

بررسی خواص مغناطیسی و الکتریکی نانوکامپوزیت $\text{Cu}_{30}\text{-Ni}_{70}/\text{CNT}$ تولید شده به روش آلیاژسازی مکانیکی

پریسا بخشایی^۱، ابوالقاسم عطائی^{۱*}، حسین عبدی‌زاده^۱

^۱دانشکده مهندسی متالورژی و مواد، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

تاریخ ثبت اولیه: ۹۳/۲/۶، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۹۳/۲/۱۵، تاریخ پذیرش قطعی: ۹۳/۲/۲۸

چکیده در این پژوهش آلیاژ $\text{Cu}_{30}\text{-Ni}_{70}$ با استفاده از فرآیند آلیاژسازی مکانیکی تولید شد. مقادیر مختلف از نانولوله‌های کربنی با استفاده از آسیای سیاره‌ای پراورزی به منظور تولید نانوکامپوزیت‌های $\text{Cu-Ni}/\text{CNT}$ در زمینه توزیع شدند. بررسی اثرات حضور نانولوله‌های کربنی در نانوکامپوزیت‌ها با استفاده از آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD)، میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، مغناطش سنج نمونه‌ی ارتعاشی (VSM) و روش استاندارد پروب چهار نقطه‌ای صورت گرفت. نتایج XRD نشان داد که آلیاژ همگن $\text{Cu}_{30}\text{-Ni}_{70}$ پس از ۵ ساعت آسیابکاری تولید شده است. بررسی میکروساختار نانوکامپوزیت‌ها با استفاده از تصاویر SEM، نقش موثر نانولوله‌ها در ریز شدن ساختار را نشان داد. ریز ترین ساختار در بالاترین درصد از تقویت کننده (۵٪wt) به دست آمد. نتایج آزمون مقاومت الکتریکی نشان دهنده‌ی افزایش هدایت الکتریکی نانوکامپوزیت‌ها در حضور CNT و تاییدی بر توزیع یکنواخت نانولوله‌های کربنی در زمینه‌ی آلیاژی بود. به علاوه توزیع نانولوله‌های کربنی در زمینه منجر به کاهش مغناطش اشباع و افزایش نیروی پسماندزای نانوکامپوزیت‌ها شد.

کلمات کلیدی: نانوکامپوزیت، نانولوله‌ی کربنی، آلیاژ مس-نیکل، آلیاژسازی مکانیکی.

Investigation of magnetic and electrical properties of $\text{Cu}_{30}\text{-Ni}_{70}/\text{CNT}$ nanocomposite produced by mechanical alloying

P. Bakhshaei¹, A. Ataie^{*1} and H. Abdizadeh¹

¹School of Metallurgy and Materials Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

Abstract In this study, $\text{Cu}_{30}\text{-Ni}_{70}$ alloy were synthesized by mechanical alloying. Different concentrations of carbon nanotubes were then distributed in the alloy to fabricate $\text{Cu-Ni}/\text{CNT}$ nanocomposites. X-ray diffraction, scanning electron microscopy, vibrating sample magnetometer and 4point probe standard techniques were used to investigate the characteristics of the samples. XRD results of the alloy sample revealed that, homogeneous $\text{Cu}_{30}\text{-Ni}_{70}$ alloy was formed after 5 h of milling. The SEM micrographs of the specimens showed that CNTs have a significant effect on structural refinement of the nanocomposites. The finest microstructure was obtained in the sample containing 5 wt% CNTs. Decreasing the electrical resistivity values of the nanocomposites due to increasing the CNT contents showed that CNTs have been uniformly distributed in the samples. More ever, the distribution of CNTs in the matrix decreases the saturation magnetization and increases the coercivity of the nanocomposites.

Keywords: Nanocomposites, Carbon nanotubes, Cu-Ni alloy, Mechanical alloying.

*عهده‌دار مکاتبات

نشانی: تهران، کارگر شمالی، بالاتر از جلال آل احمد، پردیس ۲ دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران، دانشکده مهندسی متالورژی و مواد

