



بررسی خواص تریبولوژیکی نانو کامپوزیت $\text{CuNi-Al}_2\text{O}_3$ زینتر شده کمک مایکروویو

محمد باغانی^۱، محمود علی اف خضرای^۲، رضا پورصالحی^۳

^۱دانشگاه تربیت مدرس (دانشجوی کارشناسی ارشد، بخش مهندسی مواد، گروه خوردگی و حفاظت از مواد)

^۲دانشگاه تربیت مدرس (استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، بخش مهندسی مواد، گروه خوردگی و حفاظت از مواد)

^۳دانشگاه تربیت مدرس (استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، بخش مهندسی مواد، گروه نانو مواد)

چکیده

در این تحقیق تاثیر افزودن نانوذرات آلومینا بر روی خواص تریبولوژیکی نانو کامپوزیت مس نیکل (آلومینا) بررسی شد. به منظور آلیاژسازی مکانیکی و تعیین اثر افزودن نانوذرات آلومینا، مخلوط پودر مس و نیکل به همراه ۵، ۱۰ و ۲۰ درصد حجمی آلومینا در اتمسفر آرگون و به مدت ۳۰ ساعت تحت فرآیند آسیاب کاری مکانیکی قرار گرفت. برای بررسی تشکیل فازها، مخلوط پودر آسیاب شده تحت آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD) قرار گرفت. نتایج نشان داد پس از ۳۰ ساعت آلیاژسازی مکانیکی، محلول جامد مس نیکل تشکیل شده است. پودر آلیاژسازی شده با استفاده از دستگاه پرس هیدرولیک سرد با فشار ۲۵۰ مگاپاسکال فشرده گردید و فرآیند زینتر قرص ها در کوره مایکروویو با توان ۶۰۰ وات و در مدت زمان ۹۰ دقیقه انجام شد. مورفولوژی سطح مقطع نمونه های زینتر شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) بررسی شد. ریزساختار نمونه های زینتر شده متراکم و بدون ترک و منفذ بود. خواص تریبولوژیکی توسط آزمون سایش pin on disk بررسی شد که در نتیجه آن با افزایش مقدار نانوذرات آلومینا در نانو کامپوزیت، ضریب اصطکاک و نرخ کاهش جرم کاهش یافت. نتایج نشان داد افزودن نانوذرات آلومینا به زمینه ی محلول جامد مس نیکل باعث بهبود خواص سایشی می شود.

واژه های کلیدی: نانو کامپوزیت، زینتر مایکروویو، نانوذرات، تریبولوژیکی، آلیاژسازی مکانیکی.

مقدمه

مس به دلیل هدایت حرارتی و الکتریکی عالی، مقاومت خستگی و مقاومت خوردگی خوب کاربرد گسترده‌ای در وسایل الکتریکی و حرارتی دارد. اگرچه مس دارای استحکام مکانیکی ضعیف و ضریب انبساط حرارتی بالایی است [۱]. با افزودن عناصر آلیاژی حل شونده مانند مولیبدن، تیتانیم و نیکل و تولید محلول جامد، می‌توان استحکام را افزایش داد. با انتخاب عناصر آلیاژی با انحلال ناچیز در مس در حالت تعادلی، بدون تغییر در رسانایی الکتریکی، استحکام افزایش می‌یابد [۲]. آلیاژ محلول جامد مس نیکل از طریق فرآیند جانشینی تشکیل می‌شود و هردو فلز دارای ساختار شبکه fcc هستند. این آلیاژها به دلیل خواص مکانیکی و شیمیایی مطلوب کاربرد فراوانی در صنعت و تکنولوژی دارند. این آلیاژها در محیط‌های اسیدی، بازی، اکسیدی و احیایی دارای مقاومت به خوردگی بالایی هستند. چنانچه در محیطی قرار بگیرد که عامل احیا کننده در آن اکسیژن باشد مانند آب دریا، در فصل مشترک سطح آلیاژ و محیط خورنده لایه اکسیدی تشکیل می‌شود که بسیار چسبیده بود و به شکست موضعی و خوردگی حفره‌ای در محیط کلریدی حساس نیست، همچنین لایه اکسید سطحی با کاهش واکنش انحلال آندی از سطح قطعه در برابر خوردگی حفاظت می‌کند [۳].

