

بررسی اثرات ذرات تقویت کننده اکسید آهن (Fe_3O_4) بر رفتار مکانیکی و مغناطیسی ماده مرکب زمینه مس تولید شده به روش اتصال تجمعی نورد

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

۱- دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شیراز، شیراز، ایران

۲- استاد، دانشکده مهندسی، دانشگاه آزاد واحد مرودشت، شیراز، ایران

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

*Amir.hossein.E@hotmail.com

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۰۸/۰۱، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۱۱/۰۳)

چکیده

روش تغییر شکل شدید پلاستیک (Severe Plastic Deformation) روشی است که برای تولید پیوسته مواد میکرو و نانو ساختار استفاده می شود. از بین روشهای SPD روش نورد تجمعی (ARB) به عنوان یکی از مهمترین روشها برای تولید مواد با استحکام بالا مطرح می باشد. در پژوهش حاضر از فرآیند اتصال نورد تجمعی به منظور تولید کامپوزیت لایه ای Cu/Fe_3O_4 با نسبت های مختلف ۱ و ۲٪ و ۲٪ وزنی از میکرو ذرات Fe_3O_4 و ورق های مس خالص تجاری استفاده شد. پس از پنج سیکل فرایند ARB توزیع مناسبی از ذرات تقویت کننده اکسید آهن در زمینه ریز ساختار مس به دست آمد. خواص مکانیکی (سختی و استحکام کششی) و مغناطیسی (اشباع، پایداری و پسماند مغناطیسی) این کامپوزیت طی مراحل مختلف فرایند ARB مورد مطالعه قرار گرفت که ایجاد حالت کامپوزیت لایه ای ریز ساختار، سبب بهبود خواص مکانیکی شامل (سختی و استحکام کششی) در مس گردید. همچنین تاثیر حضور ذرات تقویت کننده اکسید آهن (مگنتیت) در افزایش خاصیت مغناطیسی در مراحل مختلف با دستگاه مغناطیس سنج VSM مورد بررسی قرار گرفت.

واژه های کلیدی:

اتصال نورد تجمعی، کامپوزیت لایه ای، خواص مکانیکی، خواص مغناطیسی

۱- مقدمه

است. ریز شدن اندازه دانه یکی از روشهای مهم استحکام بخشی مواد است که نسبت به سایر روشهای استحکام بخشی از اهمیت ویژه ای برخوردار می باشد. با این روش می توان همزمان به ترکیب مناسبی از استحکام و چکش خواری دست یافت. در حالیکه در روشهای دیگر، افزایش استحکام با کاهش چکش خواری همراه می باشد. بطور کلی رابطه بین استحکام ماده با

پیشرفتهای اخیر در صنایع نظامی، برق و الکترونیک، اتومبیل سازی، قطارهای برقی، ابزارهای مغناطیسی در صنایع پزشکی و ایجاد میدان های مغناطیسی بسیار بالا مستلزم استفاده از رساناهایی بالا، خواص مغناطیسی خوب و هزینه مناسب می باشد. به همین منظور تحقیقات زیادی درباره مواد مرکب و آلیاژهای مس با نیویوم، نیکل، آهن، کرم، نقره صورت گرفته

افزودن ذرات به کامپوزیت‌ها جهت مستحکم کردن و تقویت آن‌ها می‌باشد. خواص مکانیکی و سایشی کامپوزیت‌های تقویت شده با ذرات می‌تواند به صورت قابل توجهی نسبت به فاز زمینه بهبود یابد [۶]. اخیراً تلاش‌های زیادی برای بهبود خصوصیات مغناطیسی صورت گرفته است. برای بهبود و پیشرفت در این حوزه احتیاج به یک ترکیب جدید با اشباع مغناطیسی بالاتری می‌باشد. مس فلزی است با قابلیت هدایت الکتریکی و حرارتی بالا و جزء فلزات دیا مغناطیسی می‌باشد [۷]. به منظور بهبود خواص مغناطیسی می‌توان از کامپوزیت شدن آن با مواد و یا فلزات با خواص مغناطیسی بالا سود جست.

اکسید آهن (مگنتیت) به عنوان ماده فری مغناطیس شناخته می‌شود، که در دمای اتاق رفتاری آپرپارامغناطیسی از خود نشان می‌دهد و دارای نفوذ پذیری بیشتر از فرو مغناطیس‌ها می‌باشد [۸].

با قرار دادن اکسید آهن در بین لایه‌ها، کامپوزیت لایه‌ای با ساختار ریز دانه و خواص مغناطیسی بالا ایجاد شده است. ایجاد ماده مرکب Cu/Fe_3O_4 و بررسی خواص مکانیکی و مغناطیسی کامپوزیت لایه‌ای حاصل از فرآیند نورد تجمعی (ARB) اساس مطالعه در این تحقیق می‌باشد.

۲- روش پژوهش

۲-۱ مواد اولیه

مواد مورد استفاده در این پژوهش ورقهای مس خالص تجاری می‌باشد که ترکیب، ابعاد و ویژگی‌های آن در جداول ۱ و ۲ مشخص شده است.

جدول (۱): مشخصات ورق‌های اولیه مورد استفاده.