تلفن: ۰۲۱۸۲۰۸۴۰۸۴، دورنگار: ۰۲۱۸۸۰۰۶۰۷۶، پیام‌نگار: aataie@ut.ac.ir

۱- مقدمه

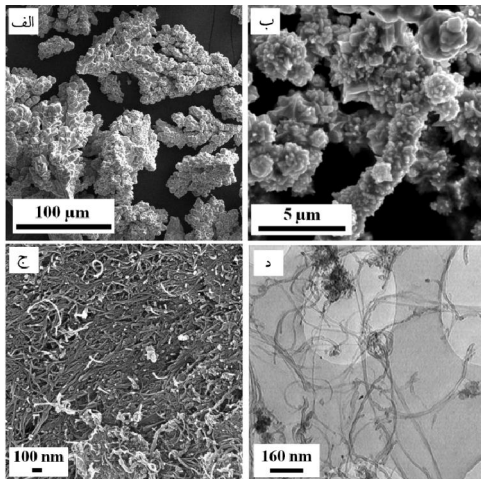
در سال‌های اخیر استفاده از نانولوله‌های کربنی در کامپوزیت‌های زمینه فلزی رونق بسیار زیادی یافته است. نانولوله‌های کربنی دارای خصوصیات فیزیکی و مکانیکی منحصر به فردی نظیر هدایت الکتریکی و حرارتی بالا و همچنین استحکام و مدول الاستیک بسیار زیاد می‌باشند. همین ویژگی‌ها منجر به انتخاب نانولوله‌های کربنی به عنوان یک تقویت‌کننده ایده‌آل در ساخت نانوکامپوزیت‌ها به منظور بهبود خواص در آن‌ها شده است [۳-۱]. مهمترین چالش پیش رو در توسعه نانوکامپوزیت‌های فلزی تقویت شده با نانولوله‌ها جلوگیری از خوشه‌ای شدن آن‌ها در فرآیندهای تولید، رسیدن به توزیع یکنواختی از آن‌ها در زمینه و ایجاد پیوندهای سطحی میان نانولوله‌های کربنی و زمینه فلزی می‌باشد [۶-۴]. خوشه‌ای شدن نانولوله‌های کربنی و تجمع آن‌ها در نواحی مختلف در زمینه نه تنها اثر مثبت در بهبود خواص نانوکامپوزیت تولید شده ندارد، بلکه ممکن است در بعضی موارد منجر به کاهش و افت خواص نیز بشود [۷]. بنابراین نکته‌ی بسیار مهم در موفق شمردن فرآیند مورد استفاده جهت تولید این نانوکامپوزیت‌ها، توانایی آن روش در توزیع یکنواخت نانولوله‌ها در زمینه می‌باشد. یکی از روش‌هایی که به‌طور گسترده در تولید این دسته از نانوکامپوزیت‌ها به منظور توزیع یکنواخت نانولوله‌های کربنی و همچنین ایجاد پیوند میان زمینه و نانولوله استفاده می‌شود، روش آسیاکاری مکانیکی است [۵، ۸، ۹]. تکرار فرآیندهای شکست و جوش سرد در آسیاکاری منجر به فرورفتن و توزیع نانولوله‌ها در ذرات زمینه می‌شود. مروری بر مطالعات پیشین نشان می‌دهد که علی‌رغم تلاش‌هایی که در سال‌های اخیر در راستای بررسی و بهبود خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های فلز- نانولوله صورت گرفته است، مطالعات کمی به منظور بررسی خواص فیزیکی، نظیر هدایت الکتریکی و به ویژه رفتار مغناطیسی این کامپوزیت‌ها در حضور نانولوله‌های کربنی، انجام شده است [۳]. با توجه به اهمیت ویژه آلیاژ مس-نیکل در حوزه‌های مختلف کاربردی [۱۰، ۱۱]، بررسی نقش نانولوله‌ی کربنی در رفتار مغناطیسی و همچنین الکتریکی این آلیاژ حائز اهمیت می‌باشد. بنابراین هدف از این پژوهش در مرحله‌ی نخست، سنتز آلیاژ $Cu_{30}-Ni_{70}$ با ابعاد

نانومتری و ترکیب مورد نظر با استفاده از فرآیند آسیاکاری می‌باشد. پس از آن نانولوله‌های کربنی با درصدهای مختلف به زمینه‌ی آلیاژی افزوده شده و نانوکامپوزیت‌های پودری توسط فرآیند آلیاژسازی تولید شده است. در پایان نقش نانولوله‌های کربنی در میکروساختار، خواص الکتریکی و مغناطیسی این نانوکامپوزیت‌ها بررسی شده است.

۲- نحوه آزمایش

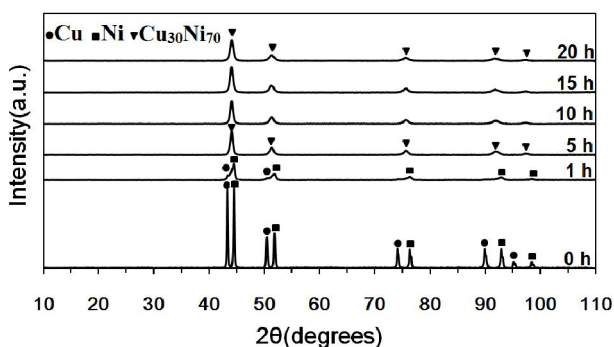
مواد اولیه مورد استفاده در این پژوهش شامل پودر مس و نیکل هر دو با خلوص ۹۹٪ و نانولوله‌ی کربنی چندجداره تهیه شده از پژوهشگاه صنعت نفت تهران با خلوص بیش از ۸۵٪ می‌باشند. نانولوله‌های کربنی دارای قطر متوسطی برابر با ۱۰-۲۰ نانومتر و طولی حدوداً برابر با ۱۰ میکرومتر می‌باشند. در گام نخست به منظور ساخت آلیاژ $Cu_{30}-Ni_{70}$ پودرهای مس و نیکل، با نسبت وزنی متناسب با آنچه به منظور تولید این آلیاژ مشخص مورد نیاز است، با یکدیگر مخلوط شده و در آسیای سیاره‌ای پرائرژ (PM2400) در دمای اتاق و تحت اتمسفر خنثی آرگون به مدت زمان ۲۰ ساعت تحت فرآیند آسیاکاری قرار گرفتند. سرعت محفظه‌های ۱۵۰ میلی لیتری آسیا در این فرآیند برابر با ۳۰۰ rpm و نسبت گلوله به پودر برابر با ۲۰:۱ انتخاب شد.

