

بررسی خواص فیزیکی و مکانیکی نانو کامپوزیت مس / اکسید کروم تولید شده به روش آلیاژسازی مکانیکی و اکسیداسیون داخلی

فهیمة شجاعی پور^{۱*}، پروین عباچی^۲، کاظم پورآذرنگ^۳ و امیرحسین مغنیان^۱

۱- کارشناس ارشد، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی و علم مواد، تهران، ایران

۲- دانشیار، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی و علم مواد، تهران، ایران

۳- استاد، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی و علم مواد، تهران، ایران

*f.shojaepour@gmail.com

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۱۲/۲۶، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۰۳/۲۷)

چکیده

کامپوزیت‌های پایه مس تقویت شده با ذرات اکسید کروم به سبب هدایت الکتریکی و گرمایی مناسب و استحکام در دمای بالا، ماده مناسب برای کنتاکت‌های الکتریکی است. در این پژوهش، این کامپوزیت‌ها به روش آلیاژسازی مکانیکی و اکسیداسیون داخلی تهیه شده است. به منظور تخمین زمان و نسبت گلوله به پودر بهینه در آلیاژسازی مکانیکی مخلوط پودرهای مس و کروم و اطمینان از اکسیداسیون داخلی کروم پس از زینتر، آنالیز الگوی پراش پرتو X نمونه‌های پودری و بررسی مورفولوژی ذرات با میکروسکوپ الکترونی، به کار گرفته شد. با توجه به نتایج، خواص فیزیکی کامپوزیت مانند چگالی و مقاومت الکتریکی ویژه پس از اکسیداسیون داخلی، نسبت به محلول جامد مس- کروم تغییر می‌کند. بر اساس تست سایش پین بر روی دیسک^۱ با افزایش مسافت لغزش، کاهش حجم نمونه افزایش می‌یابد و از تصاویر میکروسکوپ الکترونی سطوح سایش برمی‌آید که مکانیزم‌های غالب سایش، سایا، تورقی و اکسیداسیونی است.

واژه‌های کلیدی:

نانو کامپوزیت مس / اکسید کروم، اکسیداسیون داخلی، مقاومت الکتریکی ویژه، آزمون سایش.

۱- مقدمه

هدایت الکتریکی و گرمایی مناسب آن‌ها برای کاربرد در کنتاکت‌های الکتریکی مورد توجه قرار گرفت. کامپوزیت پایه مس تقویت شده با ذرات آلومینا از جمله این کامپوزیت‌ها است که علاوه بر هدایت الکتریکی و گرمایی مناسب، به دلیل حضور ذرات پراکنده آلومینا، استحکام بالایی نیز دارند. در واقع ذرات آلومینا مانع از حرکت نابجایی‌ها می‌شود و از آن جا که ذرات آلومینا در دمای بالا آگلومره نمی‌شوند و رشد نمی‌کنند، این

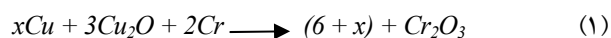
در گذشته اغلب از نقره به عنوان فلز پایه برای کنتاکت‌های الکتریکی استفاده می‌شد. اما گسترش صنایع الکتریکی منجر به کم شدن موجودی نقره و افزایش قیمت آن شده است. بنابراین، یافتن جایگزین مناسبی برای نقره در کنتاکت‌های الکتریکی با هدایت الکتریکی، گرمایی و استحکام بالا مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. از این رو کامپوزیت‌های پایه مس به سبب

سرعت آسیاب کردن و جنس گلوله و محفظه بر میزان آلیاژ شدن نمونه تأثیر می‌گذارد. در این پژوهش به بررسی برخی از این پارامترها پرداخته شده است.