جنس ورق	ترکیب شیمیایی (درصد وزنی)	ابعاد ورق
مس خالص تجاری	$98.4Cu, 0.68Zn, 0.18Fe,$ $0.22Pb, 0.48Co, 0.19Sn,$ $0.12Cd, 0.09Cr$	$120 \times 50 \times 1$ mm

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

اندازه دانه از طریق رابطه معروف هال-پیچ^۱ و بصورت زیر بیان می‌شود:

$$\sigma_y = \sigma_0 + kd^{-1.2}$$

که در آن σ_y تنش تسلیم، σ_0 مقاومت شبکه، d اندازه دانه و k ثابتی است که به جنس ماده بستگی دارد. رابطه فوق نشان می‌دهد که استحکام ماده با عکس مجذور اندازه دانه رابطه دارد. به عبارتی با ریز شدن اندازه دانه، استحکام ماده افزایش می‌یابد [۱]. یکی از روش‌هایی که ریز شدن اندازه دانه را به همراه دارد تغییر شکل بسیار زیاد و یا شدید^۲ (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 طریق نورد تجمعی^۳ اتصالی (ARB) می‌باشد. فرایند اتصال نورد تجمعی ARB یکی از فرآیندهای تغییر شکل شدید پلاستیک می‌باشد که توسط تسوجی و سیتو در سال ۱۹۹۸ برای ساخت مواد حجیم ابداع شد [۲]. در این فرایند تغییر شکل پلاستیک زیادی از طریق 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 آن 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 [۵].

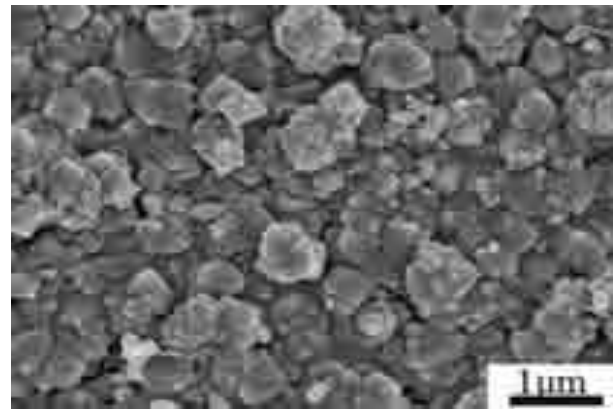
در اکثر تحقیقات صورت گرفته از یک فلز یا آلیاژ برای فرایند ARB استفاده شده و تولید کامپوزیت لایه‌ای در حضور ماده سرامیکی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. ایده کلی برای

سبب ایجاد قویترین اتصال لایه‌ای بین ورق‌ها می‌شود. در پژوهش حاضر به منظور مقایسه و برآورد تأثیر افزودن ذرات Fe_3O_4 دو نوع کامپوزیت با درصدهای وزنی ۱ و ۲ درصد اکسید آهن ساخته شد. پس از آماده‌سازی سطوح بین دو ورق مس با ابعاد یکسان یک لایه پودر Fe_3O_4 (۱٪ و ۲٪ وزنی) با الک به گونه‌ای یکنواخت پراکنده شد. سپس دو انتهای مجموعه ورق‌ها با سیم مسی بسته شدند تا حین نورد روی هم نلغزند. پس از پیش گرمایش ($300^{\circ}C$ به مدت ۱۰ دقیقه) ورق‌ها با یک کاهش سطح بیش از ۶۰ درصد نورد شدند. نمونه پس از پاس صفرم از وسط نصف و پس از آماده‌سازی مجدد و مهار چهار گوشه آن و اعمال پیش گرمایش مجدداً 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 میلیمتر انجام شد.

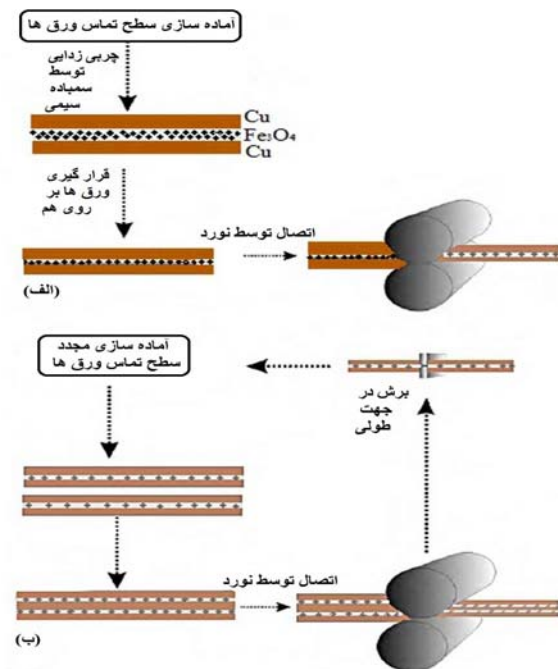
فلز	افزایش طول (%)	سختی (HV)	استحکام تسلیم (Mpa)
مس	۳۲/۸	۶۲	۸۷/۵

۲-۲ تولید کامپوزیت لایه‌ای مس-اکسید آهن (مگنتیت)

به منظور ساخت کامپوزیت لایه‌ای مس-اکسید آهن از ورق مس خالص تجاری با خلوص ۹۹/۹ درصد و پودر Fe_3O_4 با اندازه ذره ۱ میکرون استفاده شد. ذرات اکسید آهن در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل (۱): ذرات Fe_3O_4 .