به منظور استفاده از نانولوله‌های کربنی، در ابتدا این نانولوله‌ها به مدت زمان ۱۵ دقیقه با استفاده از فرآیند آلتراسونیک در الکل پراکنده شدند. این مرحله به منظور جداکردن هرچه بیشتر بافت‌های درهم تنیده‌ی نانولوله‌های کربنی و بنابراین توزیع هرچه یکنواخت‌تر آن‌ها در زمینه فلزی می‌باشد. سپس محلول حاوی نانولوله‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای $50^{\circ}C$ قرار گرفت تا نانولوله‌ها کاملاً خشک شوند. پس از مشخص شدن زمان بهینه‌ی ساخت آلیاژ مورد نظر در گام نخست، به منظور تولید نانوکامپوزیت‌ها، مقادیر ۰/۵، ۲ و ۵ درصد وزنی از نانولوله‌های کربنی به پودر آلیاژی تولید شده پس از ۵ ساعت آسیاکاری، اضافه شد و به منظور توزیع نانولوله‌ها در زمینه‌ی آلیاژی و همچنین جلوگیری از آسیب دیدگی آن‌ها در زمان‌های طولانی آسیاکردن، فرآیند آسیاکاری برای مدت زمان ۵ ساعت تحت همان شرایط قبلی بر روی این



شکل ۱. تصاویر FESEM از پودرهای اولیه (الف) مس، (ب) نیکل و (ج) نانولوله‌ی کربنی، همراه با (د) تصویر TEM از نانولوله‌ها.

همان‌طور که مشاهده می‌شود در الگوی نمونه‌ی آسیا نشده پیک‌های مس و نیکل به طور واضح قابل مشاهده هستند اما با انجام فرایند آلیاژسازی مکانیکی این دو پیک به هم نزدیک شده و یک پیک واحد را تشکیل می‌دهند که نشان-دهنده انحلال متقابل این دو ماده در هم می‌باشد. باید توجه داشت که در این سیستم به دلیل اینکه اتم‌های نیکل اضافه شده می‌توانند به راحتی جایگزین اتم‌های مس شوند، در تمام گستره ترکیبی محلول جامد سریعاً در مراحل اولیه آسیاکاری تشکیل خواهد شد. همان‌طور که مشخص است، پیک‌های مربوط به $\text{Cu}_{30}\text{Ni}_{70}$ پس از ۵ ساعت آسیا کاری ظاهر شده‌اند. بررسی الگوهای فوق نشان می‌دهد که افزایش زمان آسیاکاری به ۱۰ و سپس ۲۰ ساعت تغییری در ترکیب آلیاژ تشکیل شده و موقعیت پیک‌ها ایجاد نکرده است، بنابراین آلیاژسازی مکانیکی در زمان‌های بالاتر ادامه نیافته است.



شکل ۲. الگوهای XRD نمونه پودری آسیا شده با نسبت وزنی ۳۰-۷۰ پس از ۱، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ ساعت در مقایسه با مخلوط پودری آسیا نشده.

مخلوط‌های پودری صورت گرفت. شناسایی فازهای شکل گرفته در پودرهای آسیا شده توسط آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD) با استفاده از دستگاه Philips PW-3170 با تابش $\text{Cu K}\alpha$ و طول موج 0.154056 نانومتر در محدوده زاویه‌ی 10° تا 110° درجه صورت گرفت. تغییرات میکروساختار نانوکامپوزیت‌های تولید شده با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل (Vega II Tescan) مجهز به دستگاه تحلیل سنج شدت انرژی طیف پرتوایکس (EDS) مدل (Samx) مورد بررسی قرار گرفت. به منظور سنجش خواص الکتریکی نمونه‌ها، نانوکامپوزیت‌های پودری با استفاده از فرآیند پرس سرد تحت فشار 500 MPa به دیسک‌هایی با قطر 10 mm و ارتفاع 3 mm تبدیل و مقادیر مقاومت الکتریکی توسط دستگاه 4point probe 196 sys DMM,2 به دست آمد. خواص مغناطیسی نانوکامپوزیت‌های تولید شده با استفاده از مغناطش سنج نمونه ارتعاشی (VSM) شرکت مغناطیس دقیق کویر کاشان تحت میدان اعمالی بیشینه 10 KOe و در دمای اتاق مورد بررسی قرار گرفت.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- آلیاژ $\text{Cu}_{30}\text{-Ni}_{70}$