آلیاژهای مس نیکل به روش‌های مختلفی تولید می‌شوند از قبیل آسیاب کاری مکانیکی [۴]، فرآیند ترمو-شیمیایی [۲]، روش‌های الکتروشیمیایی [۵] و [۶] و احیا در فاز مایع [۷] و [۸]. افزودن ذرات سخت آلومینا به آلیاژهای پایه مس به عنوان فاز تقویت کننده باعث تولید نانو کامپوزیت‌هایی با ویژگی‌های هدایت الکتریکی و حرارتی بالا، مقاومت سایشی مناسب، پایداری در برابر گرما و رفتار خستگی بهتر نسبت به مس تقویت نشده می‌شود. کامپوزیت‌های پایه مس تقویت شده با ذرات آلومینا چقرمگی شکست بالایی دارند که این چقرمگی شکست با کوچکتر شدن اندازه ذرات آلومینا در ساختار مس افزایش می‌یابد. گزارش شده است که این خواص به دلیل قفل شدن مرزخانه‌های زمینه مسی با ذرات آلومیناست. برخلاف روش‌های مذاب، روش آلیاژسازی مکانیکی، روش مطلوبی برای پخش یکنواخت ذرات در زمینه فلزی است [۹]. شکست و جوش ذرات طی فرآیند آلیاژسازی مکانیکی باعث آمیخته شدن مقدار زیادی فاز تقویت کننده در داخل هر ذره فلزی در حالت جامد و تشکیل ذرات کامپوزیتی می‌شود [۱۰]. Seung و همکارانش [۱۱] تولید نانو کامپوزیت مس آلومینا به روش مکانوشیمیایی از طریق آسیاب کاری مکانیکی پودرهای CuO_2 ، Cu و Al گزارش کردند. نانو کامپوزیت‌های مس آلومینا با درصدهای مختلف آلومینا با موفقیت تولید شد. پودر آسیاب کاری شده توسط پرس گرم در دمای ۸۰۰ درجه سانتی گراد متراکم شد. با افزایش درصد آلومینا، سختی نمونه‌های پرس گرم، از ۷۰ به ۱۰۳ را کول افزایش یافت. Durivault و همکارانش [۱۲] آلیاژسازی مس نیکل توسط آسیاب کاری مکانیکی را گزارش کردند. تحت شرایط بهینه آلیاژ مس نیکل با بازده ۹۵ درصد و مقدار ناخالصی آهن بسیار کم تهیه شد. از آنجایی که فعالیت الکتروکاتالیتی مس نسبت به نیکل بیشتر است، با افزایش مقدار مس در ترکیب آلیاژ، نرخ تجزیه نیترات در محلول قلیایی افزایش می‌یابد. Pabi و همکارانش [۱۳] تولید آلیاژ محلول جامد مس نیکل را گزارش کردند. در طول فرآیند آسیاب کاری مکانیکی فاز بین فلزی/محلول جامد توسط مکانیزم

شانزدهمین سمینار ملی مهندسی سطح

مخلوط سازی نفوذ پیوسته انجام شد. پس از ۲۰ ساعت آسیاب کاری، ذرات بلورین با اندازه درشت ۳۰ نانومتر تولید می شود که دلیل آن خاصیت چکش خواری محلول جامد fcc است.