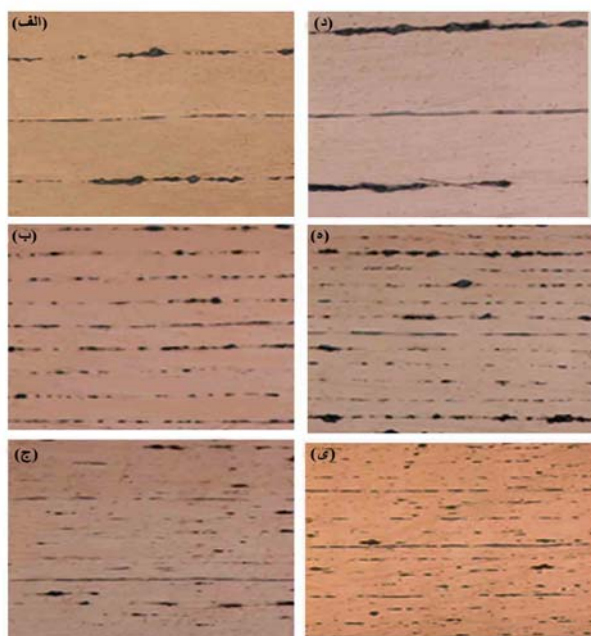
شکل (۲): شماتیکی از مراحل مختلف فرایند نورد جهت اتصال ورق: (الف) نورد اتصال، (ب) نورد اتصال تجمعی.

پس از تولید کامپوزیت مورد نظر نمونه‌هایی از هر مرحله فرآیند ARB جهت انجام آزمایشات تهیه گردید. نحوه جوش خوردن

برای انجام فرآیند در ابتدا ورق‌های مس در ابعاد مشخص برشکاری شدند. از دو نوار مسی به ضخامت ۱ میلی‌متر و ابعاد 5×12 سانتی‌متر برای شروع فرآیند استفاده شد. جهت ساخت کامپوزیت ابتدا ورق‌ها 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 0.4 میلیمتر استفاده شد. روند انجام فرایند ARB برای کامپوزیت مس-اکسید آهن (مگنتیت) در شکل ۲ نشان داده شده است. مقایسه بین نورد اتصال و نورد اتصال تجمعی برای کامپوزیت مس-اکسید آهن (مگنتیت) در این شکل آمده است. استفاده از سمباده سیمی بالاترین زبری سطح را ایجاد کرده و

شکل ۴ تصویر ماکروسکوپی کامپوزیت $\text{Cu}/\text{Fe}_3\text{O}_4$ با درصدهای مختلف وزنی ۱ و ۲ درصد اکسید آهن (Fe_3O_4) تهیه شده تا ۵ سیکل را نشان می‌دهد. همراه با افزودن لایه تقویت کننده بین ورق‌ها، کاهش سطح مقطع مختلف مورد بررسی قرار گرفت.

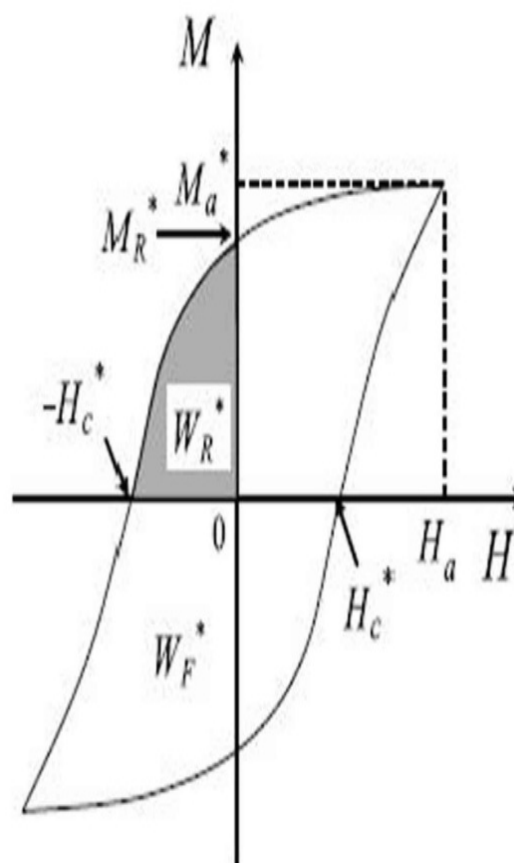
با توجه به شکل ۴ که تصویر میکروسکوپ نوری مقطع کناری ورق‌ها را نشان می‌دهد این نتیجه استنباط می‌شود که در مرحله افزودن پودر Fe_3O_4 در صد کاهش سطح مقطع بیش از ۶۰ درصد و پس از آن حین فرایند ARB، ۵۰ درصد کاهش سطح مقطع، سبب ایجاد جوش سرد مناسب و ماده‌ای یکپارچه‌ای شده است. ورق‌ها تا سیکل پنجم بدون عیب فرآیند ARB را پشت سر گذاشتند. اما افزایش چگالی نابه‌جایی و کاهش اندازه دانه سبب افزایش کرنش ماده و در نتیجه تردی گردید که این امر سبب پارگی ورق‌ها پس از سیکل پنجم ARB شد.



شکل (۴): تصویر میکروسکوپ نوری از: الف) پاس اول، ب) پاس سوم، ج) پاس پنجم با ۱٪ وزنی پودر Fe_3O_4 (د) پاس اول، ه) پاس سوم، ی) پاس پنجم با ۲٪ وزنی پودر Fe_3O_4 بزرگنمایی ۲۰۰X.