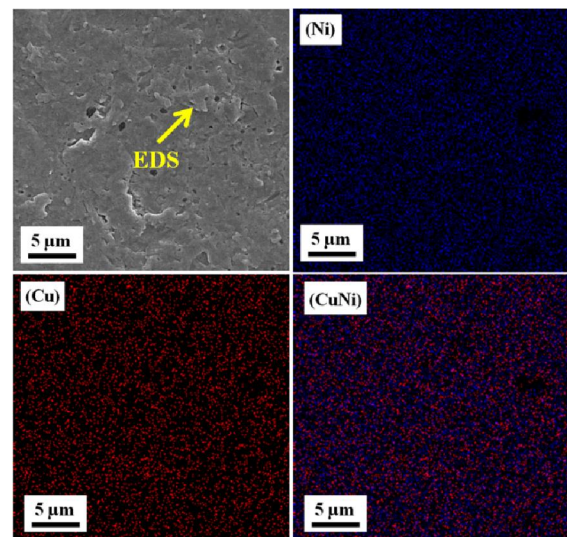
شکل (۱) تصویری از پودرهای اولیه مس، نیکل و نانولوله‌ی کربنی را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشخص است پودرهای تشکیل دهنده‌ی آلیاژ زمینه هر دو دارای ذرات گوشه دار می‌باشند. در رابطه با نانولوله‌های کربنی نیز همان‌طور که در شکل (۱-ج و د) مشخص است نیروهای واندروالس میان نانولوله‌ها موجب در هم تنیده شدن آن‌ها شده است.

شکل (۲) الگوهای XRD مخلوطی از پودرهای مس و نیکل را پس از زمان‌های مختلف آسیاکاری تا ۲۰ ساعت در مقایسه با مخلوط پودری آسیا نشده نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که برای جلوگیری از اکسیداسیون محصولات، عملیات آسیاکاری تحت اتمسفر آرگون صورت گرفته است.

۳-۲- مورفولوژی نانوکامپوزیت‌های Cu-Ni/CNT

شکل (۴) تصاویر SEM نانوکامپوزیت‌های حاوی مقادیر مختلف از نانولوله‌ی کربنی را در مقایسه با نمونه‌ی آلیاژی پس از ۱۰ ساعت آسیاکاری نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود حضور و افزایش مقدار نانولوله‌های کربنی تاثیر زیادی در کاهش اندازه‌ی آگلومره‌ها در نمونه‌های کامپوزیتی داشته است. با ورود نانولوله‌های کربنی در سیستم آسیاکاری، مخلوط پودری را می‌توان در دسته‌ی مخلوط‌های نرم- ترد رده‌بندی کرد. تحول میکروساختاری در این سیستم‌ها به این گونه است که در مراحل نخستین آسیاکاری، در اثر برخورد‌های گلوله - پودر - گلوله، ذرات پودر فاز نرم پهن و تخت و ذرات فاز شکننده، خرد و ریز می‌گردند. با ادامه فرآیند ذرات ترد در ذرات چکش خوار جذب و حبس می‌شوند و در طول مکان-های بین لایه‌ای به طور دقیق و با فاصله از هم قرار می‌گیرند [۱۳]. با آسیاکاری بیشتر، در ذرات پودر نرم کارسختی به وجود می‌آید و ذرات ریزتر خواهند شد. حضور نانولوله‌ی کربنی به عنوان فاز تردی که عملکرد روانکار را نیز دارد باعث کاهش فرآیند جوش سرد در سیستم مس- نیکل شده و بنابراین از به هم چسبیدن ذرات جلوگیری می‌کند. از طرف دیگر محبوس شدن نانولوله‌ها در ذرات زمینه باعث افزایش سختی و بالا رفتن نرخ شکنندگی ذرات خواهد شد که این عامل نیز منجر به ریز شدن ذرات می‌شود. افزون بر این، باید توجه داشت که با افزایش درصد CNT تعداد آن‌ها بیشتر شده و در نتیجه سطح کلی آن‌ها افزایش می‌یابد. این امر منجر به کاهش سطح تماس میان ذرات زمینه‌ی آلیاژی در فرآیند آسیاکاری می‌شود که به نوبه‌ی خود از آگلومره شدن ذرات زمینه به دلیل فرآیند جوش سرد جلوگیری می‌کند. ریز شدن ساختار در حضور CNT توسط سایر محققین نیز گزارش شده است [۱۴].

با توجه به اینکه بلورهای مس و نیکل هر دو دارای ساختار FCC و عدد اتمی مشابه هستند و پیک‌های این دو عنصر در الگوی XRD تنها حدود یک درجه با هم اختلاف دارند، پیک‌های مربوط به تمامی آلیاژهای تشکیل شده از این دو عنصر در نمودارهای XRD تنها در این فاصله‌ی یک درجه-ای تغییر موقعیت می‌دهند، به نحوی که با افزایش مقدار نیکل تنها یک شیفت جلورونده به سمت پیک مربوط به نیکل خالص، از خود نشان می‌دهند [۱۲]. به همین دلیل به منظور حصول اطمینان از تشکیل آلیاژ $Cu_{30}Ni_{70}$ پس از ۵ ساعت و نحوه‌ی توزیع دو عنصر مس و نیکل، تصویر SEM مربوط به نمونه ۵ ساعت آسیاکاری شده همراه با الگوی نقطه‌ای پراش پرتو ایکس تهیه شده از عناصر مس و نیکل در ناحیه عکس برداری، در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل ۳. تصویر SEM مربوط به نمونه‌ی ۱۰ ساعت آسیا شده همراه با آنالیز map برای دو عنصر مس و نیکل.

