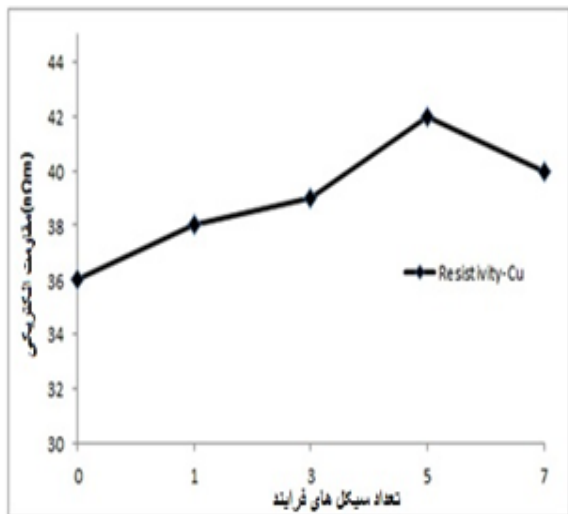
مختلف فرایند ARB

بطور کلی عوامل استحکام بخشی در کامپوزیت های تولید شده با فرایند ARB را می‌توان بصورت عوامل تاثیر گذار زیر بیان نمود. در گام اول می‌توان به کرنش سختی بدلیل افزایش دانسیته نابجایی حاصل از تغییر شکل اشاره نمود که سبب افزایش استحکام می‌گردد. این عامل در مراحل اولیه فرایند ARB نقش مهمی را ایفا می‌کند، که با افزایش مراحل ARB و ایجاد ساختار ریز دانه و بهبود اندازه دانه تاثیر آن تدریجاً کاهش می‌یابد. در ادامه فرایند ARB ریز دانه شدن در مراحل نهایی فرایند بسیار تاثیر گذار می‌باشد.

در ساختار فوق ریز، ایجاد مرزهای جدید با توجه به رابطه هال پیچ که قبلاً ذکر شد موجب استحکام بخشی می‌شود. همچنین اثر کرنش برشی ایجاد شده در طی فرایند ARB ناشی از اصطکاک بین غلطک و نمونه و اصطکاک بین خود لایه‌ها سبب افزایش کرنش معادل و افزایش استحکام می‌شود. از دیگر عوامل می‌توان تنش‌های باقیمانده از طریق تاثیر بر حرکت نابجایی‌ها و تعداد لایه‌ها و ضخامت آنها را ذکر نموده همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود در مراحل اول فرایند تغییر لایه‌ها و در مراحل نهایی تغییر تعداد لایه‌ها زیاد است که در افزایش استحکام تاثیر گذار می‌باشند.

با افزایش مراحل ARB ضخامت لایه‌ها کاهش و تعداد آنها بصورت توانی (2^n) افزایش می‌یابد. بطوریکه در سیکل هفتم شامل ۲۵۵ لایه می‌باشد. اندازه لایه‌ها با تقسیم نمودن ضخامت ورق پس از فرایند نورد در هر پاس به تعداد لایه‌های موجود بدست آمده است.

علاوه بر این مطابق شکل ۳ کاهش کرنش در سیکل‌های بالاتر مشهود می‌باشد. کاهش کرنش به علت تاثیر کرنش سختی می‌باشد که در طی فرایند ARB تاثیر کرنش سختی به تدریج کاهش می‌یابد.



شکل (۶): منحنی تغییرات مقاومت الکتریکی مس در طی فرایند ARB

بنابر این می توان نتیجه گرفت که در مجموع، افزایش سیکلهای فرایند ARB بدلیل افزایش دانسیته عوامل منحرف کننده الکترون باعث افزایش مقاومت الکتریکی می شود. البته بنظر می رسد روش پراب چهار نقطه ای برای آشکار سازی این تاثیرات کافی نمی باشد. همچنین بخشی از نوسانات مشاهده شده در داده ها می تواند بدلیل جدایش موضعی لایه ها یا خطای جزئی اندازه گیری باشد.

۴- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر فرایند نوردتجمعی تا هفت مرحله بطور موفقیت آمیز بر روی مس خالص انجام گرفت. تا سیکل هفتم اتصال تجمعی نورد نمونه ها دارای شکل پذیری مناسب و قطعاتی بدون عیب ماکروسکوپی بدست آمد. همچنین نتایج نشان دادند که:

- ۱- با بکارگیری کاهش سطح مقطع نوردی ۵۰٪ در هر مرحله از فرآیند، جوش سرد مناسبی بین لایه ها ایجاد می شود. لذا با افزایش تعداد مراحل نورد، لایه ها و شدت بافت کلی افزایش دارد و یک بافت قوی در مراحل پایانی نورد شکل گرفته است.
- ۲- همچنین انجام فرآیند ARB بر روی مس خالص تجاری، علاوه بر بهبود ساختار، سبب افزایش چشمگیری در استحکام،

در سیکل های بالای فرایند ARB سختی به دلیل آن است که مواد به یک دانسیته پایداری از نابجایی ها رسیده اند. دانسیته پایداری از نابجایی ها بوسیله تعادل دینامیکی در طی تولید نابجایی ها در فرایند تغییر شکل پلاستیک شدید و آنیل در فرایند اصلاح دینامیکی رخ می دهد. همچنین مقادیر بالای سختی در سطح به وسیله کار سختی ناشی از کرنش برشی مازاد فرایند ARB اتفاق می افتد، می باشد [۱۱-۱۴]. واقعیت دیگر که تاثیر بسزایی در سختی دارد افزایش نمایی تعداد لایه ها با افزایش تعداد سیکل های فرایند ARB می باشد طبق فرمول (2n-1) نمونه مس ARB شده در سیکل هفتم شامل ۲۵۵ لایه می باشد.