در مورد اثر وجود پودر تقویت کننده بین ورق‌ها بر نحوه جوش سرد اختلاف نظر وجود دارد. لیو و همکارانش در تحقیقات

ورق‌ها، چگونگی توزیع ذرات Fe_3O_4 در زمینه مس و ریز ساختار با استفاده از میکروسکوپ نوری مورد مطالعه قرار گرفت و در نهایت برای مطالعه خواص مکانیکی حداکثر (استحکام کششی، مقدار افزایش طول و منحنی‌های تنش و کرنش) آزمون استحکام کششی با استفاده از دستگاه Zwick 250 صورت گرفت. در پایان تحلیل و بررسی اندازه‌گیری 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^4 صورت گرفت. در شکل ۳ عوامل تاثیرگذار در حلقه هیستریزس نمایش داده شده است.



شکل (۳): پارامترهای تاثیرگذار در حلقه هیستریزس.

۳- نتایج و بحث

۳-۱ بررسی تحولات ریز ساختاری

مسئله ای که وجود دارد این است که اولاً در حالت حضور ذرات، تنش آستانه ای بیشتری برای غلبه بر لایه اکسیدی سطح نیاز بوده تا مقابله فلزات بکر زیر سطحی را سبب شده و ثانیاً 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 به منظور دستیابی به ویژگی های بهینه ی یک کامپوزیت، به ویژه 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 غیر یکنواخت ذرات و ایجاد خوشه ها و آگلومره های ذرات پودر زیاد است که این باعث افت شدید شکل پذیری و کاهش داکتلیته ماده می شود.

۳-۲ بررسی خواص مکانیکی کامپوزیت های مس - اکسید آهن تولید شده به روش ARB

به منظور بررسی استحکام کامپوزیت های لایه ای مس تقویت شده با ذرات اکسید آهن با درصدهای وزنی ۱ و ۲ درصد طی مراحل مختلف فرآیند از آزمون کشش تک محوری استفاده گردید. آزمایش کشش طبق استاندارد ASTM-E8 توسط دستگاه ZWICK-Z250 با نرخ کرنش 0.002 بر ثانیه صورت گرفت. منحنی تنش-کرنش در سیکل های مختلف فرآیند ARB در شکل ۵ نشان داده شده است.

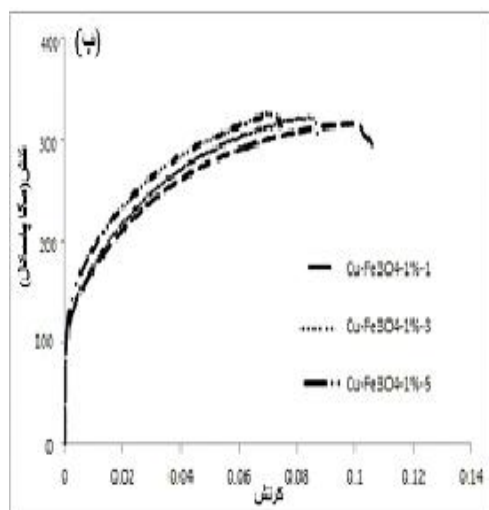
مطابق شکل ۵ استحکام تسلیم و استحکام کششی کامپوزیت Cu/Fe_3O_4 با افزایش سیکل های فرآیند ARB افزایش یافته است. همانطور که در شکل ۵ مشاهده می شود در پاس های ابتدایی فرآیند ARB که شامل نرخ های کار سختی بالاتر می باشد افزایش استحکام از کار سختی ماده سرچشمه می گیرد. همچنین واضح است که کاهش اندازه دانه سبب افزایش استحکام نهایی ماده می شود. مطابق شکل ۶ مقایسه بین استحکام کششی کامپوزیت های Cu/Fe_3O_4 و مس خالص ARB شده

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 [۶].

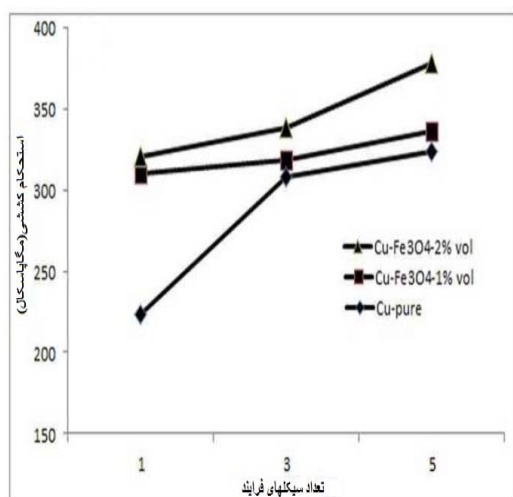
همچنین گزارش شده است که حضور ذرات با کاهش سطح تماس فلز-فلز اثر منفی بر کیفیت و استحکام جوش دارد [۹]. با این حال در این آزمایش با ایجاد کاهش سطح مقطع بالاتر از ۶۰ درصد در مرحله اول که پودر تقویت کننده بین لایه های مس وجود دارد و کاهش سطح مقطع ۵۰ درصدی در مراحل بعدی ARB جوش سرد مناسب و ماده ای یکپارچه بدست آمد. مشاهدات صورت گرفته در این تحقیق حاکی از آن بود که حضور ذرات تقویت کننده بین ورق ها با کاهش سطح تماس فلز-فلز و همچنین بدلیل تجمع و آگلومره شدن ذرات اثر منفی بر کیفیت و استحکام جوش دارد.