خواص فیزیکی و مکانیکی نانوکامپوزیت به درصد حجمی و اندازه ی نانوذرات فاز تقویت کننده، یکنواختی توزیع این نانوذرات در شبکه فلزی و پیوند میان نانوذرات تقویت کننده و زمینه فلزی بستگی دارد [۱۴]. وجود نانوذرات تقویت کننده در نانوکامپوزیت ها ممکن است از طریق کوپل گالوانیک، خوردگی موضعی و یا خوردگی انتخابی بر روی رفتار خوردگی تاثیر بگذار [۱۵]. در این تحقیق تاثیر افزودن نانوذرات آلومینا بر ریزساختار، خواص تریبولژیکی و خوردگی نانوکامپوزیت مس نیکل (آلومینا) بررسی شد. مخلوط سازی پودر های مس و نیکل به همراه نانوپودر آلومینا در آسیاب گلوله ای ماهواره ای انجام شد و سپس توسط دستگاه پرس هیدرولیک قرص هایی تهیه و در کوره مایکروویو زینتر شدند. آزمون سایش pin on disk به منظور بررسی تاثیر افزودن نانوذرات آلومینا بر روی خواص تریبولژیکی انجام شد. همچنین از منحنی پلاریزاسیون برای بررسی خواص خوردگی نمونه های زینتر شده در محلول ۱ مولار NaOH استفاده شد.

مواد و روش تحقیق

پودرهای مس خالص با اندازه ۲۰ میکرومتر و نیکل خالص با اندازه ۴۵ میکرومتر و نانوپودر آلومینا با اندازه ۵۰ نانومتر، به عنوان مواد اولیه برای آلیاژسازی و تهیه نانوکامپوزیت استفاده شد. مخلوط پودری با ترکیب های Cu-30Ni، Cu-30Ni-5Al₂O₃ و Cu-30Ni-10Al₂O₃ تحت فرآیند آلیاژسازی مکانیکی قرار گرفتند. فرآیند آلیاژسازی مکانیکی در دستگاه آسیاب گلوله ای ماهواره ای به مدت ۳۰ ساعت در دمای اتاق انجام شد. به منظور جلوگیری از اکسیداسیون مخلوط پودر، فرآیند آلیاژسازی مکانیکی تحت گاز آرگون انجام شد. نسبت گلوله به پودر ۱:۱۰ و سرعت خرجش محفظه ۳۰۰ دور بر دقیقه بود. پودر آلیاژسازی مکانیکی شده توسط آزمون تفرق اشعه ایکس (XRD) توسط دستگاه X'Pert MPD Philips با پرتو Cok α با طول موج ۱/۷۸۹ آنگستروم مشخصه یابی شد. مورفولوژی پودرها توسط میکروسکوپ الکترونی روشی (SEM) Philips XL30 و مورفولوژی نانوپودر آلومینا توسط میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) Zeiss EMIOIC بررسی شد (شکل ۱ ج).

پودر آلیاژسازی مکانیکی شده با استفاده از دستگاه پرس هیدرولیک سرد با فشار ۳۵۰ مگاپاسکال و قالبی به قطر ۲۵ میلی متر پرس و قرص هایی با ضخامت ۳ میلی متر تهیه شد. قرص ها در کوره مایکروویو ۲,۴۵ GHz با توان ۶۰۰ وات و به مدت زمان ۹۰ دقیقه زینتر شدند. ریزساختار سطح مقطع نمونه های زینتر شده توسط میکروسکوپ الکترونی روشی (SEM Philips XL30) بررسی شد. ریزسختی نمونه ها توسط آزمون ریزسختی سنجی با استفاده از فرورونده ویکرز در بار ۱۰۰ گرمی و زمان توقف ۵ ثانیه اندازه گیری شد. جهت بررسی خواص تریبولژیکی نمونه ها از دستگاه سایش پین روی دیسک (ASTM G99 standard) در

دمای اتاق و در حالت خشک استفاده شد. در این آزمون از پین ساینده از جنس اکسید آلومینیم استفاده گردید. طول مسیر سایش ۱۴۰ متر، بار قائم ۲ نیوتن و سرعت سایش ۱۰۰ دور بر دقیقه بود.