همچنین نتایج آنالیز شیمیایی نقطه‌ای از ناحیه مشخص شده در شکل (۳)، در جدول (۱) نشان داده شده است. حضور آهن در ترکیب به دلیل آلودگی‌های ناشی از تجهیزات فرآیند آلیاژسازی می‌باشد. این نتایج نیز تاییدی بر تشکیل آلیاژ $Cu_{30}Ni_{70}$ پس از ۵ ساعت آسیاکاری است.

جدول ۱. نتایج آنالیز شیمیایی نقطه‌ای از ناحیه مشخص شده در شکل ۳.

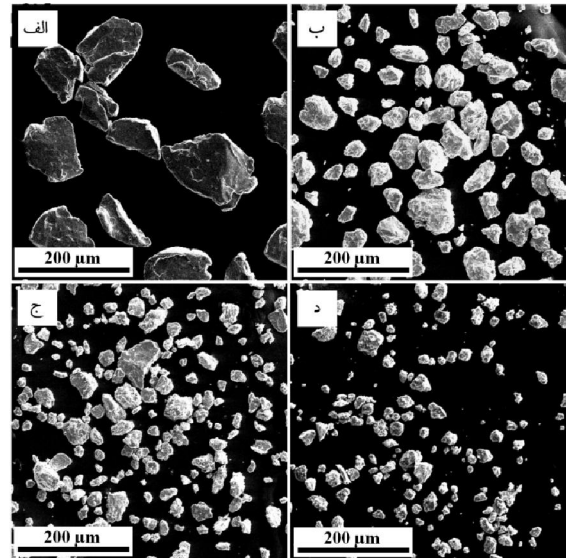
عنصر	مس	نیکل	آهن	اکسیژن
درصد وزنی (wt%)	۲۹/۵۹	۶۸/۳۷	۱/۷۷	۰/۲۶

کوچک زاویه را خواهند داد. این مرزها به تدریج توسعه یافته و مرزخانه‌های بزرگ زاویه را تشکیل می‌دهند [۱۵]. از آنجایی که مرزخانه‌ها به عنوان موانعی در مسیر هدایت الکتریکی به شمار می‌روند و منجر به کاهش آن خواهند شد، حضور نانولوله‌های کربنی با هدایت الکتریکی بالا در این مناطق باعث بالارفتن هدایت کلی نانوکامپوزیت‌ها شده است. نانولوله‌های کربنی به دلیل نداشتن نواحی پراکنده کننده الکترون‌ها، نظیر مرزخانه‌ها و ناخالصی‌ها، هدایت الکتریکی بالایی دارند [۳]. بنابراین، هر چند که با افزایش میزان نانولوله‌ی کربنی ساختار ریزتر شده و بنابراین مرزخانه‌ها افزایش یافته‌اند، اما به دلیل قرار گرفتن CNTها در مجاورت مرزها، مقاومت نانوکامپوزیت‌ها کاهش یافته است به نحوی که بر تاثیر ریزساختار و تنش‌های ایجاد شده در نتیجه‌ی حضور CNT غلبه کرده است. به علاوه افزایش هدایت الکتریکی در این نمونه‌ها خود نشان‌دهنده‌ی توزیع یکنواخت نانولوله‌ها در زمینه می‌باشد. زیرا خوشه‌های CNT منجر به کاهش هدایت الکتریکی خواهند شد [۴، ۱۶]. به نظر می‌رسد اشکال گوشه‌دار پودرهای زمینه می‌توانند به توزیع بهتر و همگن‌تر نانولوله‌ها کمک کنند.

۳-۴- خواص مغناطیسی نانوکامپوزیت‌های Cu-Ni/CNT

شکل (۵) نمایشگر نتایج آنالیز VSM نمونه‌ی آلیاژی تهیه شده پس از ۱۰ ساعت آسیاکاری می‌باشد. مطابق شکل، این ماده مغناطیسی دارای مغناطش اشباعی برابر با ۹ emu/g است. همچنین نیروی پسماندزدا و مغناطش پسماند این نمونه، مطابق شکل به ترتیب برابر با ۲۰ اورستد و ۰/۴ emu/g است. با توجه به نیروی پسماندزدا و مغناطش پسماند پایین این نمونه، آلیاژ سنتز شده در این پژوهش دارای طبیعت نرم مغناطیس است.

شیب نسبتاً تند این منحنی نشان‌دهنده تراوایی بالا و پاسخگویی مطلوب این ماده به میدان مغناطیسی است. این مساله در کنار مغناطش اشباع مطلوب، از جمله خصوصیات حائز اهمیت نانوذراتی به شمار می‌رود که در روش درمانی هایپرترمی کاربرد دارند. به علاوه با توجه به دیاگرام فازی برای آلیاژهای مس-نیکل دمای کوری آلیاژ $\text{Cu}_{30}\text{Ni}_{70}$ نیز در محدوده‌ی 45°C تا 50°C پیش بینی می‌شود، که دمای کوری



شکل ۴. تصاویر SEM از (الف) آلیاژ $\text{Cu}_{30}\text{Ni}_{70}$ پس از ۱۰ ساعت و نانوکامپوزیت‌های حاوی (ب) ۰/۵ wt٪، (ج) ۲ wt٪ و (د) ۵ wt٪ از نانولوله‌ی کربنی.

