

بررسی خواص مکانیکی و مغناطیسی کامپوزیت لایه ای مس- نیکل تولید شده به روش اتصال نورد تجمعی (ARB)

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

چکیده

روش تغییر شکل پلاستیک شدید (SPD) به عنوان یکی از روش‌های تولید مواد به اندازه دانه نانومتری مطرح می‌باشد. برای ایجاد یک ساختار با دانه‌های ریز (با اندازه دانه کمتر از یک میکرون) لازم است از راه اعمال کرنش‌های پلاستیک زیاد دانسیته بالایی از نابه‌جایی‌ها ایجاد شود. فرآیند نورد تجمعی ARB به عنوان یکی از پرکاربردترین روش‌های اعمال تغییر شکل شدید پلاستیک و دستیابی به ساختارهای با اندازه دانه نانومتری در ورق‌ها در بعد صنعتی مطرح می‌باشد. در این پژوهش از فرآیند اتصال نورد تجمعی برای تولید کامپوزیت لایه‌ای Cu/Ni استفاده شده است که تعداد هفت مرحله نورد در شرایط بدون روان‌کار همراه با پیش گرمایش 500°C پیش از هر مرحله نورد بر نمونه‌ها اعمال شده است. برای این منظور، از مس و نیکل خالص تجاری استفاده شد. نمونه‌های استاندارد از درون قطعات نورد شده تهیه و ریزساختار آن‌ها به وسیله میکروسکوپ نوری و الکترونی و خواص مکانیکی آن‌ها به وسیله آزمون‌های سختی و کشش مورد ارزیابی قرار گرفت. این آزمایش‌ها نشان دادند که سختی، تنش تسلیم و استحکام با افزایش مراحل ARB به گونه‌ای چشمگیر افزایش می‌یابد. همچنین، تاثیر حضور لایه‌های نیکل در افزایش خاصیت مغناطیسی در مراحل گوناگون با دستگاه مغناطیس سنج (VSM) مورد بررسی قرار گرفت.

واژه‌های کلیدی: فرایند اتصال نورد تجمعی، خواص مکانیکی و مغناطیسی، کامپوزیت لایه ای مس- نیکل.

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 همچنین، ایجاد میدان‌های مغناطیسی بسیار بالا مستلزم استفاده از موادی با رسانایی بالا، خواص مغناطیسی خوب و هزینه مناسب می‌باشد [۱]. به همین منظور، پژوهش‌های زیادی درباره مواد مرکب و آلیاژهای مس با فلزاتی همچون نیوبیوم، نیکل، آهن، کرم و نقره صورت گرفته است.

ریز شدن اندازه دانه یکی از روشهای مهم استحکام بخشی مواد است که نسبت به سایر روش‌های استحکام بخشی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. با این روش می‌توان همزمان به ترکیبی مناسب از استحکام و نرمی دست یافت. در حالی‌که در روش‌های دیگر، افزایش استحکام با کاهش نرمی و قابلیت شکل‌پذیری همراه می‌باشد. بطور کلی رابطه بین استحکام ماده با اندازه دانه از راه رابطه معروف هال-پیچ^۱ و به صورت زیر بیان می‌شود [۲]:

$$\sigma_y = \sigma_0 + kd^{-1/2}$$

که در آن σ_y تنش تسلیم، σ_0 تنش اصطکاکی، d اندازه دانه و k ثابتی است که به جنس ماده بستگی دارد. رابطه بالا نشان می‌دهد که استحکام ماده با عکس مجذور اندازه دانه رابطه دارد. به بیان دیگر، با ریز شدن اندازه دانه استحکام ماده افزایش می‌یابد [۲]. بطور کلی روش‌های تولید مواد نانومتری را می‌توان به دو گروه تقسیم بندی کرد. روش نخست با عنوان روش پایین به بالا^۲ و روش دوم با نام روش بالا به پایین^۳ شناخته می‌شود.

در روش‌های پایین - بالا مواد UFG و NC را از کنار هم قرار دادن و چیدمان اتم‌های مجزا و یا تجمع ذرات نانو پودری ایجاد می‌کنند. رسوب دهی الکتریکی، آسیاب‌کاری گلوله ای و آسیاب کاری در دماهای بسیار کم، مثال‌هایی از روش پایین - بالا می‌باشد. مشکل عمده این روش‌ها کوچک بودن ابعاد قطعه تولیدی است که تنها در ابزارهای الکترونیکی کاربرد دارد. همچنین، قطعه تولید شده دارای مقداری تخلخل و آلودگی است که در حین

فرآیند ساخت قطعه حاصل می‌شود. در روش‌های بالا - پایین، در ابتدا از یک ماده حجیم با دانه بندی درشت استفاده می‌کنند. سپس با انجام فرایندهای خاصی، اندازه دانه آن را تا حد کوچکتر از میکرون و یا نانومتر کاهش می‌دهند. این روش‌ها عمدتاً بر پایه ایجاد کرنش‌های پلاستیک بسیار زیاد در ماده استوار و به روش‌های تغییر شکل شدید پلاستیک^۴ SPD معروف می‌باشند. تغییر شکل‌های شدید پلاستیک SPD ناشی از انواع فرآیندهای مکانیکی می‌تواند سبب ایجاد ساختار نانو و مواد با اندازه دانه نانومتری و هم‌چنین، سبب تغییر در ساختمان میکروسکوپی گردد [۳، ۴].

یکی از روش‌های موفق SPD، اتصال از راه اتصال نورد تجمعی^۵ (ARB) می‌باشد که در طی این فرایند تغییر شکل پلاستیک شدیدی 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 اخیراً در تولید کامپوزیت‌های چند لایه استفاده شده است [۵]. 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]. بتازگی تلاش‌های زیادی برای بهبود خصوصیات مغناطیسی صورت گرفته است. برای بهبود و پیشرفت در این حوزه به ترکیبی جدید با اشباع مغناطیسی بالاتر نیاز است. مس فلزی است با قابلیت هدایت الکتریکی و حرارتی بالا و جزء فلزات دیا مغناطیسی می‌باشد [۶]. بمنظور بهبود خواص مغناطیسی می‌توان از کامپوزیت شدن آن با مواد و یا فلزات فرو مغناطیس مانند نیکل سود جست. نیکل فلزی سخت، انعطاف پذیر، هادی جریان الکتریسیته و مقاوم به خوردگی است. این عنصر جزء فلزات فرو مغناطیس بوده و دارای خواص مغناطیسی بالایی می‌باشد. ایجاد ماده مرکب Ni/Cu و بررسی خواص مکانیکی و مغناطیسی