نتایج و بحث

شکل ۲ الگوی پراش پرتو ایکس مخلوط پودر مس ۷۰- نیکل ۳۰ را پس از آسیاب کاری مکانیکی نشان می دهد. ملاحظه می گردد که پس از ۳۰ ساعت آسیاب کاری، پیک های مربوط به نیکل و مس حذف شده و پیک های جدیدی ظاهر می شود که منطبق با پیک های اصلی فاز $Cu_{0.81}Ni_{0.19}$ می باشد. حین فرآیند آسیاب کاری مکانیکی اتم های نیکل به تدریج وارد ساختار مس شده و در نتیجه پیک های نیکل حذف شده و پارامتر شبکه مس افزایش می یابد که منجر به جایجایی پیک های مس به ۲ کمتر یعنی به سمت چپ می شود. با مقایسه پیک صفحه (۱۱۱) مس در ۱ و ۳۰ ساعت آسیاب کاری مشخص است که ۲ از $50/727$ درجه به $50/454$ درجه انتقال یافته است که تاییدی بر نفوذ نیکل به درون ساختار مس است. بنابراین پس از ۳۰ ساعت آسیاب کاری مکانیکی محلول جامد مس (نیکل) تشکیل شده است [۱۶]. پهن شدگی پیک ها ناشی از کاهش اندازه دانه و افزایش کرنش شبکه می باشد [۱۷]. در مواد کریستالی، پهنای پیک پراش پرتو ایکس با کاهش ضخامت صفحات کریستالی افزایش می یابد. در فرآیند آسیاب کاری مکانیکی، آلیاژ سازی در ابعاد اتمی رخ می دهد که باعث تشکیل محلول های جامد، ترکیبات بین فلزی و حتی فازهای آمورف می گردد که این مسئله باعث کاهش شدت پیکها می شود. افزون بر این، در این مرحله، فاصله بین لایه ها به قدری کاهش می یابد که منجر به کاهش شدت پیک ها در الگوی پراش اشعه می شود [۱۸].

تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی ذرات پودر پس از آسیاب کاری مکانیکی در شکل ۳ نشان داده شده است. تفاوت در مورفولوژی و اندازه دانه ی پودرها قبل و بعد از آسیاب کاری به وضوح مشاهده می شود. پس از ۳۰ ساعت آلیاژسازی مکانیکی، شکل ذرات ورقه ای است و توزیعی از ذرات کوچک در حدود ۳۰ میکرومتر می باشد [۲۰]. کاهش اندازه ذرات پودر به دلیل نفوذ ذرات سخت نیکل به درون ذرات نرم مس در طول فرآیند آسیاب کاری است. رسیدن به حالت تعادل بین جوش سرد و شکستن ذرات پودر باعث جلوگیری از فرآیند آگلومره شدن شده است [۲۱].

شکل ۴ ریزساختار سطح مقطع نمونه های زینتر شده را پس از اچ کردن نشان می دهد. نخستین نکته که باید به آن اشاره کرد این است که وجود نانو ذرات آلومینا تغییرات ساختاری ایجاد نمی کند و زیرساختار و اندازه دانه بندی هر سه نمونه یکنواخت و شبیه هم است. حرارت دهی مواد توسط مایکروویو بستگی به خواص دی الکتریک آن ماده دارد. مس در محدوده ی وسیعی از دما و فرکانس دارای تلفات دی الکتریک بالایی است که منجر می شود جذب انرژی مایکروویو خوبی داشته باشد. مکانیزم زینتر پودر متراکم فلزات به کمک مایکروویو نفوذ مرزدانه ای است [۲۲]. در ریزساختار سطح مقطع، هیچگونه ترک و تخلخلی مشاهده نمی شود که حاکی از موثر بودن فرآیند زینتر توسط مایکروویو می باشد.

شانزدهمین سمینار ملی مهندسی سطح

رفتار سایشی نانوکامپوزیت ها از طریق رسم نمودار ضریب سایش و میزان کاهش وزن نمونه ها حین فرآیند سایش و بررسی تصاویر میکروسکوپی سطوح سایش مطالعه گردید. شکل ۵ نمودار ضریب سایش برای نمونه های با درصد نانوذرات مختلف را نشان می دهد. همانگونه که مشاهده می شود با افزایش درصد نانوذرات آلومینا در نانوکامپوزیت، میزان ضریب سایش کاهش می یابد [۲۳]. برای نمونه ی آلیاژ مس نیکل فاقد نانوذرات آلومینا مقدار ضریب سایش ۰,۴ و برای نمونه ی آلیاژ مس نیکل حاوی ۵ درصد نانوذرات آلومینا ۰,۳۵ و برای آلیاژ مس نیکل حاوی ۱۰ درصد نانوذرات آلومینا ۰,۳ می باشد. برای تحلیل نمودار ضریب سایش لازم است تا تصاویر مربوط به سطح سایش و مکانیزم غالب بر فرآیند سایش بررسی شود.