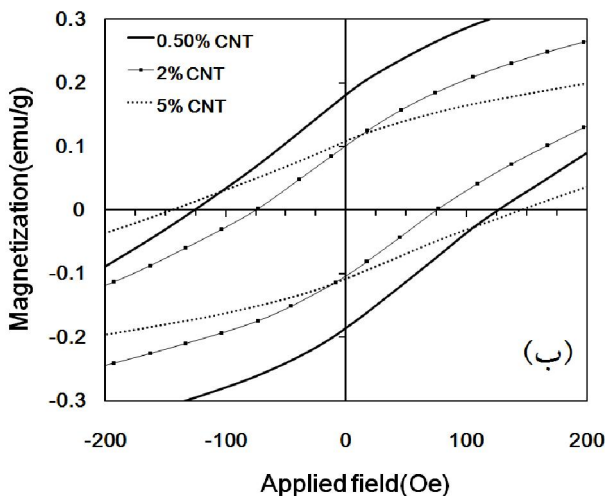
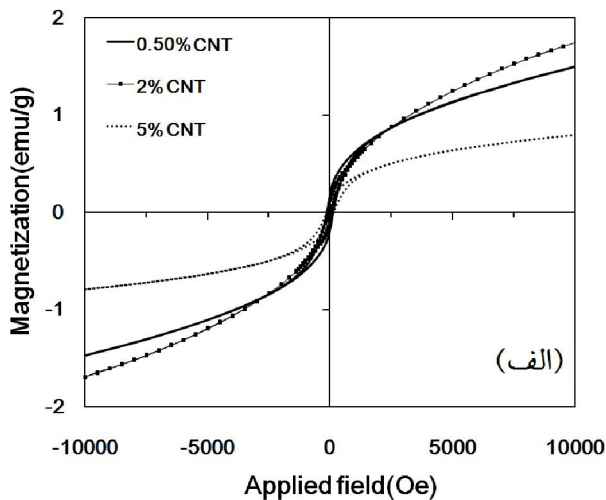
۳-۳- خواص الکتریکی نانوکامپوزیت‌های Cu-Ni/CNT

جدول (۲) مقادیر مقاومت الکتریکی نانوکامپوزیت‌های پودری را در مقایسه با آلیاژ بدون تقویت کننده نشان می‌دهد. جدول ۲. مقادیر مقاومت الکتریکی نانوکامپوزیت‌های حاوی ۰/۵، ۲ و ۵ درصد وزنی از نانولوله‌ی کربنی در مقایسه با آلیاژ $\text{Cu}_{30}\text{Ni}_{70}$.

مقاومت الکتریکی (Ωcm)	نمونه
$2/618 \times 10^{-3}$	آلیاژ $\text{Cu}_{30}\text{Ni}_{70}$
$2/194 \times 10^{-3}$	نانوکامپوزیت $\text{Cu}_{30}\text{Ni}_{70}/0.5\% \text{CNT}$
$1/635 \times 10^{-3}$	نانو کامپوزیت $\text{Cu}_{30}\text{Ni}_{70}/2\% \text{CNT}$
$1/226 \times 10^{-3}$	نانو کامپوزیت $\text{Cu}_{30}\text{Ni}_{70}/5\% \text{CNT}$

همان‌طور که مشخص است با افزایش مقادیر نانولوله‌ی کربنی در کامپوزیت‌ها، مقادیر مقاومت الکتریکی در آنها کاهش یافته است. دلیل این پدیده می‌تواند مرتبط با توزیع نانولوله‌های دارای هدایت الکتریکی بالا در زمینه می‌باشد. همان‌طور که می‌دانیم طی فرآیند آسیاکاری کرنش در سیستم افزایش می‌یابد و نابجایی‌های بسیار زیادی در زمینه تولید خواهند شد، از طرف دیگر حضور نانولوله‌های کربنی و افزایش مقدار آن در نانوکامپوزیت‌ها نیز خود از علل افزایش کرنش است. اما حرکت نابجایی‌های تولید شده، در فصل مشترک‌های زمینه و نانولوله با مانع روبرو می‌شود و بنابراین نابجایی‌ها در این مناطق تجمع خواهند کرد و تشکیل مرزهای

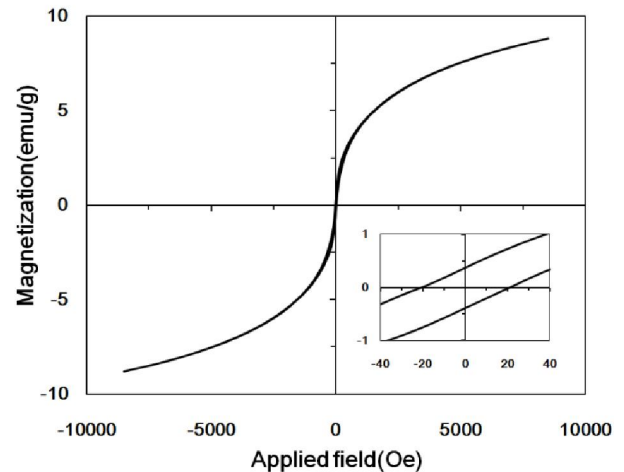
شوند. در رابطه با کاهش شدید مقادیر مغناطش اشباع در این نانوکامپوزیت‌ها می‌توان دلایل احتمالی زیر را مطرح دانست.