⁴ -Sever Plastic Deformation

⁵ - Accumulated Roll Bonding

¹ -Hall-Petch

² -Bottom-up procedure

³ -Top-down Procedure

صفحه‌های حاوی جهات نورد توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) بررسی گردید و در نهایت، برای مطالعه خواص مکانیکی (حداکثر استحکام کششی، افزایش طول و منحنی‌های تنش و کرنش) آزمون استحکام کششی با استفاده از دستگاه Zwick 250 انجام گرفت در ادامه برای اندازه گیری سختی نمونه‌ها از دستگاه سختی سنج ویکرز مدل Bohler با بار ۲۵ گرم و زمان توقف ۱۰ ثانیه استفاده شد. در پایان تحلیل و بررسی اندازه گیری خواص مغناطیسی شامل اشباع مغناطیسی (M_s)، پسماند مغناطیسی (M_R) و نیروی وادارندگی مغناطیسی (H_c) با استفاده از روش مغناطیس سنج با نمونه ارتعاشی VSM صورت گرفت. در شکل ۲ عوامل تاثیرگذار در حلقه هیستریزس نمایش داده شده است.

نتایج و بحث

تغییر ساختار لایه ای کامپوزیت Cu/Ni حین فرایند ARB

در این بخش با استفاده از تصاویر میکروسکوپ نوری OM و میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM چگونگی تغییر تعداد، ضخامت و پیوستگی لایه‌ها تا مرحله آخر و چگونگی تغییر شکل آن‌ها بررسی شده است. آنالیز تصاویر SEM ابزار اصلی بکار رفته جهت تحلیل در این بخش می‌باشد. با توجه به تصاویر تهیه شده از میکروسکوپ نوری بر اساس شکل ۳ می‌توان پیوستگی لایه‌ها را تا پاس هفتم مشاهده کرد. در این پژوهش مس فاز نرم و نیکل فاز سخت می‌باشد. بر اساس پژوهش‌های انجام گرفته به وسیله هوانگ [۷]، به فاز نرم نیروی فشاری و به فاز سخت نیروی کششی وارد می‌شود. قرار گرفتن دو ناحیه با استحکام پیوند متفاوت در مجاور یکدیگر موجب می‌شود که ناحیه با پیوند قوی مورد تنش کششی و دیگری مورد تنش فشاری قرار گیرد.

شکل ۴ تغییرات میکرو ساختار کامپوزیت مس-نیکل در طی سیکل‌های گوناگون فرایند ARB که با میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM گرفته شده است را نشان می‌دهد. روشن است که لایه‌های نیکل در پاس‌های اولیه تولید ساندویچ به صورت یکنواخت و

کامپوزیت لایه ای حاصل از فرآیند نورد تجمعی ARB اساس مطالعه در این پژوهش می‌باشد.

روش پژوهش

مواد اولیه

مواد مورد استفاده در این پژوهش ورق‌های مس و نیکل خالص تجاری می‌باشد که ترکیب و ابعاد آن در جدول ۱ و خواص مکانیکی آنها در جدول ۲ مشخص شده است.

تولید کامپوزیت لایه ای مس-نیکل

برای انجام فرآیند در ابتدا ورق‌های مس و نیکل در ابعاد مشخص برشکاری شدند از دو ورق مس و نیکل به ضخامت ۱ میلی‌متر و ابعاد 5×12 سانتی‌متر برای شروع فرآیند استفاده شد. در ابتدا برای از بین بردن چربی‌ها و دیگر آلودگی‌های سطح، ورق‌های برش خورده به مدت ۵ دقیقه در استون غوطه‌ور شدند. سپس برای ایجاد یک پیوند مناسب، به وسیله برس خورشیدی و دریل برسکاری سطوح ورق‌ها انجام شد. روند انجام فرایند ARB برای کامپوزیت مس-نیکل در شکل ۱ نشان داده شده است.

بدین ترتیب پس از آماده‌سازی سطوح بین دو ورق مس و نیکل، دو سطح برسکاری شده روی هم قرار گرفتند و توسط سیم‌های مسی چهارگوشه آن مقید شد ضخامت ساندویچ اولیه ۲ میلی‌متر بود که پس از پاس صفرم نورد به ۱ میلی‌متر کاهش ضخامت داد (۵۰٪ کاهش ضخامت). دستگاه نورد مورد استفاده دارای غلطک‌هایی 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 دوباره و مهار چهارگوشه آن و اعمال پیش گرمایش 500°C به مدت ۱۰ دقیقه بار دیگر تحت نورد با ۵۰٪ کاهش ضخامت قرار گرفت. این فرآیند تا هفت سیکل بدون روانکار انجام پذیرفت. پس از هر مرحله نورد نمونه‌هایی جهت انجام آزمایش‌ها تهیه شدند. سطح مقطع کناری ورق‌های جوش خورده پس از سنباده زنی و پولیش با پارچه و خمیر الماسه با میکروسکوپ نوری مشاهده شد تا چگونگی جوش خوردن ورق‌ها مشاهده شود. هم‌چنین،

سیکل‌های فرایند ARB کاهش می‌یابد. بطور کلی می‌توان گفت که تغییرات ساختاری نایکنواخت در کامپوزیت مس- نیکل به گونه خاص به تعامل ناهمگن ماتریس مس و لایه‌های تقویت کننده نیکل مربوط می‌باشد که ناشی از تفاوت جریان تنش در فازها، اصطکاک میان ماتریس مس و لایه‌های نیکل و اصطکاک ما بین غلطک و سطح نمونه می‌باشد.

استحکام کششی کامپوزیت‌های مس - نیکل تولید شده به روش ARB

شکل ۶ منحنی تنش - کرنش کامپوزیت لایه ای Cu/Ni را طی سیکل‌های گوناگون فرایند ARB نشان می‌دهد. با افزایش تعداد سیکل‌های فرایند ARB شاهد افزایش استحکام کششی در کامپوزیت Cu/Ni می‌باشیم. همان گونه که در بررسی ساختاری کامپوزیت لایه ای مس- نیکل مشاهده نمودیم، لایه‌های نیکل در پاس‌های اولیه انسجام و یکپارچگی خود را حفظ می‌کنند، اما با افزایش تعداد سیکل‌های فرایند ARB در نهایت، لایه‌های نیکل گلوبی شده و به صورت موضعی دچار شکست می‌شوند و پس از سیکل هفتم فرایند شاهد توزیع تقریباً یکنواختی از قطعات نیکل شکسته شده در زمینه مس می‌باشیم.