همانطور که در شکل ۴ نیز قابل مشاهده است با افزایش سیکل های نورد ضخامت لایه های شامل ذرات Fe_3O_4 کاهش یافته و در نتیجه ذرات در زمینه مسی پخش شده اند همچنین همانطور که از شکل ۴ استنباط می شود افزایش سیکل های ARB سبب پخش شدن یکنواخت تر ذرات Fe_3O_4 در زمینه مس شده است. واضح 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 کمتر 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^۵ است و پیشنهاد می کند که باید بر یک سد انرژی قبل از اینکه دو فلز با هم اتصال برقرار کنند، غلبه کرد. بالاتر از این مقدار استحکام پیوند ایجاد شده به سرعت افزایش می یابد و کمتر 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 [۱۰].



شکل (۵): منحنی تنش - کرنش کامپوزیت لایه ای $\text{Cu}/\text{Fe}_3\text{O}_4$ با در صد وزنی ۱٪ و ۲٪.



شکل (۶): مقایسه استحکام کششی نهایی در کامپوزیت لایه ای $\text{Cu}/\text{Fe}_3\text{O}_4$ و Cu ریز ساختار تولید شده به روش ARB

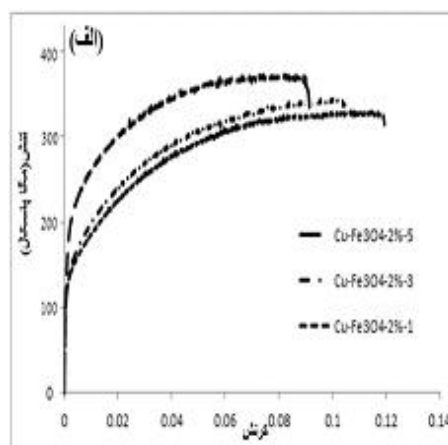
۳-۳ ریزسختی

برای اندازه گیری سختی نمونه‌ها از دستگاه سختی سنج ویکرز مدل Bohler با بار ۲۵ گرم و زمان توقف ۱۰ ثانیه استفاده گردید. صفحه جانبی نمونه‌ها در سیکل‌های مختلف فرآیند ARB تحت سختی سنجی قرار گرفت. همانطور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود و همانطور که انتظار می‌رود با افزایش پاس‌های فرایند سختی نمونه‌ها افزایش می‌یابد و نرخ افزایش سختی

مشاهده می‌شود حضور ذرات تقویت کننده Fe_3O_4 تاثیر بسزایی در افزایش استحکام داشته است. علاوه بر این مطابق شکل ۵ مشاهده می‌گردد، کاهش کرنش تدریجاً تا پاس پنجم نورد بوده که این تردی و کاهش کرنش نیز به سبب تاثیر کرنش سختی می‌باشد.

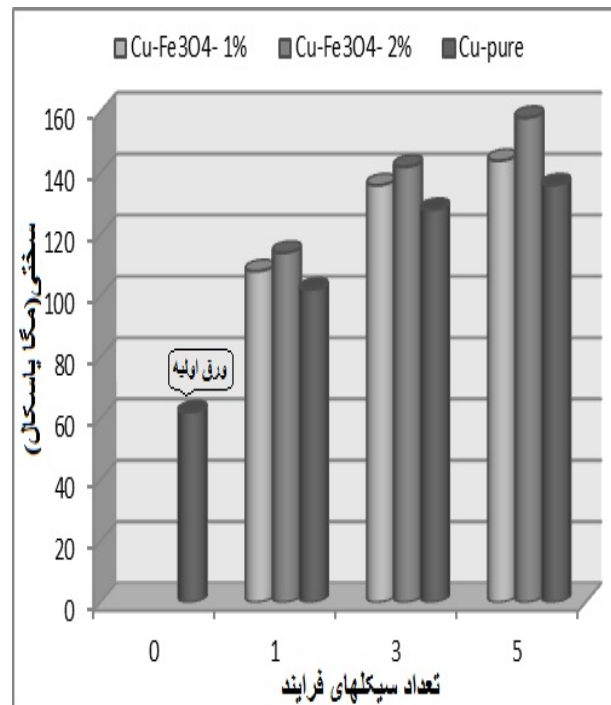
مطابق شکل ۶ با افزایش تعداد سیکل‌های نورد، استحکام کششی برای هر دو نمونه کامپوزیت افزایش می‌یابد. طبق نتایج تحقیقات گزارش شده توسط سیتو افزایش استحکام در فرایند نورد تجمعی شامل دو مکانیزم اصلی استحکام بخشی می‌باشد: الف) افزایش کرنش سختی ناشی از نابجایی‌ها و ب) بهبود و اصلاح اندازه دانه [۲-۳]

بطور کلی با توجه به شکل ۵ می‌توان دریافت که افزایش طول کامپوزیت لایه ای مس-اکسید آهن در طی مراحل ARB کمتر از مس خالص ARB شده می‌باشد که این می‌تواند به دلیل حضور ذرات Fe_3O_4 و نحوه پراکندگی آن در زمینه مس باشد. همچنین با افزایش تعداد سیکل‌های فرایند ARB نقش ذرات تقویت کننده Fe_3O_4 بدلیل پراکندگی یکنواخت افزایش می‌یابد که این تغییرات در مجموع سبب کاهش داکتیلیته در کامپوزیت مذکور می‌گردد.