شکل ۶ تصاویر میکروسکوپ الکترون عبوری سطوح سایش را نشان می دهد. در تصویر ۶ الف که مربوط به نمونه مس نیکل فاقد نانوذرات می باشد، شیارها و کانال های موازی با جهت سایش مشاهده می شود، بنابراین مکانیزم غالب بر این نمونه سایش چسبان می باشد [۲۴]. به همین دلیل ضریب سایش این نمونه در نمودار شکل ۵ بیشتر از سایر نمونه ها است. تصویر ۶ ج که مربوط به مسیر سایش نمونه مس نیکل دارای ۱۰ درصد نانوذرات آلومینا می باشد، به دلیل کنده شدگی های سطح نمونه مکانیزم سایش خراشان است. سایش خراشان هنگامی رخ می دهد که برآمدگی های یک سطح سخت و یا ذرات سخت موجود در بین دو سطح بر روی سطح نرم تر لغزیده و موجب آسیب آن می گردد. ضریب سایش در سایش با مکانیزم خراشان کمتر از سایش چسبان است که در نمودار شکل ۵ هم مشاهده می شود که این نمونه دارای کمترین ضریب سایش است. نمونه ۶ ب مخلوطی از سایش با مکانیزم چسبان و خراشان است و به همین دلیل ضریب سایش در این نمونه بیشتر از مس نیکل دارای ده درصد آلومینا و کمتر از مس نیکل فاقد آلومینا می باشد. بنابراین وجود نانوذرات آلومینا در زمینه فلزی (محلول جامد مس نیکل) می تواند منجر به تغییر مکانیزم سایش از حالت چسبان به خراشان شود.

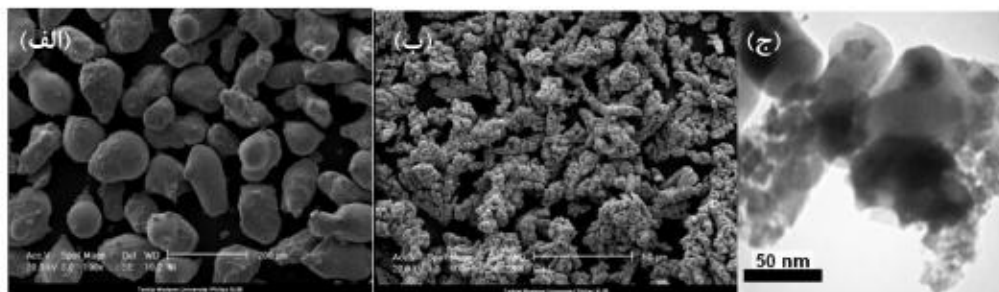
نتایج حاصل از آزمون سایش پس از اندازه گیری کاهش جرم در هر مرحله، ثبت شد. شکل ۷ نمودار نقطه ای کاهش جرم در مسافت های لغزش مختلف برای نمونه های مختلف می باشد. با افزایش درصد نانوذرات آلومینا در نانوکامپوزیت، میزان کاهش جرم در آزمون سایش کاهش می یابد. به عبارتی حضور نانوذرات آلومینا باعث بهبود خواص سایشی نانوکامپوزیت می شوند [۲۵].