بر اساس شکل (۷-a) استحکام تسلیم و استحکام کششی کامپوزیت Cu/Ni با افزایش سیکل‌های فرایند ARB افزایش می‌یابد. بیشینه استحکام تسلیم و استحکام کششی نهایی به ترتیب ۳۸۵ و ۴۳۰ مگاپاسکال بر اساس شکل پس از سیکل پنجم بدست می‌آید. همان گونه که در شکل (۷-b) مقایسه بین استحکام کششی کامپوزیت مس- نیکل و مس خالص ARB شده مشاهده می‌شود، حضور لایه‌های تقویت کننده نیکل تاثیر بسزایی در افزایش استحکام داشته است. کرنش سختی با ایجاد ناهمگایی‌ها و بهبود اندازه دانه دو مکانیزم اصلی در افزایش استحکام در کامپوزیت‌های تولید شده به روش ARB می‌باشند.

در مراحل اولیه فرایند ARB، نرخ بالایی از کار سختی سبب افزایش استحکام در کامپوزیت می‌شود. هم‌چنین، با افزایش سیکل‌های فرایند، توزیع یکنواخت تر و قطعات

منسجم می‌باشد (شکل ۴-a). سپس گلوبی شدن و شکست موضعی به صورت تدریجی و پیوسته در سیکل‌های متوالی رخ می‌دهد و در نهایت جدایی لایه‌های نیکل در پاس هفتم رخ می‌دهد (شکل ۴-c-d). پس از هفت سیکل فرایند ARB، یک کامپوزیت لایه‌ای از ماتریس مس با توزیع همگن قطعات نیکل شکسته شده در ماتریس مس بدست می‌آید (شکل ۴-d).

ماتریس مس به عنوان یک واسط و انتقال دهنده بار به نوار نیکل عمل می‌کند و تمام فضای میان لایه‌های نیکل را پر می‌کند. همان گونه که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، رابطه و پیوندی مناسب و یکنواخت بین لایه‌های مس و نیکل مجاور هم وجود دارد. بر اساس شکل ۵، با افزایش سیکل‌های فرایند ARB، با افزایش کرنش ضخامت لایه‌های نیکل کاهش می‌یابد.

دو فلز در نورد اولیه به سرعت به هم می‌چسبند و سپس با ایجاد و افزایش تنش در طی فرایند لایه‌های نیکل تسلیم شده و در نهایت، گلوبی شدن و شکست در پاس هفتم رخ می‌دهد. همان گونه که در شکل ۵ نشان داده شده است لایه‌های نیکل در طی سیکل‌های اولیه فرایند ARB همراه با کاهش ضخامت، انسجام و یکپارچگی خود را در بیش‌تر مناطق حفظ کرده اند. پس از سیکل پنجم، گلوبی شدن، شکست و جدا شدن لایه‌های نیکل در نمونه‌ها صورت می‌گیرد.

بطور کلی در طی تغییر شکل پلاستیک فلزات نامشابه، ناپایداری‌های اصلی ناشی از تفاوت در خواص مکانیکی لایه‌های (مس و نیکل) سبب ایجاد گلوبی و شکست در لایه سخت تر می‌شود [۸، ۹، ۱۰]. به بیان دیگر، معیار میزان کرنش مورد نیاز برای وقوع پدیده شکست و جدایش لایه‌های سخت در نورد کامپوزیت‌های لایه‌ای نامشابه میزان اختلاف در خواص مکانیکی موجود در کامپوزیت می‌باشد. بنابراین، می‌توان شکست ناهمگن لایه‌های نیکل بصورت قطعات کوچک در داخل مس را به تفاوت در خواص مکانیکی لایه‌های مس و نیکل نسبت داد.

این اثر با افزایش تعداد سیکل‌های فرایند ARB ضعیف می‌شود (شکل ۵-d). با توجه به اصول فرایند ARB، ضخامت لایه‌های نیکل با افزایش تعداد

هر دو ماتریس مس و لایه های تقویت کننده نیکل افزایش می یابد. میکرو سختی برای هر دو نمونه به ترتیب از مقادیر اولیه ۶۱ و ۸۲ به ۱۰۳ و ۱۳۰ مگا پاسکال برای لایه های مس و نیکل افزایش می یابد. مشاهده می شود که پس از نورد اتصالی اولیه مس- نیکل، افزایش شایان توجهی در سختی لایه های مس و نیکل رخ می دهد سپس با پیشرفت فرایند ARB، نرخ افزایش سختی در هر دو فلز بصورت نسبی کاهش یافته است. همچنین، گفتنی است که شبکه کریستالی مس و نیکل هر دو FCC است و روش تغییر شکل در آن بدلیل نقص انرژی چیدمان بالا لغزش می باشد.

بررسی خواص مغناطیسی کامپوزیت های مس- نیکل تولید شده به روش ARB

نمودار هیستریزس مربوط به کامپوزیت لایه ای مس- نیکل در طی سیکل های گوناگون فرایند ARB در شکل ۹ نشان داده شده است. همان گونه که در نمودارهای هیستریزس شکل ۹ می توان مشاهده نمود مقادیر نیروی وادارنگی مغناطیسی (H_c) و پسماند مغناطیسی (M_R) دارای نسبت مناسبی بوده هم چنین، حضور لایه های نیکل سبب ایجاد حلقه مغناطیسی باریکی گردیده است. به گونه ای که می توان مشاهده نمود حضور لایه های نیکل در کامپوزیت سبب افزایش چشمگیر مقادیر نیروی وادارنگی مغناطیسی و پسماند مغناطیسی می گردد که افزایش این دو عامل تاثیر بسزایی در خواص مغناطیسی مواد دارد.

نمودار بالا نشانگر ایجاد یک ماده مغناطیس نرم می باشد. در مواد مغناطیسی نرم سطح زیر حلقه کم بوده و حلقه پسماند باریک دارند. در این مواد مانند آهن، کبالت و نیکل در صورتی که خالص باشند، حجم حوزه ها به سهولت تغییر می کند و در نتیجه به سهولت با یک میدان ضعیف آهنربا می شوند و خاصیت آهنربایی خود را نیز به راحتی از دست می دهند. این مواد قابلیت نفوذ اولیه و وادارنگی مغناطیسی بالا دارند که با اعمال میدان نسبتاً کوچکی به اشباع می رسند. مواد مغناطیس نرم با حذف میدان مغناطیسی خارجی خاصیت آهنربایی خود را از دست می دهند و به دلیل همین خاصیت، آن ها برای ساختن آهنرباهای الکتریکی (آهنرباهای غیر دائم) مناسب