۲- مواد اولیه و روش تحقیق

در این پژوهش از پودرهای مس، با خلوص ۹۹/۷٪ از شرکت مرک^۳ با کد محصول ME-1.12097.0500، پودر کروم، با خلوص ۹۹٪ و پودر اکسید مس، به عنوان عامل اکسیدکننده، با خلوص ۹۷٪ از شرکت اکروس^۴ با کد محصول Ac-19742.0500 استفاده شده است. برای تهیه نمونه مس/ اکسید کروم به روش آلیاژسازی مکانیکی و اکسیداسیون داخلی به ترتیب مراحل زیر انجام گرفت:

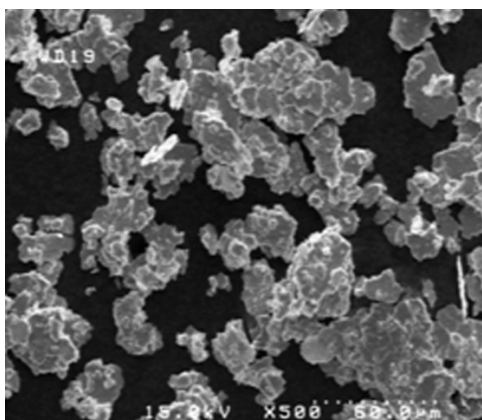
در ابتدا مقدار مناسبی مس و کروم به نسبت ۹۹ به ۱ و ۱ درصد وزنی پودر استتارات روی به عنوان ماده روان‌ساز توزین و به مدت ۱ ساعت در مخلوط‌کن توربولاب به طور کامل مخلوط شدند. سپس، مخلوط پودری فوق به مدت ۶۰ ساعت در آسیاب گلوله‌ای سیاره‌ای مدل FP4 ساخت شرکت پژوهش زاینده‌رود، با نسبت گلوله به پودر ۲۰ به ۱، تحت اتمسفر آرگون به طور مکانیکی آسیاب شد و آلیاژ مس- کروم به دست آمد. به منظور جلوگیری از اکسیداسیون ذرات پودر، نمونه‌برداری در محفظه اتمسفر محافظ^۵ تحت اتمسفر آرگون انجام شد. با توجه به محاسبات طبق واکنش (۱)، پودر اکسید مس به عنوان عامل اکسیدکننده ۲۰٪ بیش از مقدار استوکیومتری جهت اطمینان از انجام واکنش، به پودر آلیاژی افزوده شد. مقدار x در این واکنش به ازای ۱ درصد وزنی کروم، ۱۶۰/۸۷۵ و مقدار استوکیومتری اکسید مس، ۴/۱۲۵ گرم است. اگر واکنش به طور کامل انجام بگیرد، کامپوزیت Cu-2.5vol.%Cr₂O₃ به دست می‌آید.



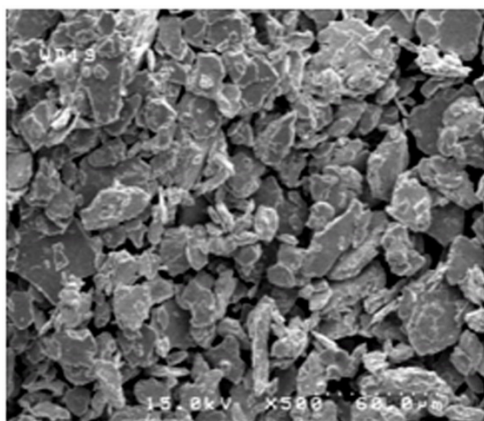
پس از افزودن اکسید مس، مجدداً مخلوط مواد به مدت ۱۰ ساعت با همان آسیاب سیاره‌ای، آسیاب شدند، تا کاملاً با ذرات پودر آلیاژی مخلوط شوند. نمونه‌برداری در این مرحله نیز تحت اتمسفر آرگون انجام شد. برای پرس از یک قالب فولاد گرم‌کار به قطر داخلی ۲۳ mm استفاده شد. به منظور نرم کردن پودرهای