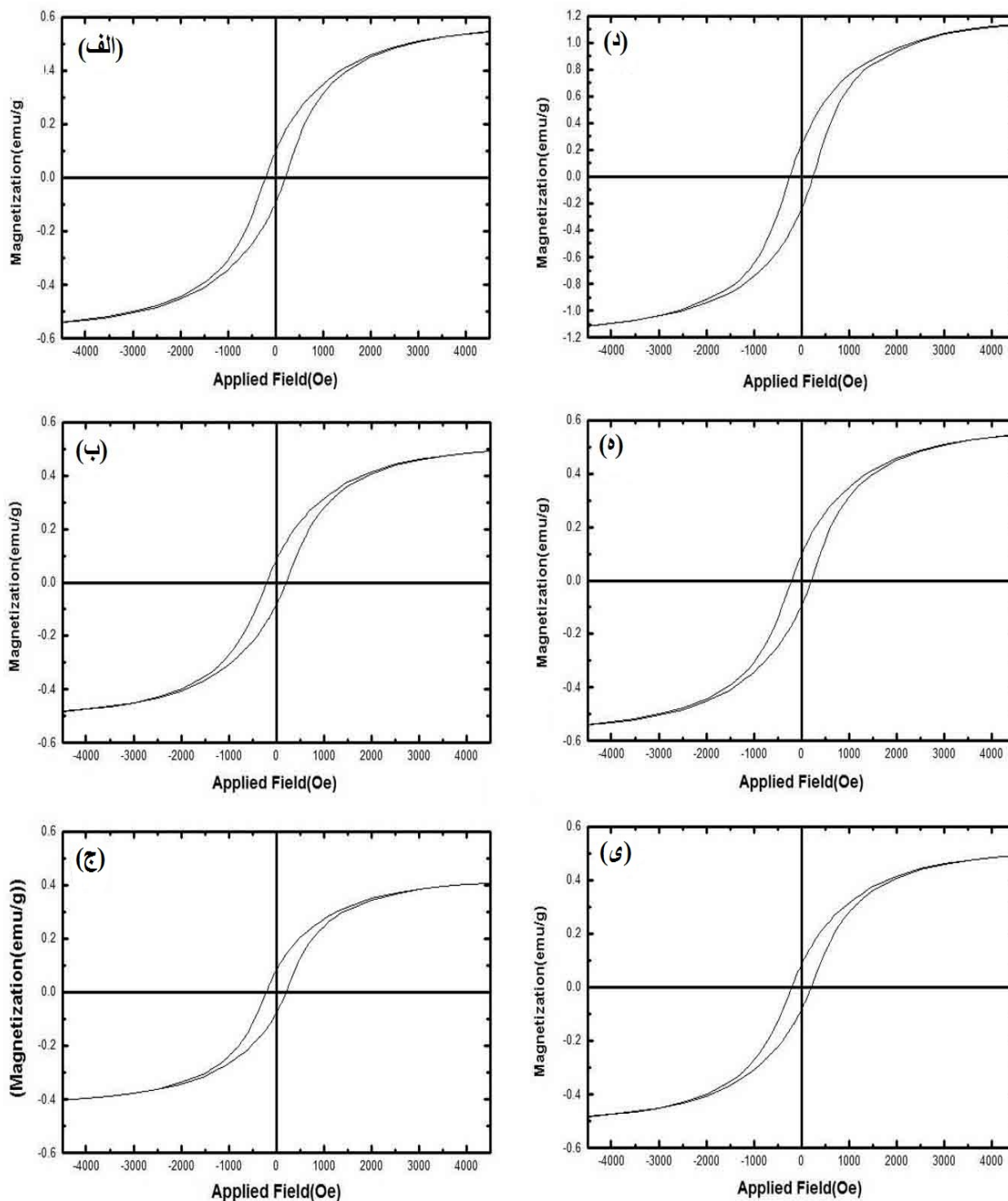
نمودار هیستریزس مربوط به کامپوزیت زمینه مسی همراه با ۱٪ و ۲٪ وزنی ذرات تقویت کننده Fe_3O_4 در طی سیکل های مختلف فرایند ARB در شکل ۸ نشان داده شده است. همانطور که در نمودارهای هیستریزس شکل ۸ می توان مشاهده نمود مقادیر پسماند مغناطیسی (M_R) نسبت به مقادیر نیروی وادارنگی مغناطیسی (H_C) بسیار کوچکتر بوده، همچنین حضور ذرات Fe_3O_4 سبب ایجاد حلقه مغناطیسی پهنی گردیده است. نمودار فوق نشانگر ایجاد ماده مغناطیس سخت یا دائمی می باشد. اینگونه مواد به وادارنگی مغناطیسی مقاوم می باشند و به سختی آهنربا می شوند؛ یعنی، حجم حوزه ها در آن ها به سختی تغییر می کند. این مواد حلقه مغناطیسی پهنی داشته، دارای مقادیر بالای نیروی وادارنگی مغناطیسی (H_C) بوده و در مقابل مغناطیس شدن مقاومت زیادی از خود نشان می دهند، همچنین دارای ظرفیت نفوذ اولیه پایین هستند. قابلیت نفوذپذیری یک ماده، معرف توانایی آهنربایی شدن آن ماده در حضور میدان خارجی می باشد. در این مواد، سمت گیری دو قطبی های مغناطیسی حوزه ها پس از حذف میدان خارجی به سهولت تغییر نمی کند [۱۲-۱۳]. به عبارت دیگر، پس از برداشتن میدان مغناطیسی خارجی، ماده ی مغناطیس سخت، خاصیت آهنربایی خود را حفظ می کند. به همین دلیل از این مواد برای ساختن آهنرباهای دائمی استفاده می کنند. با توجه به شکل ۹ با افزایش سیکل های فرایند ARB، پسماند مغناطیسی (M_R) و مقدار نیروی وادارنگی مغناطیسی (H_C) برای هر دو نمونه کامپوزیت Cu/Fe_3O_4 همراه با بهبود اندازه دانه افزایش می یابد. همچنین افزایش درصد حضور ذرات Fe_3O_4 در کامپوزیت سبب بهبود و افزایش مقادیر پسماند مغناطیسی و نیروی وادارنگی مغناطیسی می گردد که افزایش این دو عامل تاثیر بسزایی در خواص مغناطیسی مواد دارد.