ریز تر نیکل در زمینه مس کار سختی را بالا می برد. با افزایش سیکل های فرایند ARB کار سختی به تدریج کاهش یافته و تاثیر بهبود اندازه دانه و ریز دانه شدن در افزایش استحکام نقشی مهم تر را ایفا می کنند. با افزایش سیکل های فرایند ARB به دلیل ریز شدن دانه های مس و نیکل و افزایش مرز دانه ها به عنوان مانعی در برابر حرکت نابجایی ها، استحکام کامپوزیت افزایش می یابد. همان گونه که در شکل ۶ مشاهده می شود، یکنواختی و افزایش طول با افزایش سیکل های فرایند ARB افزایش می یابد. دلیل این افزایش طول را می توان افزایش استحکام باند میان ماتریس مس و لایه های تقویت کننده نیکل بیان کرد. با کاهش ضخامت لایه های نیکل به تدریج شاهد پراکندگی یکنواخت قطعات نیکل در زمینه مس می باشیم. دلیل دیگری که می تواند تاثیرگذار باشد آن است که با افزایش سیکل های فرایند ARB، لایه های سخت نیکل دچار شکست و ناپیوستگی شده و لایه های نرم مس نقش ماتریس کامپوزیت را بازی می کند.

افزون بر این، با پیشرفت فرایند با ایجاد و انباشت هر چه بیش تر نابجایی ها در نمونه ها، با توجه به مکانیزم ریز دانه شدن، این نابجایی ها درون دانه ها آرایش خاصی پیدا کرده و ابتدا به مرزهای زاویه کم و سپس به مرزهای زاویه زیاد تبدیل می شوند. نتیجه این پدیده کاهش دانسیته نابجایی های درون دانه می باشد که باعث افزایش قابلیت تغییر شکل نمونه ها می شود.

۳-۳ میکرو سختی سنجی کامپوزیت مس- نیکل

سختی لایه های مس و نیکل روی نمونه ها در سیکل های گوناگون فرایند به وسیله دستگاه ریز سختی سنج اندازه گیری شد. همان گونه که انتظار می رود، با افزایش پاس های فرایند سختی نمونه ها افزایش می یابد و نرخ افزایش سختی در پاسهای اولیه بیشتر از پاس های بعدی است زیرا عمده تجمع نابجایی ها و کار سختی در پاسهای اولیه رخ می دهد.

شکل ۸ افزایش میکرو سختی با افزایش تعداد پاس های فرایند را نشان می دهد. همان گونه که مشاهده می شود، با افزایش سیکل های فرایند ARB میکروسختی

می‌دهد. همان‌گونه که در دو شکل مشاهده می‌شود، پس از پاس سوم فرایند منحنی‌ها با هم تلاقی داشته که نمایانگر مقادیر بهینه‌ای از سه پارامتر پسماند مغناطیسی، وادارنگی مغناطیسی و اشباع مغناطیسی می‌باشد.

نتیجه گیری

در این پژوهش از فرایند نورد تجمعی به گونه موفقیت آمیز در تولید کامپوزیت لایه ای Cu/Ni استفاده گردید تا سیکل هفتم اتصال نورد تجمعی با نمونه‌هایی دارای شکل پذیری مناسب و قطعات بدون عیب ماکروسکوپی بدست آمد. هم‌چنین، نتایج نشان دادند که:

۱- فرایند ARB می‌تواند در تولید کامپوزیت لایه‌ای Cu/Ni مورد استفاده قرار گیرد. با افزایش سیکل‌های فرایند ARB، لایه‌های نیکل شروع به گلوبی شدن و شکست می‌کنند که منجر به جدا شدن و شکست فاز نیکل می‌گردد. پس از هفت سیکل فرایند ARB یک کامپوزیت مس با توزیع یکنواختی از فاز تقویت کننده نیکل بدست می‌آید.

۲- با افزایش سیکل‌های فرایند ARB شاهد افزایش استحکام کششی و افزایش طول نسبت به مقادیر ساندویچ اولیه هستیم. هم‌چنین، استحکام کامپوزیت لایه‌ای Cu/Ni بسیار بالاتر از مس خالص ARB شده می‌باشد که این افزایش استحکام بسبب توزیع فاز تقویت کننده نیکل در ماتریس مس می‌باشد.

۳- بر اساس نتایج بدست آمده، با افزایش سیکل‌های فرایند ARB میکروسختی هر دو ماتریس مس و لایه‌های تقویت کننده نیکل افزایش می‌یابد.

۴- با افزایش سیکل‌های فرایند ARB مقادیر پسماند مغناطیسی و بویژه وادارنگی مغناطیسی افزایش می‌یابد که به دلیل خاصیت فرومغناطیس نیکل شاهد ایجاد یک کامپوزیت نرم مغناطیسی می‌باشیم.

هستند. مقدار H_C نیروی وادارنگی مغناطیسی بر نرم یا سخت بودن ماده فرومغناطیس دلالت دارد.

هر چه مقدار H_C کوچک‌تر باشد، یعنی ماده در میدان‌های پایین تر مغناطش القا شده پسماند را از دست می‌دهد و از طرفی به راحتی نیز به مغناطش اشباع می‌رسد و به اصطلاح گفته می‌شود ماده دارای نیروی وادارنگی و نقوذپذیری بالا می‌باشد [۱۱، ۱۲، ۱۳]. فاز مغناطیس نرم اشباع باید اشباع مغناطیس بالاتری از فاز مغناطیس سخت داشته باشد. به گونه‌ای که حتی مغناطیس باقی مانده این مواد نیز بیش‌تر از سایر مواد است. هم‌چنین، مغناطیس باقی مانده بالا سبب کاهش نیروی وادارنگی مغناطیسی می‌گردد [۱۱، ۱۳]. با توجه به شکل ۱۰ با افزایش سیکل‌های فرایند ARB، پسماند مغناطیسی (M_R) و مقدار نیروی وادارنگی مغناطیسی (H_C) برای کامپوزیت Cu/Ni همراه با بهبود اندازه دانه افزایش می‌یابد. به گونه‌ای که ماکزیمم مقدار نیروی وادارنگی مغناطیسی یعنی $48/5$ Oe در پاس پنجم فرایند ARB بدست آمده است. هم‌چنین، پسماند مغناطیسی از مقدار اولیه $2/2$ T در پاس نخست به $2/9$ T در پاس پنجم رسیده است.

در همه مواد دو حالت مربوط به اشباع مغناطیسی وجود دارد که مربوط به چگونگی قرارگیری قطب‌ها به صورت هم جهت و یا در جهت خلاف میدان می‌باشد و زمانی به بیش‌ترین مقدار خود می‌رسد که تمام دو قطبی‌های مغناطیسی در قطعه هم جهت با میدان خارجی قرار گیرند. همان‌گونه که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، با افزایش سیکل‌های فرایند ARB شاهد کاهش اشباع مغناطیسی (M_S) می‌باشیم زیرا ایجاد کوپل نیرو بین دو قطبی‌های اتمی مجاور سبب انحراف دو قطبی‌ها، قرارگیری قطب‌ها در جهت خلاف میدان نیروی خارجی و منجر به کاهش اشباع مغناطیسی می‌گردد.