۳-۴- مقاومت الکتریکی کامپوزیت مس خالص ARB شده

از آنجا که هدایت الکتریکی نسبت معکوس با مقاومت الکتریکی دارد و در آزمایشگاه امکان اندازه گیری مقاومت الکتریکی فراهم است، لذا تغییرات مقاومت الکتریکی مس خالص ARB شده در مراحل مختلف با روش پراب چهار نقطه اندازه گیری شد. همانطور که در شکل ۶ مشاهده می شود در طی مراحل ARB دانسیته نابجایی و سطوح مشترک افزایش پیدا می کند در نتیجه با افزایش سیکل های فرایند ARB مقاومت الکتریکی افزایش خواهد یافت.

همانطور که در شکل ۶ مشاهده می شود روند افزایش مقاومت الکتریکی در سیکل های نهایی بدلیل ایجاد ساختار ریز دانه و افزایش مرز دانه ها چشمگیرتر می باشد. بطور کلی می توان تغییرات کرنش اعمالی و در نتیجه دانسیته نابجایی و مرز مشترک های موجود در ساختار و یا سطوح مشترک بین لایه ای بدلیل کوتاه کردن حرکت مسیر آزاد الکترونها را از دیگر عوامل تاثیرگذار بر مقاومت الکتریکی دانست [۱۴].

mechanical properties of accumulative roll bonding (ARB) processed commercially pure 1050 aluminum alloy”, Materials Science Forum, Vol. 503, pp. 681-686, 2006.

[7] B.A. Movchan, FD. Lemkey, ” Mechanical properties of fine-crystalline two-phase materials”, Material Science and Engineering.A, Vol.45, 1997.

[8] L. Cha-Yong, H. Seung-Zeon & H. L. Seong, "Formation of Nano-Sized Grains in Cu and Cu-Fe-P Alloys by Accumulative Roll Bonding Process", Metals and Materials International, Vol.12, pp.225-232, 2006.

[9] H. Sekine, R Chen, “A combined microstructure strengthening analysis of SiCp/Al metal matrix composites”, Composites, Vol. 26, pp.183-188, 1995.

[10] C. Lu, K. Tieu & D. Wexler, “Significant enhancement of bond strength in the accumulative roll bonding”, Composites, Vol. 26, pp. 145-156, 2008.

[11] C. P. Heason, P. B. Prangnell, “Texture Evolution and Grain Refinement in Al Deformed to Ultra-High Strains by Accumulative Roll Bonding (ARB)”, Material Science Forum, Vol. 733, pp. 408-418, 2002.

[12] N. Hansen, X. Huang, R. Ueji & N. Tsuji, “Structure and strength after large strain deformation”, Mater Sci Eng A, Vol, 191, pp. 387-389, 2004.

[13] J. Abenojar, F. Velasco & M. A. Martinez, “Optimization of processing parameters for the Al %10 B4C system obtained by mechanical alloying”, Journal of Materials Processing, Vol. 328, pp.222-229, 2008.

[14] L. Ghalandari, 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.

سختی و کاهش داکتیلیته آن به سبب افزایش کرنش سختی و ریز دانه شدن در طی فرایند ARB می باشد.

۳- مطابق نتایج حاصله در طی مراحل ARB دانسیته نابجایی و سطوح مشترک افزایش پیدا می کند، در نتیجه با افزایش سیکل های فرایند ARB مقاومت الکتریکی افزایش خواهد یافت.

۵- مراجع

[۱] امیرحسین اسلامی، " 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)", نشریه مواد نوین، دوره ۴، شماره ۱۳، ص ۵۷-۶۸، پاییز ۱۳۹۲.

[2] H. Eslami, S.M. Zebarjad & M.M. Moshksar, “A study on the mechanical and magnetic properties of Cu/Ni multilayer composite fabricated by Accumulative Roll Bonding process (ARB)”, Materials Science and Technology, Vol. 29, pp. 52-64, 2013.

[3] S. A. Hosseini, H. Danesh Manesh, “High-strength, high-conductivity ultra-fine grains commercial pure copper produced by ARB process”, Materials and Design, Vol 30, pp. 2911-2918, 2009.

[4] Y. Saito, N. Tsuji, H. Utsunomiya, T. Sakari & R.G. Hong, “Ultra-fine grained bulk aluminum produced accumulative roll-bonding (ARB) process”, Scripta Materialia, Vol. 39, pp.1221-1227, 1998.

[5] J. Young Hwan, K. Sang shik & H. Seung- Zeon, "Tensile Behavior of Commercially Pure Copper Sheet Fabricated by 2- and 3- Layered Accumulative Roll Bonding (ARB) Process", Metal and Materials International, Vol. 14, pp. 171-179, 2008.

[6] Y. S. Kim, S. H. Kang, & D. H. Shin, ” Effect of rolling direction on the microstructure and

۶- پی نوشت

- [1] (Equal channel angular pressing)
- [2] (Cyclic extrusion-compression)
- [3] (High Pressure Torsion)
- [4] (Accumulative roll bonding)
- [5] Geometrically Necessary Dislocations