نتیجه گیری

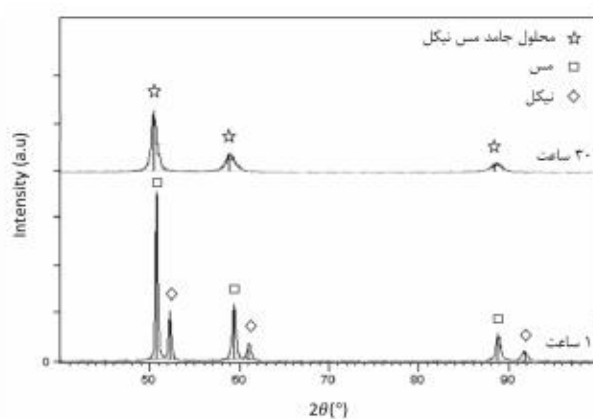
- (۱) پس از ۳۰ ساعت آسیاب کاری مکانیکی، اتم های نیکل به تدریج وارد ساختار مس شده و محلول جامد مس (نیکل) تشکیل شده است.
- (۲) با افزایش درصد نانوذرات آلومینا در نانوکامپوزیت، میزان ضریب سایش و نرخ کاهش جرم کاهش می یابد.
- (۳) با افزایش درصد نانوذرات آلومینا در زمینه فلزی (محلول جامد مس نیکل) مکانیزم سایش از حالت چسبان به خراشان تغییر می کند.

1. Davis, Joseph R., ed. Copper and copper alloys. ASM international, 2001.
2. Suryanarayana, Challapalli. "Mechanical alloying and milling." *Progress in materials science* 46.1 (2001): 1-184.
3. Jaron, A., and Z. Zurek. "New porous Fe₆₄/Ni₃₆ and Ni₇₀/Cu₃₀ electrodes for hydrogen evolution—Production and properties." *Solid State Ionics* 181.21 (2010): 976-981.
4. Durivault, Laurence, et al. "Cu–Ni materials prepared by mechanical milling: their properties and electrocatalytic activity towards nitrate reduction in alkaline medium." *Journal of Alloys and Compounds* 432.1 (2007): 323-332.
5. Ghosh, S. K., et al. "Nanocrystalline Ni–Cu alloy plating by pulse electrolysis." *Surface and Coatings Technology* 126.1 (2000): 48-63.
6. Glibin, V. P., B. V. Kuznetsov, and T. N. Vorobyova. "Investigation of the thermodynamic properties of Cu–Ni alloys obtained by electrodeposition or by casting." *Journal of alloys and compounds* 386.1 (2005): 139-143.
7. Rao, G. Ranga, Braja Gopal Mishra, and H. R. Sahu. "Synthesis of CuO, Cu and CuNi alloy particles by solution combustion using carbonylhydrazide and N-tertiarybutoxy-carbonylpiperazine fuels." *Materials Letters* 58.27 (2004): 3523-3527.
8. Chatterjee, Jhunu, et al. "Synthesis and characterization of polymer encapsulated Cu–Ni magnetic nanoparticles for hyperthermia applications." *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 293.1 (2005): 303-309.
9. Ying, D. Y., and D. L. Zhang. "Processing of Cu–Al₂O₃ metal matrix nanocomposite materials by using high energy ball milling." *Materials Science and Engineering: A* 286.1 (2000): 152-156.
10. Gao, Guozhong. "Nanostructures and nanomaterials: synthesis, properties and applications." (2004): 433.
11. Hwang, Seung J., and Jin-hyung Lee. "Mechanochemical synthesis of Cu–Al₂O₃ nanocomposites." *Materials Science and Engineering: A* 405.1 (2005): 140-146.
12. Durivault, Laurence, et al. "Cu–Ni materials prepared by mechanical milling: their properties and electrocatalytic activity towards nitrate reduction in alkaline medium." *Journal of Alloys and Compounds* 432.1 (2007): 323-332.
13. Pabi, S. K., et al. "Nanocrystalline phases in Cu–Ni, Cu–Zn and Ni–Al systems by mechanical alloying." *Nanostructured Materials* 9.1 (1997): 149-152.
14. Besterci, Michal, et al. "The mechanism of the failure of the dispersion-strengthened Cu–Al₂O₃ nanosystem." *Journal of materials science* 45.15 (2010): 4073-4077.
15. LH Hihara, RM. Latanision, Corrosion of metal matrix composites, *Int Mater Rev*, 39 (1994): 245–264
16. B.N. Mondal, A. Basumallick, P.P. Chattopadhyay, *J. Magn. Magn. Mater.* 309 (2007): 290–294.
17. Callity, B. D., *Elements of X-ray diffraction*, 2nd ed., Menlo park, 1978.
18. J.B. Fogagnolo, F. Velasco, M.H. Robert, and J.M. Torralba, "Effect of mechanical alloying on the morphology, microstructure and properties of aluminums matrix composite powders", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 342, pp 131-143, 2003.
19. C. Suryanarayana, "Mechanical Alloying and Milling", *Progress in Materials Science*, Vol. 46, 2001.
20. Durivault, Laurence, et al. "Cu–Ni materials prepared by mechanical milling: their properties and electrocatalytic activity towards nitrate reduction in alkaline medium." *Journal of Alloys and Compounds* 432.1 (2007): 323-332.
21. Farahbakhsh, Iman, et al. "Structural Evolution of the Cu–Ni Solid Solution Formed by Ball Mechanical Alloying Treatment (BMAT)." *Materials Science Forum*. Vol. 673. 2011.