کامپوزیت استحکام مناسبی در دمای بالا دارد. در میان روش‌های مختلف تهیه این کامپوزیت‌ها، روش ذوب و ریخته‌گری به علت توزیع ناهمگن ذرات اکسیدی در زمینه که بر خواص مکانیکی تأثیر منفی دارد، روش مناسبی نیست. روش متداول تهیه این کامپوزیت‌ها، تهیه پودر پیش آلیاژی مس- آلومینیوم و اکسیداسیون درجا^۲ است که با توجه به توزیع یکنواخت ذرات اکسیدی و ریزدانگی آن‌ها، روش بهینه‌ای است [۱]. در این روش آلومینیوم به راحتی در مس حل می‌شود، برای انجام اکسیداسیون درجا، آلومینیوم باید بر نیروی پیوندی ناشی از شکل‌گیری محلول جامد پایدار مس- آلومینیوم غلبه کند. علاوه بر آن نرخ نفوذ اکسیژن در بین دانه‌های پودر مس- آلومینیوم کم است. پس تأثیر مشترک این دو منجر به کاهش سینتیک اکسیداسیون داخلی آلومینیوم می‌شود [۲]. با توجه به دیگرام فازی مس- آلومینیوم مقدار حلالیت آلومینیوم در مس حدود ۸ درصد وزنی است [۳] و اگر مقداری از آلومینیوم حل شده در مس در حین اکسیداسیون داخلی از شبکه مس خارج نشود، باعث کاهش هدایت الکتریکی می‌شود. بنابراین مدت زمان لازم برای اکسیداسیون داخلی و دستیابی به اکسیداسیون کامل آلومینیوم بسیار طولانی است. بنابراین بهتر است، به جای آلومینیوم از عنصری استفاده کرد که دوره‌ی اکسیداسیون داخلی را کاهش دهد و فرآیند اکسیداسیون داخلی را به راحتی کنترل کند [۴]. از جمله عناصری که چنین ویژگی دارد، کروم است که با توجه به دیگرام فازی مس- کروم، حد انحلال کروم در مس کمتر از ۱ درصد وزنی می‌باشد [۳]. از سوی دیگر نرخ اکسیداسیون کروم بیش از آلومینیوم است. اگر مقدار کمی کروم در زمینه مس اکسید نشده باقی بماند، با عملیات حرارتی رسوب سختی، کروم از شبکه مس خارج می‌شود. بنابراین، کروم به ندرت بر روی خواص فیزیکی مس اثر سوء می‌گذارد. ضمناً کروم رسوب یافته و اکسید کروم خواص مکانیکی مس را بهبود می‌دهد [۴].

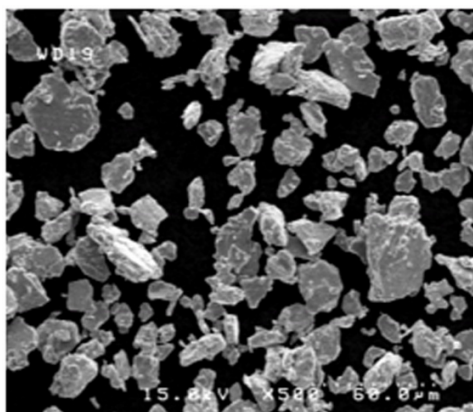
لازم به ذکر است که در روش آلیاژسازی مکانیکی پارامترهای مختلفی چون مدت زمان آسیاب کردن، نسبت گلوله به پودر،



(الف)



(ب)



(پ)

شکل (۱): مورفولوژی پودر مس-۱ درصد وزنی کروم در بزرگنمایی ۵۰۰ پس از زمان‌های مختلف آسیاب کاری در نسبت گلوله به پودر متفاوت، (الف) ۶۰ ساعت با BPR ۱۰ به ۱، (ب) ۴۰ ساعت با BPR ۲۰ به ۱ و (پ) ۶۰ ساعت با BPR ۲۰ به ۱.