شکل ۶. (الف) حلقه‌های هیستریزس و (ب) تصویر بزرگنمایی شده میدان‌های پایین نانوکامپوزیت‌های حاوی ۰/۵، ۲ و ۵ درصد وزنی از نانولوله‌ی کربنی.

یکی از این دلایل ضعیف بودن خواص مغناطیسی نانولوله‌های کربنی است که اضافه شدن آن به زمینه باعث رقیق شدن خواص مغناطیسی نانوکامپوزیت‌ها شده است. اما با توجه به اینکه حتی در مقادیر کم تقویت‌کننده نیز شاهد افت در مقادیر مغناطش اشباع هستیم، دلیل اصلی می‌تواند مربوط به درگیر شدن اتم‌های نیکل در ساختار نانولوله‌های کربنی باشد. همان‌طور که می‌دانیم نانولوله‌های کربنی دارای ساختار ایده‌آل نبوده و دارای نقص‌هایی به ویژه به صورت جای خالی می‌باشند. به علاوه فرآیند آسیاکاری نیز می‌تواند منجر به آسیب دیدگی دیواره خارجی نانولوله‌های چندجداره و خروج اتم-

مناسب برای نانوذرات مورد استفاده در این روش درمانی است [۱۱]. لذا به نظر می‌رسد این آلیاژ پتانسیل به‌کارگیری در این روش درمانی را داشته باشد. البته این مطلب نیازمند بررسی‌های گسترده‌تری است.



شکل ۵. آنالیز VSM آلیاژ $\text{Cu}_{30}\text{Ni}_{70}$ پس از ۱۰ ساعت آسیاکاری تحت میدان ۱۰ کیلو اورستد همراه با تصویر بزرگ شده میدان‌های پایین.

شکل (۶) نتایج آنالیز VSM را برای نمونه‌های کامپوزیتی، با درصدهای مختلف CNT نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود افزودن نانولوله‌های کربنی به نحو چشمگیری باعث تغییر خواص مغناطیسی آلیاژ زمینه شده است. با توجه به حلقه‌ی هیستریزس این نانوکامپوزیت‌ها هر سه آن‌ها در دسته‌ی مواد مغناطیسی نرم رده‌بندی می‌شوند. به‌طور کلی مشخص است که نانولوله‌های کربنی باعث کاهش مغناطش اشباع و مغناطش پسماند و افزایش نیروی پسماندزدا می‌شوند. چنین تاثیری در پژوهش‌های قبلی نیز گزارش شده است [۱۷].

ریز شدن ساختار در حضور نانولوله‌های کربنی می‌تواند از دلایل اصلی افزایش نیروی پسماندزدا در نانوکامپوزیت‌ها باشد. به علاوه نانولوله‌های کربنی به عنوان فازهای تقویت‌کننده‌ای که دارای اشکال غیر ایزوتروپ هستند باعث افزایش کرنش‌های داخلی شده و می‌توانند مکانیزم مغناطیسی شدن را در نانوکامپوزیت‌ها تغییر دهند. نانولوله‌های توزیع شده در زمینه می‌توانند مانعی بر سر راه حرکت دیواره‌های حوزه‌های مغناطیسی باشند و با جلوگیری از توسعه‌ی حوزه‌های همراستا با میدان اعمالی منجر به افزایش نیروی پسماندزدا

مغناطش اشباع از ۹ emu/g به ۰/۸ emu/g کاهش و نیروی پسماندزدا از ۲۰ Oe به ۱۵۰ Oe افزایش یافته است.

۵. تغییرات خواص مغناطیسی در حضور نانولوله‌های کربنی وابستگی شدیدی به مقدار آن در نانوکامپوزیت‌ها نداشته و میزان تغییرات برای درصدهای مختلف از CNT تقریباً یکسان است.

سپاسگزاری

انجام تحقیق حاضر با استفاده از پشتیبانی مالی صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (شماره طرح: ۹۲۰۰۴۶۷۹) و ستاد ویژه توسعه فناوری نانو ممکن گردید. بدین وسیله نویسندگان این مقاله مراتب قدردانی و تشکر خود را اعلام می‌دارند.