در پاسهای اولیه بیشتر از پاسهای بعدی است زیرا عمده تجمع نابجایی ها و کار سختی در پاسهای اولیه رخ می دهد [۲-۳]. شکل ۷ افزایش ریزسختی با افزایش تعداد پاس های فرایند را نشان می دهد. 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 [۱۰]. 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 [۱۱].



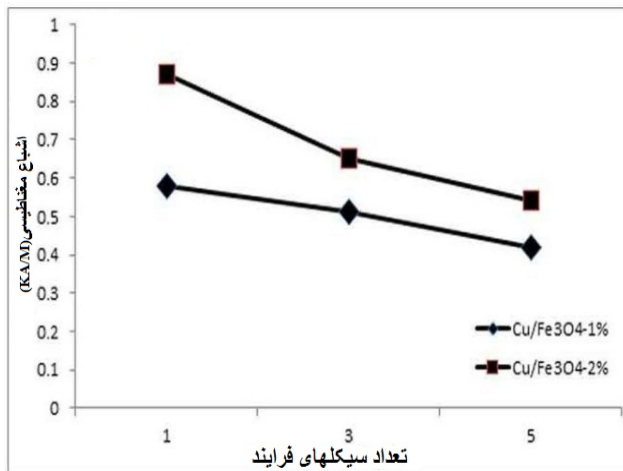
شکل (۷): مقایسه ریزسختی کامپوزیت های Cu/Fe_3O_4 و مس خالص ARB شده.

۳-۴ بررسی خواص مغناطیسی کامپوزیت های مس - اکسید آهن تولید شده به روش ARB



شکل (۸): تصاویر نمودار هیستریزس مراحل مختلف فرایند ARB (الف) پاس اول، (ب) پاس سوم، (ج) پاس پنجم با ۱٪ وزنی پودر Fe₃O₄-د) پاس اول، (ه) پاس سوم، (ی) پاس پنجم با ۲٪ وزنی پودر Fe₃O₄

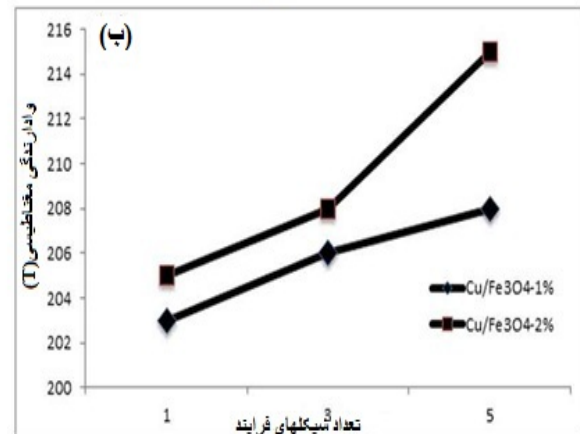
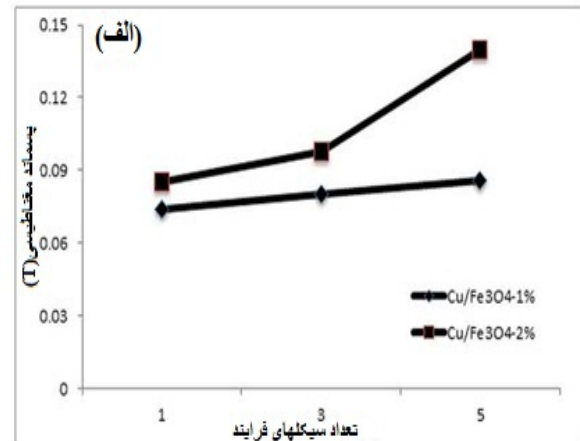
ایجاد کوپل نیرو بین دو قطبی های اتمی مجاور سبب انحراف دو قطبی ها و قرار گیری قطبها در جهت خلاف میدان نیروی خارجی می گردد، که بطور قطع دلیل آن می تواند افزایش عوامل انحرافی همچون افزایش نابجایی ها و افزایش مرز دانه ها باشد که منجر به کاهش اشباع مغناطیسی گردیده است [۱۴-۱۵]