شکل ۱۲ با عبور و انطباق منحنی‌های پسماند مغناطیسی و وادارنگی مغناطیسی با منحنی اشباع مغناطیسی، تعداد سیکل‌های مناسب فرایند ARB برای داشتن مقدار بهینه و مناسب از هر دو پارامتر را نشان

References

- ۱- ع. یزدانی، "تولید کامپوزیت های نانو ساختار آلومینیوم- کاربید بور به روش اتصال تجمعی نورد"، نشریه مواد نوین، دوره اول، شماره ۳، ص ۲۳-۳۲، بهار ۱۳۹۰.
- 2- K. Sanusi, and G. J. Oliver, "Effect of grain size on mechanical properties of nanostructured copper alloy by severe plastic deformation process", Journal of engineering, design and technology, Vol.7, pp. 335-341, 2009.
- 3- N. Tsuji, Y. Ito, Y. Saito, and Minamino, Y. "Strength and ductility of ultra-fine grained aluminum and iron produced by ARB and annealing", Scripta Mater; Vol. 47, pp. 893-899, 2002.
- 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, Vol. 503-504, pp. 681-686, 2006.
- 5- J. MC. Keown, A. Misra, H. Kung, R.G. Hoagland, and M. Nastasi, "Microstructures and strength of Nano scale Cu-Ag multi-layers", Scripta Mater, Vol. 46, pp.593-598, 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- Y. M. Hwang, H. H. Hsu, and H.J. Lee, "Analysis of plastic instability during sandwich sheet rolling", Int. J. Math. Tools Manufact, Vol. 36, pp. 47-62. 1996.
- 8- G. Min, J.M. Lee, S.B. Kang, and H.W. Kim, "Evolution of microstructure for multi-layered Al/Ni composites by accumulative roll bonding process", Mater Lett; Vol.60, pp. 3255-9. 2006.
- 9- J. M.C. Keown, A. Misra, H. Kung, R.G. Hoagland, and M. Nastasi, "Microstructures and strength of Nano scale Cu-Ag multi-layers", Scripta Mater, Vol. 46, pp. 593-8, 2002.
- 10- M. Alizade, and H. Paydar, "Fabrication of nanostructure Al/SiCp composite by accumulated roll binding process" journal of Alloy and Compounds, Vol. 492, pp. 231-235, 2010.
- 11- S. Kobayashi, H. Hikuchi, and S. Takahashi, "The effect of copper and manganese on magnetite minor hysteresis loops in neutron irradiated Fe model alloy", Journal of Nuclear Materials, Vol. 384, pp. 109-114, 2009.
- 12- F. Keffer, "The magnetic properties of materials." Scientific American, Vol. 207, pp. 222-234, 1967.
- 13- D. Jiles, "Introduction to magnetism and magnetic materials", Nelson Thornes, Cheltenham, UK, pp. 186-194, 1998.

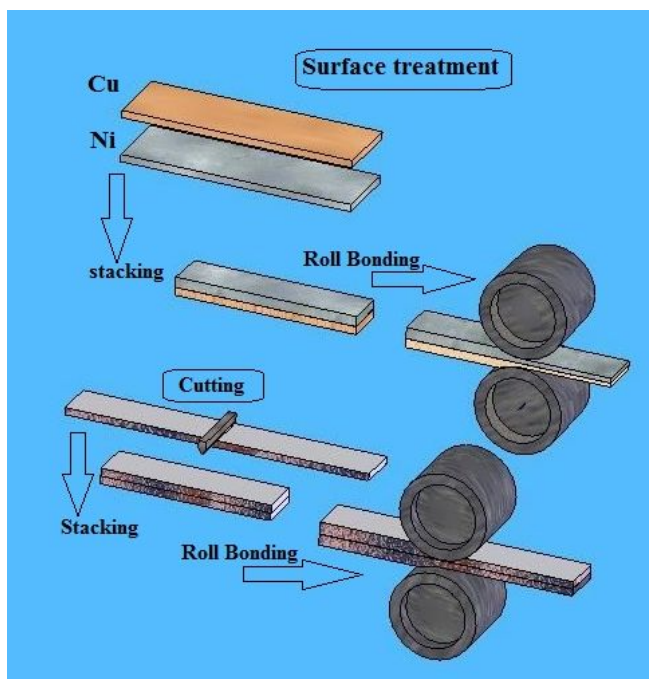
پیوست‌ها

جدول ۱- مشخصات ورق های اولیه مورد استفاده

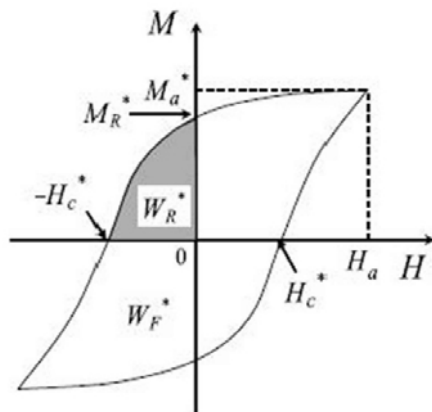
جنس ورق	ترکیب شیمیایی (درصد وزنی)	ابعاد ورق
نیکل خالص تجاری	0.4Fe, 0.35Mn, 99Ni, 0.2Cu, 0.02S, 0.015C, 0.015Si,	۱۲۰×۴۰×۱ mm
مس خالص تجاری	0.52Pb, 4Cu, 0.68Zn, 0.18Fe, 98.98 0.012Cd, 0.009Cr, 0.48Co, 0.019Sn,	۱۲۰×۴۰×۱ mm