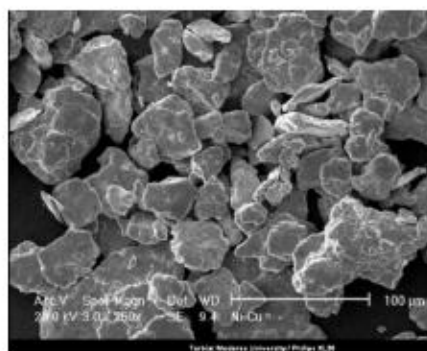
22. Mishra, Radha Raman, S. Rajesha, and A. K. Sharma. "Microwave Sintering of Pure Metal Powders—A Review."
23. Helle, S., et al. "Mechanically Alloyed Cu-Ni-Fe-O Based Materials as Oxygen-Evolving Anodes for Aluminum Electrolysis." *Journal of The Electrochemical Society* 159.4 (2012): E62-E68.
24. Goupil, Gregory, et al. "Consolidation of mechanically alloyed Cu-Ni-Fe material by spark plasma sintering and evaluation as inert anode for aluminum electrolysis." *Journal of Alloys and Compounds* 580 (2013): 256-261.
25. Raju, L. Suvarna, and A. Kumar. "A Novel Approach for Fabrication of Cu-Al $2\ 0\ 3$ Surface Composites by Friction Stir Processing." *Procedia Materials Science* 5 (2014): 434-443.



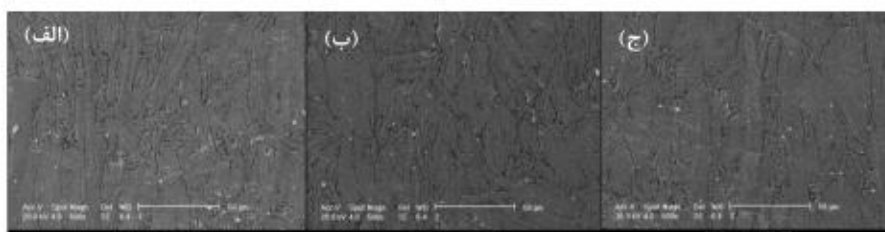
شکل ۱: تصویر میکروسکوپ الکترونی روشی ذرات (الف) پودر نیکل و (ب) مس و (ج) تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری نانوذرات آلومینا قبل از آسیاب کاری مکانیکی



شکل ۲: الگوی پراش اشعه ایکس مخلوط پودر مس ۷۰-نیکل ۳۰ پس از ۱ و ۳۰ ساعت آسیاب کاری