آسیاب شده و جلوگیری از اکسید شدن ذرات پودر، در مرحله اول پودرها تحت فشار ۳۰ MPa و دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت. پس از حذف اثر کارسرد حاصل از آسیاب مکانیکی و خروج احتمالی ماده روان‌ساز و همچنین حصول انسجام اولیه، به منظور بالا بردن چگالی نمونه‌ها و کاهش تخلخل، نمونه‌های مرحله اول در همان قالب، تحت فشار ۴۰۰ MPa پرس سرد شدند. زینتر و اکسیداسیون داخلی نمونه‌های دیسکی شکل به طور همزمان در کوره تونلی اتمسفر محافظ در دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد. در ابتدا به منظور به دست آوردن زمان و نسبت گلوله به پودر بهینه برای آلیاژسازی مکانیکی به آنالیز الگو پراش پرتو X نمونه‌های پودری پرداخته شده است. چگالی نمونه‌ها قبل و بعد از عملیات زینتر با استفاده از ترازوی با دقت ۰/۰۰۰۱ گرم به روش ارشمیدس بر اساس استاندارد ASTM b328 به دست آمده است. در ادامه به بررسی مقاومت سایش نمونه‌ها توسط دستگاه پین بر روی دیسک و طبق استاندارد ASTM G99-95a تحت نیروی ۲۰ N و سرعت ثابت ۰/۲۵ m/s انجام گرفت. برای مطالعه رفتار سایشی نمونه‌ها به بررسی میزان کاهش حجم نمونه‌ها پس از طی مسافت‌های لغزش متفاوت و عکس‌های میکروسکوپ الکترونی از سطوح سایش، پرداخته شده است.

۳- نتایج و بحث

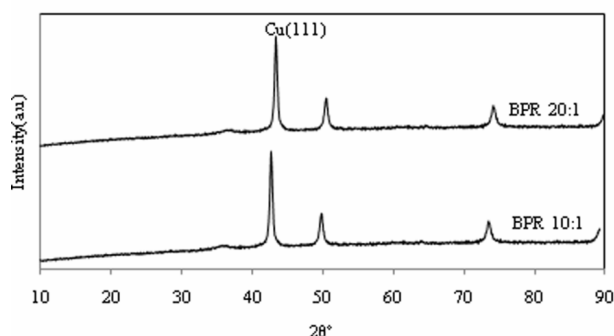
شکل (۱) تصاویر میکروسکوپ الکترونی رویشی پودرهای مس-۱ درصد وزنی کروم پس از مدت زمان مختلف آسیاب کاری با نسبت گلوله به پودر متفاوت را نشان می‌دهند. از مقایسه شکل (۱-الف و پ) تصاویر نمونه مس-۱ درصد وزنی کروم پس از ۶۰ ساعت آسیاب کردن به ترتیب با BPR ۱۰ به ۱ و ۲۰ به ۱ برمی‌آید که در نمونه با BPR ۱۰ به ۱ هر چند به مدت ۶۰ ساعت پودرها آسیاب شده‌اند اما هنوز مقداری از ذرات به هم چسبیده‌اند و زمان آسیاب کردن بیشتری برای رسیدن به

افزایش عیوب داخلی و بالا رفتن دما باعث تسریع نفوذ اتم‌ها می‌شود [۵]. بنابراین، در این پژوهش برای آلیاژسازی با استفاده از آسیاب مکانیکی، نمونه‌ها به مدت ۶۰ ساعت با نسبت وزنی گلوله به پودر ۲۰ به ۱ آسیاب شده‌اند.