جدول ۲- خواص مکانیکی فلزات مس و نیکل بکار رفته در پژوهش

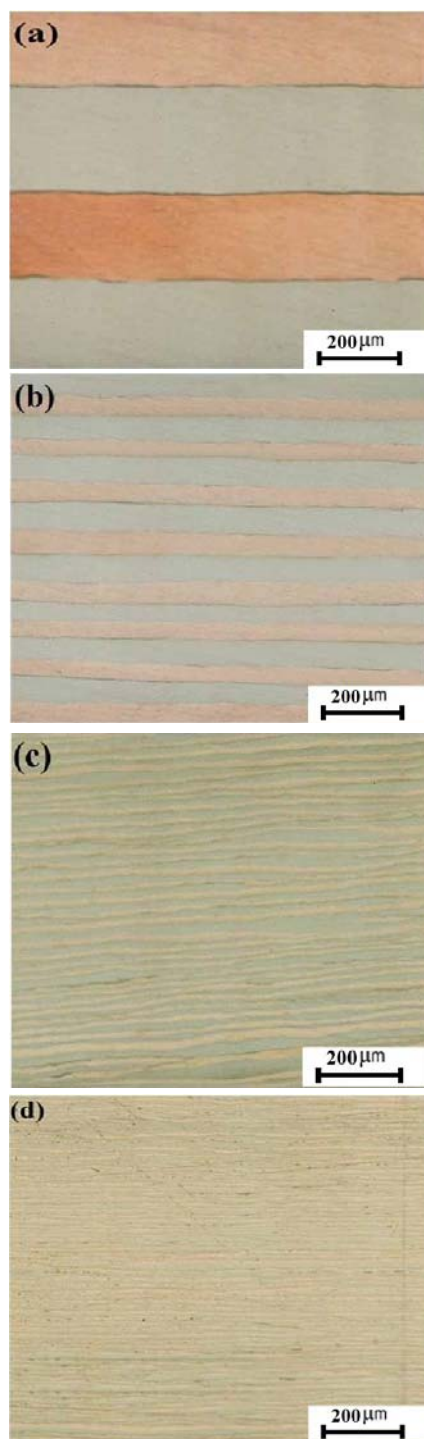
فلز	افزایش طول (%)	سختی (HV)	استحکام تسلیم (MPa)
نیکل	9.8	81	203.7
مس	32.8	62	87.5



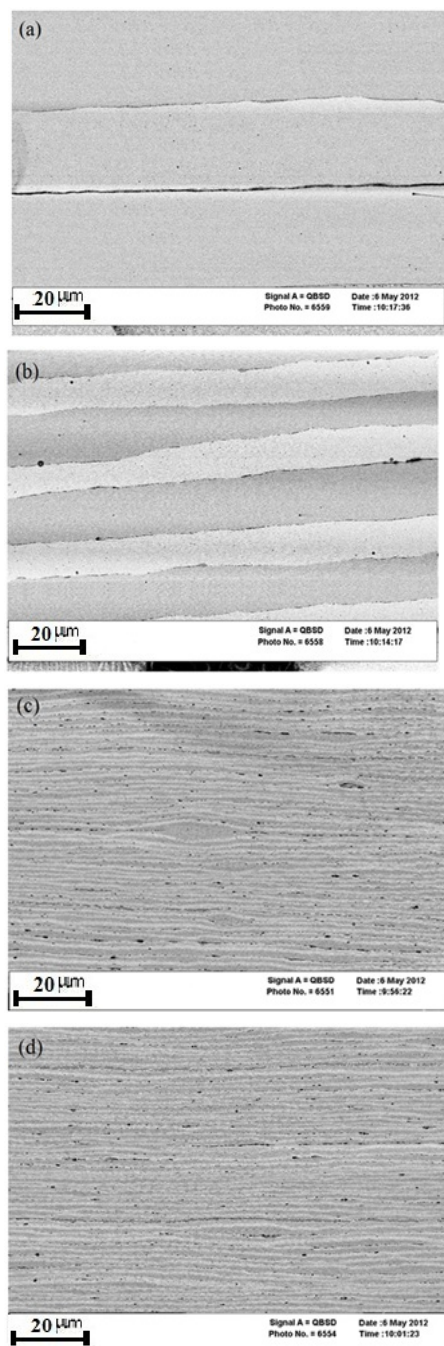
شکل ۱- شماتیکی از مراحل گوناگون فرایند اتصال نورد تجمعی [۱۲]



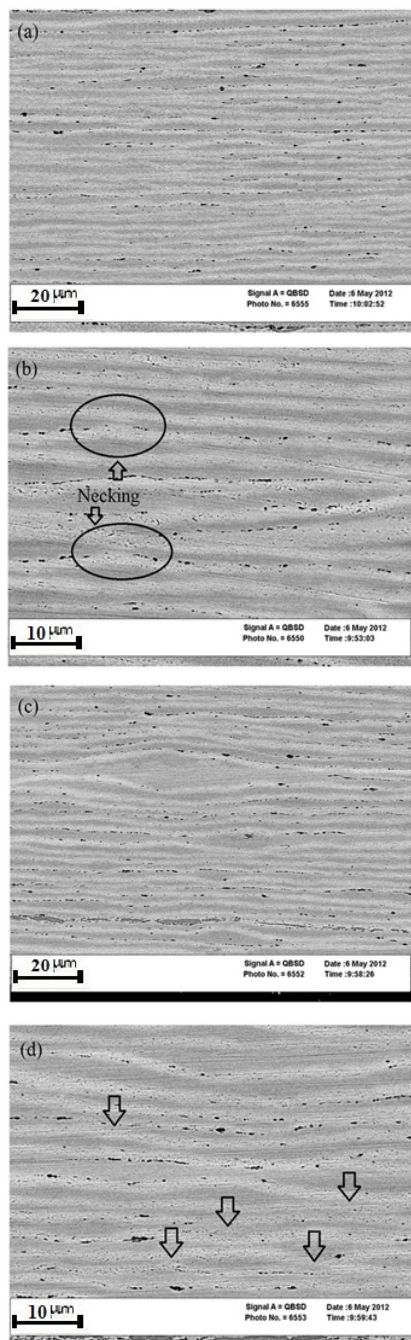
شکل ۲- پارامترهای تاثیرگذار در حلقه هیستریزیس



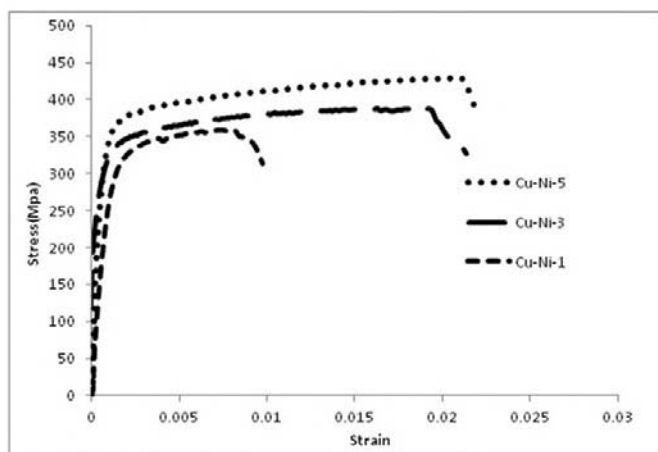
شکل ۳- تصاویر میکروسکوپ نوری کامپوزیت Cu/Ni در طی سیکل های گوناگون فرایند ARB (a) مرحله نخست (b) مرحله سوم (c) مرحله پنجم (d) مرحله هفتم