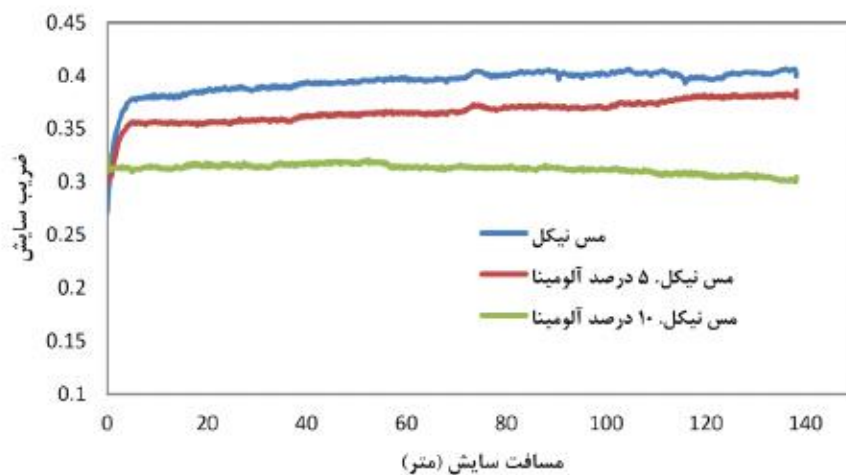


شکل ۳: مورفولوژی مخلوط پودر مس نیکل پس از ۳۰ ساعت آسیاب کاری

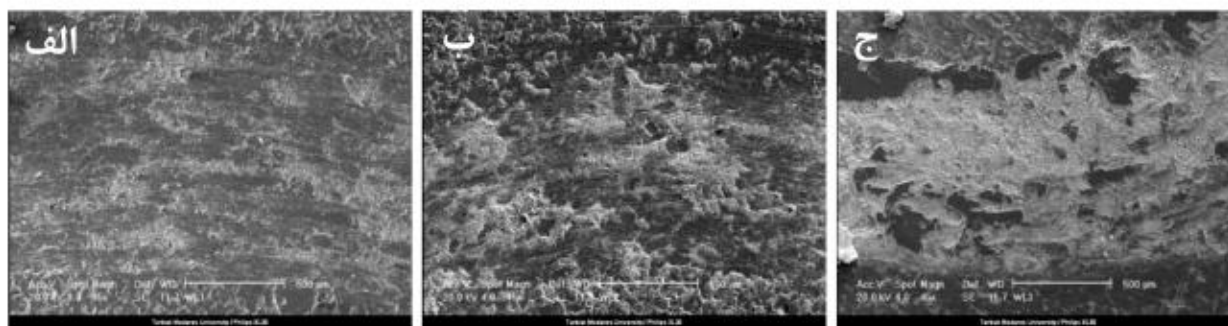


شکل ۴: ریزساختار سطح مقطع نانوکامپوزیت های زیرتر شده مس نیکل (الف)، مس نیکل ۵ درصد آلومینا (ب) و مس نیکل ۱۰ درصد آلومینا (ج)

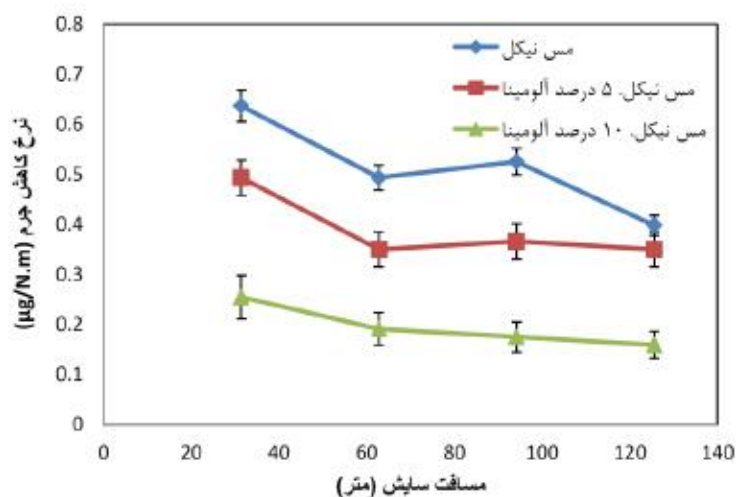
شانزدهمین سمینار ملی مهندسی سطح



شکل ۵: نمودار مربوط به ضریب سایش برای نمونه های با درصد نانوذرات مختلف



شکل ۶: تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی سطح سایش آلیاژ مس نیکل (الف)، مس نیکل ۵ درصد آلومینا (ب) و مس نیکل ۱۰ درصد آلومینا (ج)



شکل ۷: نمودار کاهش جرم بر حسب مسافت سایش