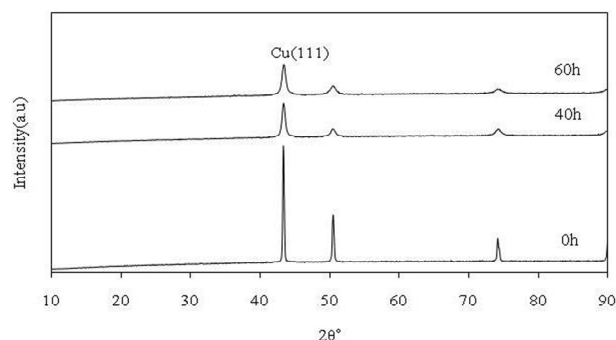
البته برای اطمینان از کفایت زمان و نسبت گلوله به پودر مناسب برای آلیاژسازی مکانیکی سیستم مس- کروم، الگو پراش پرتو X مخلوط پودرهای مس و کروم پس از زمان‌ها و نسبت گلوله به پودر متفاوت در شکل‌های (۲) و (۳) آورده شده است. با توجه به این که دستگاه قادر به تشخیص عناصر کمتر از ۳ درصد وزنی موجود در نمونه نیست، تنها پیک‌های مس در این نتایج مشاهده می‌شود. اما با توجه به ایجاد محلول جامد در نمونه‌ها در حین آلیاژسازی مکانیکی، مقداری جابجایی در پیک‌های اصلی مس به دلیل تفاوت قطر اتمی مس و کروم و تغییر یافتن پارامتر شبکه مس به علت حضور کروم در شبکه آن، مشاهده می‌شود. از مقایسه طرح پراش نمونه‌ها در شکل‌های (۲) و (۳) برمی‌آید که با افزایش زمان آسیاب کردن و نسبت گلوله به پودر، عرض پیک‌ها بیشتر می‌شود که بیانگر ریزتر شدن ذرات است که در تصاویر میکروسکوپ الکترونی که در شکل (۱) نشان داده شده است، نیز مشخص است.

از سوی دیگر با توجه به جابجایی بیشتر پیک‌ها به سمت چپ و کاهش بیشتر شدت پیک‌ها میزان حلالیت کروم در مس با افزایش زمان آسیاب کردن و نسبت گلوله به پودر، افزایش می‌یابد. جابجا شدن پیک‌ها به سمت چپ و در واقع کاهش زاویه پراش متناسب با پیک‌های اصلی مس خالص و با توجه به رابطه براگ ($n\lambda = 2d\sin\theta$)، بیان‌کننده افزایش اندازه کریستالیت است. با توجه به رابطه مستقیم اندازه کریستالیت و پارامتر شبکه، افزایش پارامتر شبکه مس نتیجه می‌شود. البته با توجه به اینکه قطر اتمی مس $2/55 \text{ \AA}$ و قطر اتمی کروم نیز $2/6 \text{ \AA}$ است، با قرار گرفتن کروم در شبکه مس، اختلاف پارامتر شبکه مس آلیاژی نسبت به مس خالص چندان زیاد نمی‌باشد.

از آن جا که پهن شدن پیک‌ها به ریز دانه شدن و کرنش شبکه برمی‌گردد، با توجه به روابط مختلف موجود برای تخمین اندازه



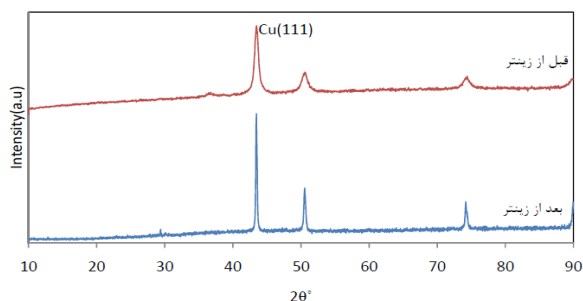
شکل (۲): طرح پراش اشعه X نمونه مس- ۱ درصد وزنی کروم پس از ۶۰ ساعت آسیاب کردن با نسبت گلوله به پودر ۱۰ به ۱ و ۲۰ به ۱.



شکل (۳): طرح پراش اشعه X نمونه مس- ۱ درصد وزنی کروم، پس از صفر، ۴۰ و ۶۰ ساعت آسیاب کردن با BPR ۱:۲۰.