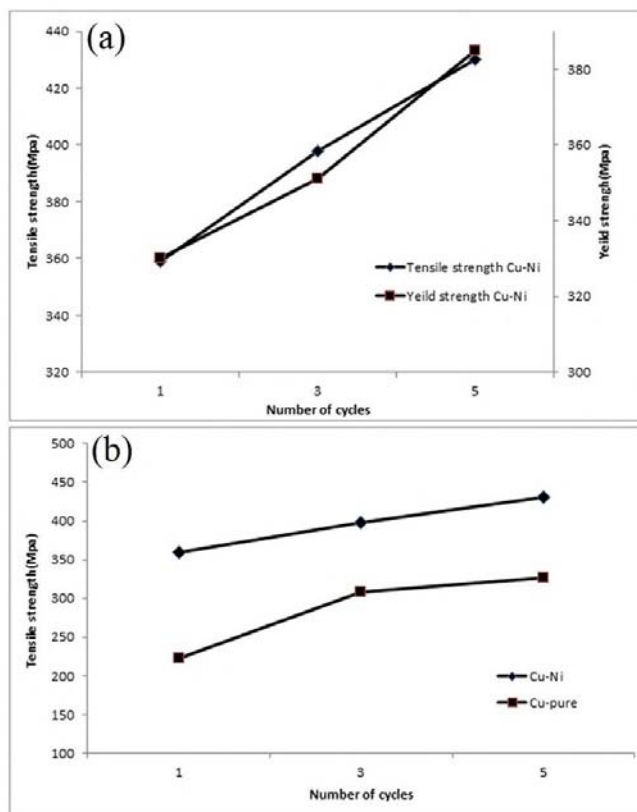
شکل ۴- تصاویر میکروسکوپ SEM مراحل (a) اول (b) سوم (c) پنجم (d) هفتم کامپوزیت Cu/Ni



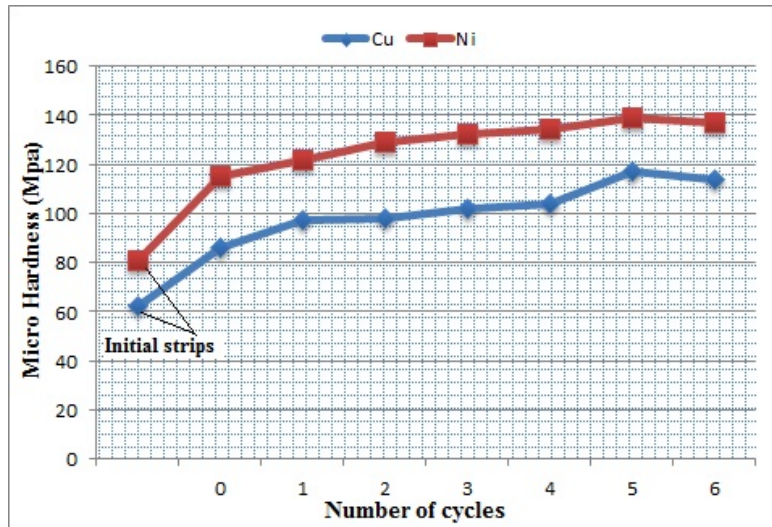
شکل ۵- تصاویر بزرگنمایی از میکروسکوپ SEM در مرحله (a و b پنجم، c و d) هفتم



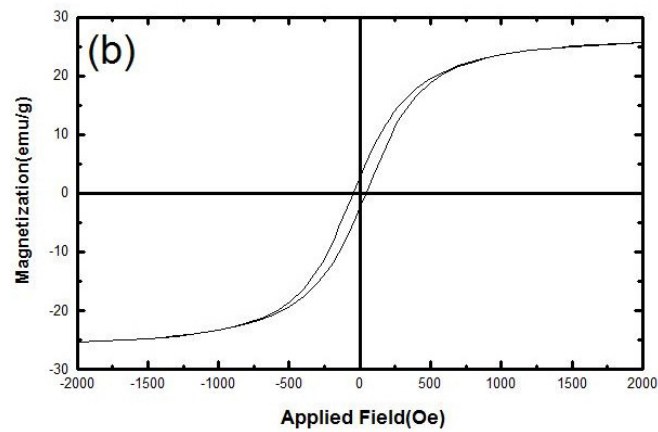
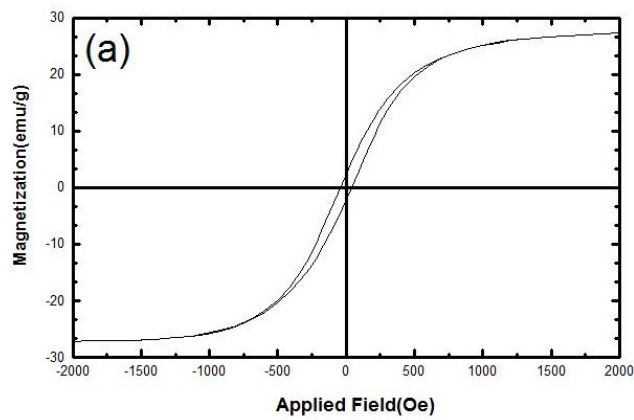
شکل ۶- منحنی تنش - کرنش کامپوزیت لایه ای Cu/Ni

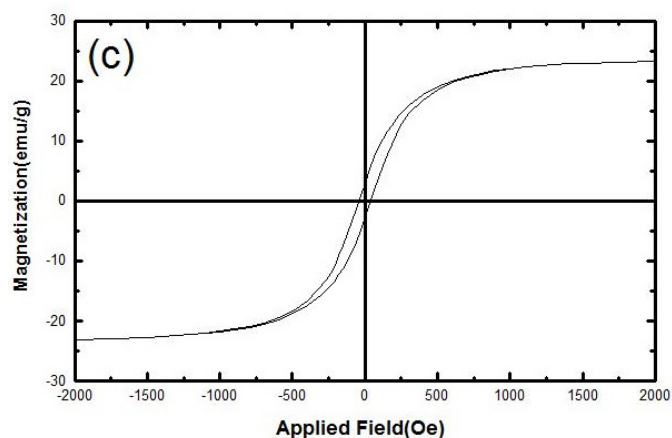


شکل ۷- منحنی استحکام کششی Cu/Ni، (a) مقایسه استحکام کششی نهایی و استحکام تسلیم در کامپوزیت Cu/Ni، (b) مقایسه مقادیر استحکام کششی نهایی کامپوزیت Cu/Ni و Cu تولید شده به روش ARB