مراجع

- Esawi. A. M. K., Farag. M. M., *Materials & Design*, 2007, 28, 2349-2401.
- Harris. P. J. F., *International Materials Reviews*, 2004, 49 (1), 31-43.
- Bakshi. S. R., Lahiri. D., Agarwal. A., *International Materials Reviews*, 2010, 55 (1), 41-64.
- Uddin. S. M., Mahmud. T., Wolf. Ch., Glanz. C., Kolaric. I., Volkmer. Ch., Holler. H., Wienecke. U., Roth. S., Fecht. H. J., *Composite Science and Technology*, 2010, 70, 2253-2257.
- Chu. K., Wu. Q., Jia. Ch., Liang. X., Nie. J., Tian. W., Gai. G., Guo. H., *Composite Science and Technology*, 2010, 70, 298-304.
- Li. H., Misra. A., Zhu. Y., Horita. Z., Koch. C. C., Holesinger. T. G., *Materials Science and Engineering A*, 2009, 523, 60-64.
- Kim. K. T., Cha. S. I., Hong. S. H., *Materials Science and Engineering A*, 2007, 449-451, 46-50.
- George. R., Kashyap. K. T., Rahul. R., Yamdagni. S., *Scripta Materialia*, 2005, 53, 1159-1163.
- Bahmanpour. H., Youssef. K. M., Scattergood. R. O., Koch. C. C., *Journal of Materials Science*, 2011, 46, 6316-6322.
- Mondal. B. N., Basumallick. A., Chattopadhyay. P. P., *Materials Chemistry and Physics*, 2008, 110, 490-493.
- Ban. I., Stergar. J., Drofénik. M., Ferk. G., Makovec. D., *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2011, 323, 2254-2258.
- Williams. E. H., *Physical Review*, 1931, 38, 828-832.
- Suryanarayana. C., Marcel Dekker, USA, New York, 2004.

های کربن از آن و ایجاد جای خالی شود. نتایج تحقیقات نشان داده است که اتم‌های نیکل می‌توانند جذب جاهای خالی موجود در ساختار نانولوله‌های شده و تشکیل پیوند دهند [۱۸]. درگیر شدن بخشی از اتم‌های نیکل در ساختار نانولوله‌های کربنی می‌تواند به نحو چشمگیری باعث تغییر ترکیب آلیاژ و لذا خواص مغناطیسی شود (شکل (۶).ب).

خواص مغناطیسی نانوکامپوزیت‌های تولید شده در مقایسه با آلیاژ بدون تقویت‌کننده، پس از ۱۰ ساعت آسیاکاری در جدول (۳) مقایسه شده است.

جدول ۳. خواص مغناطیسی نانوکامپوزیت‌های حاوی ۰/۵، ۲ و ۵ درصد وزنی از نانولوله‌ی کربنی در مقایسه با آلیاژ $Cu_{30}Ni_{70}$.

نمونه	مغناطش اشباع (emu/g)	نیروی پسماندزدا (Oe)
آلیاژ $Cu_{30}Ni_{70}$	۹	۲۰
نانوکامپوزیت $Cu_{30}Ni_{70}/0.5\% CNT$	۱/۵	۱۲۵
نانو کامپوزیت $Cu_{30}Ni_{70}/2\% CNT$	۱/۷	۷۵
نانو کامپوزیت $Cu_{30}Ni_{70}/5\% CNT$	۰/۸	۱۵۰

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش اثر افزودن نانولوله‌ی کربنی بر خواص مغناطیسی و الکتریکی نانوکامپوزیت $Cu_{30}-Ni_{70}/CNT$ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده را می‌توان به صورت زیر ارائه کرد:

- آلیاژ همگن $Cu_{30}-Ni_{70}$ پس از انجام فرآیند آسیاکاری به مدت زمان ۱۰ ساعت، با خواص مغناطیسی مطلوب تولید شد.
- حضور نانولوله‌های کربنی در نمونه‌های کامپوزیتی و افزایش درصد آن‌ها منجر به ریز شدن ساختار نانوکامپوزیت‌ها شده است.
- توزیع یکنواخت نانولوله‌های کربنی در زمینه‌ی آلیاژی باعث بهبود خواص الکتریکی نانوکامپوزیت‌ها شده است. کمترین مقدار مقاومت الکتریکی در نانوکامپوزیت حاوی بیشترین درصد از CNT (۵ wt%) به دست آمد.
- خواص مغناطیسی آلیاژ $Cu_{30}-Ni_{70}$ به نحو چشمگیری از حضور CNT متاثر شده است، به گونه‌ای که

14. Pérez-Bustamante. R., Pérez-Bustamante. F., Estrada-Guel. I., Santillán-Rodríguez. C. R., Matutes-Aquino. J. A., Herrera-Ramírez. J. M., Miki-Yoshida. M., Martínez-Sánchez. R., Powder Technology, 2011, 212, 390-396.
15. Li. H., Misra. A., Horita. Z., Koch. C. C., Mara. N. A., Dickerson. P. O., Zhu. Y., APPLIED PHYSICS LETTERS, 2009, 95, 071907.
16. Daoush. W. M., Lim. B. K., Mo. Ch. B., Nam. D. H., Hong. S. H., Materials Science and Engineering A, 2009, 513-514, 247-253.
17. Zheng. Zh., Xu. Bo., Huang. Lu., He. Li., Ni. X., Solid State Sciences, 2008, 10, 316-320.
18. Zhuang. H. L., Zheng. G. P., Soh. A. K., Computational Materials Science, 2008, 43, 823-828.