شکل (۱۰): مقایسه اشباع مغناطیسی کامپوزیت مس با درصدهای مختلف ذرات Fe_3O_4 در طی سیکل‌های مختلف فرایند ARB

۵- نتیجه گیری

- ۱- با افزایش سیکل‌های فرایند ARB، یکنواختی توزیع ذرات و همچنین کیفیت اتصال میان ذرات Fe_3O_4 در ماتریس مس بهبود یافته است. کامپوزیت تولید شده در مرحله پنجم نشانگر توزیع یکنواخت و پیوند قوی میان ذرات اکسید آهن و ماتریس مس می باشد.
- ۲- استحکام کششی و سختی کامپوزیت با افزایش سیکل‌های فرایند ARB افزایش یافته است. همچنین نتایج نشانگر کاهش کرنش و داکتیلیته و افزایش تدریجی در طی مراحل ARB می باشد.
- ۳- نمودارهای هیستریزس برای تمام نمونه های کامپوزیت Cu/Fe_3O_4 نشانگر افزایش پسماند مغناطیسی و وادارندگی مغناطیسی همراه با افزایش ذرات Fe_3O_4 در طی سیکل‌های فرایند ARB می



شکل (۹): مقایسه خواص مغناطیسی کامپوزیت مس با درصدهای مختلف ذرات Fe_3O_4 در طی سیکل‌های مختلف فرایند ARB الف) منحنی پسماند مغناطیسی، ب) منحنی نیروی وادارندگی مغناطیسی.

بطوریکه می توان مشاهده نمود استفاده از ذرات Fe_3O_4 و افزایش درصد آن در کامپوزیت تاثیر موثر و چشمگیری در ایجاد ماده مغناطیس سخت یا دائمی در مس که فلزی دیا مغناطیس می باشد، داشته است. در کلیه مواد دو حالت مربوط به اشباع مغناطیسی وجود دارد که مربوط به نحوه قرار گیری قطبها بصورت هم جهت و یا در جهت خلاف میدان می باشد و زمانی به حداکثر مقدار خود می رسد که تمام دو قطبی های مغناطیسی در قطعه هم جهت با میدان خارجی قرار گیرند [۱۳-۱۴].

همانطور که در شکل ۱۰ مشاهده می شود افزایش سیکل های فرایند ARB سبب کاهش اشباع مغناطیسی گردیده است. زیرا

Application of Nanocrystalline Structures in Magnetic”, Materials, Physical B, Vol.75, pp. 275-281, 2000.

- [8] M. Michael, RD. Shull, LJ. Swartzendruber, LH. Bennett & R.E. Watson,” Magnetocaloric effect in super paramagnets”, Journal of Magnetic Material, Vol. 111, pp. 29-33, 1992.
- [9] M. Alizade, H. Paydar, “Fabrication of nanostructure Al/SiCp composite by accumulated roll bonding process” journal of Alloy and Compounds, Vol. 492, pp. 231-235, 2010.
- [10] M. Alizadeh, “Comparison of nanostructured Al/B₄C composite produced by ARB and Al/B₄C composite produced by RRB process”, Materials Science and Engineering A, Vol. 528, pp. 578–582, 2010.
- [11] X. Huang, N. Kamikawa & N. Hansen, “Strengthening mechanisms in nanostructured aluminum, Material Science and Engineering A, Vol. 483, pp. 102–104, 2008.
- [12] B.N. Mondal, A. Basumallick,” Magnetic behavior of Nano crystalline Cu–Ni–Co alloys prepared by mechanical alloying and isothermal annealing”, Journal of Alloys and Compounds, Vol. 457, pp. 10–14. 2008.
- [13] S. Kobayashi, H. Hikuchi & 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.
- [14] F. Keffer,” The magnetic properties of materials.” Scientific American, Vol. 207, pp. 222–234, 1967.
- [15] D. Jiles, “ Introduction to magnetism and magnetic materiales”, nelson Thornes, Cheltenham, UK, pp. 186-194, 1998.

باشد و به دلیل ماهیت دیا مغناطیس مس، سبب ایجاد ماده سخت مغناطیسی گردیده است. همچنین مقادیر اشباع مغناطیسی با افزایش تعداد لایه ها و افزایش تعداد سیکلهای فرایند ARB کاهش می یابد.

۶- مراجع

- [1] K. Sanusi, 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.
- [2] N. Tsuji, Y. Ito, Y. Saito & Y. Minamino, ”Strength and ductility of ultra-fine grained aluminum and iron produced by ARB and annealing”, Scripta Mater; Vol. 47, pp. 893–899, 2002.
- [3] Y. S. Kim, S. H. Kang & 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.
- [4] [S. C. Tjong, H. Chen, “Nano crystalline materials and coatings”, Materials Science and Engineering, Vol. 45, pp. 1-88, 2004.
- [5] K. M. Shorowordi, A. S. M. A. Haseeb & 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.
- [6] J. Mc. Keown, A. Misra, H. Kung, RG. Hoagland & M. Nastasi.” Microstructures and strength of Nano scale Cu–Ag multi-layers”, Scripta Mater, Vol. 46, pp.593–598, 2002.
- [7] R. Grössinger, R. Sato, D. Holzer & M. Dahlgren,” Properties, Benefits, and

5- Energy barrier theory

۷- پی نوشت

- 1- Hall petch
- 2- severe plastic deformation
- 3- Accumulated roll bonding
- 4- Vibrating sample magnetometer