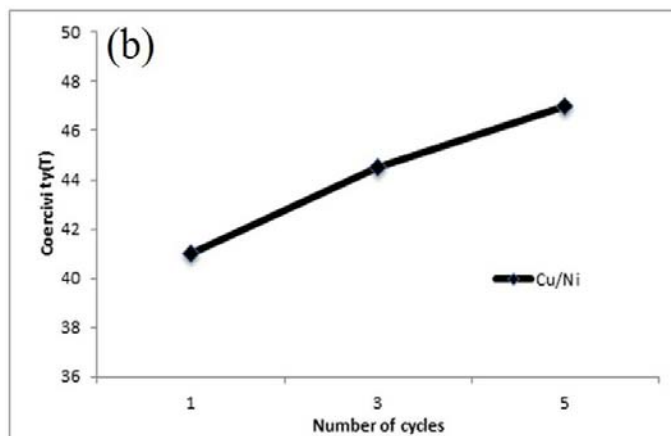
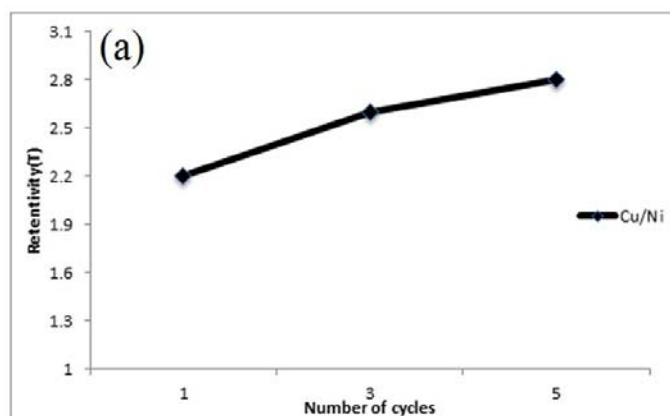


شکل ۸- نتایج میکروسختی سنجی مربوط به مقطع RD-ND طی سیکل های گوناگون فرایند ARB کامپوزیت Cu/Ni

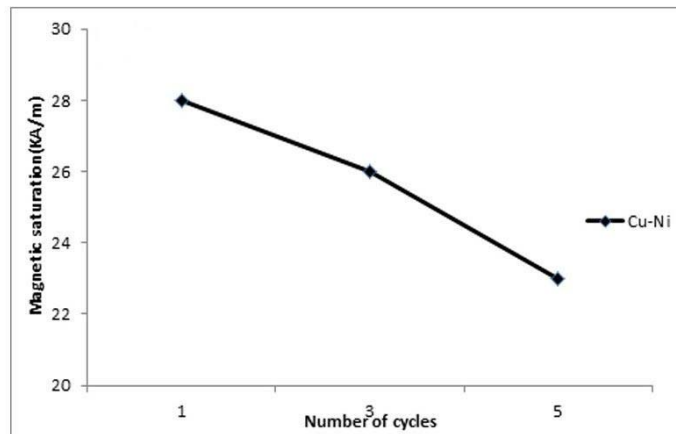




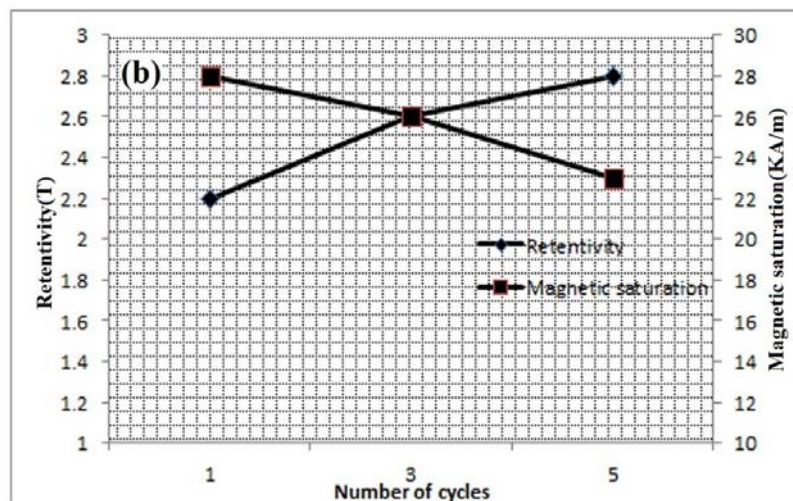
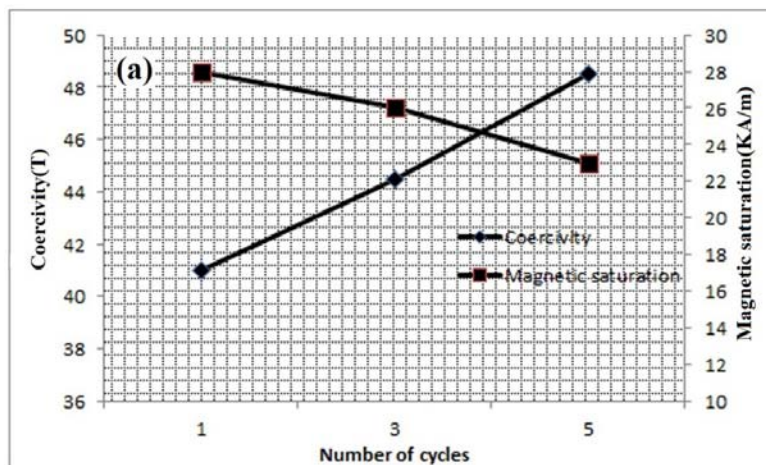
شکل ۹- تصاویر نمودار هیستریزیس مراحل گوناگون فرایند ARB (a) پاس اول، (b) پاس سوم، (c) پاس پنجم



شکل ۱۰- مقایسه خواص مغناطیسی کامپوزیت مس- نیکل در طی سیکل‌های گوناگون فرایند ARB، (a) منحنی پسماند مغناطیسی، (b) منحنی نیروی وادارنگی مغناطیسی



شکل ۱۱- منحنی اشباع مغناطیسی کامپوزیت مس- نیکل در طی سیکل‌های گوناگون فرایند ARB



شکل ۱۲- مقایسه خواص مغناطیسی کامپوزیت مس- نیکل در طی سیکل‌های گوناگون فرایند ARB، (a) منحنی پسماند

مغناطیسی- اشباع مغناطیسی، (b) منحنی نیروی وادارنگی مغناطیسی- اشباع مغناطیسی