حالت تعادل بین جوش سرد و شکستن ذرات پودر لازم دارد. از مقایسه شکل (۱- الف و ب) پس از ۶۰ ساعت آسیاب کردن، در نمونه با نسبت وزنی گلوله به پودر ۲۰ به ۱ متوسط اندازه ذرات در این نمونه کمتر از نمونه با نسبت گلوله به پودر ۱۰ به ۱ است. از مقایسه شکل (۱- الف و ب) از نظر اندازه ذرات و میزان چسبندگی، نمونه با زمان آسیاب کمتر، بیش از نمونه با نسبت گلوله به پودر کمتر است. بنابراین، تأثیر مدت زمان آسیاب کردن بر نمونه بیشتر از نسبت گلوله به پودر می‌باشد.

در مجموع، پس از آسیاب به مدت ۶۰ ساعت با نسبت گلوله به پودر ۲۰ به ۱ منجر به ایجاد کارسختی در ذرات و شکسته شدن آن‌ها شده است و متوسط اندازه ذرات کاهش یافته است، در نهایت ذرات نسبتاً هم‌محور شده‌اند. در این مرحله با کاهش اندازه ذرات و فاصله بین لایه‌های ذرات، نفوذ اتم‌ها در فصل مشترک لایه‌های ایجاد شده منجر به تشکیل آلیاژ می‌شود.



شکل (۴): طرح پراش اشعه X نمونه‌ها قبل و پس از زینتر.

افزایش نفوذپذیری و کاهش فاصله نفوذ ناشی از شکست و جوش خوردن مکرر، سینتیک زینتر افزایش می‌یابد [۵]. با تشکیل ذرات اکسیدی، همانطور که چگالی تئوری افزایش می‌یابد، چگالی پس از زینتر نمونه نیز بیش از چگالی خام نمونه است و درصد تخلخل کاهش می‌یابد. میزان تخلخل موجود در کامپوزیت در واقع به علت خلل و فرجی است که همراه با تشکیل اکسید کروم، وارد نمونه می‌شود. البته در صورت به کارگیری روش‌هایی چون پرس داغ در فرآیند تولید میزان تخلخل کاهش بیشتری پیدا می‌کند.

مقاومت الکتریکی ویژه کامپوزیت قبل و بعد از زینتر با میکرواهم‌متر ساخت شرکت IET Labs که بر اساس مدار کلون-بریج^۶ کار می‌کند، اندازه‌گیری شده است و بر اساس استاندارد ASTM b193 مقدار مقاومت ویژه الکتریکی به دست آورده شده است. مقاومت الکتریکی ویژه قبل و بعد از زینتر به ترتیب $22 \mu\Omega\text{cm}$ و $6/4 \mu\Omega\text{cm}$ است. با توجه به مقادیر به دست آمده، مقاومت الکتریکی ویژه پس از زینتر کاهش می‌یابد. پس از زینتر با خروج عنصر کروم از شبکه مس و کاهش اعوجاج شبکه مقاومت الکتریکی ویژه نمونه افزایش می‌یابد.

رفتار سایشی کامپوزیت‌ها از طریق میزان کاهش وزن نمونه‌ها حین فرآیند سایش و بررسی تصاویر میکروسکوپی سطوح سایش مطالعه گردید. نتایج حاصل از آزمون سایش پس از اندازه‌گیری کاهش وزن در هر مرحله، با توجه به مقادیر چگالی محاسبه شده نمونه‌ها به کاهش حجم تبدیل شده‌اند. نمودار

دانه و کرنش شبکه در این پژوهش از رابطه ویلیامسون-استفاده شده است. در این روش پس از رسم منحنی $\beta\text{Cos}\theta\text{-Sin}\theta$ ، معادله بهترین تقریب خطی آن به دست آورده شده است [۶]. ضمناً مقدار پهن‌شدگی پیک‌ها توسط نرم‌افزار موجود بر روی دستگاه اندازه‌گیری شده است. پرتو $\text{Cu } \alpha$ با طول موج $1/54060 \text{ \AA}$ برای الگو پراش به کار رفته است. بر اساس نتایج حاصل از طرح پراش اشعه X نمونه مس-۱ درصد وزنی کروم پس از ۶۰ ساعت آسیاب کردن با BPR، ۲۰ به ۱، کرنش شبکه $0/0015$ و اندازه دانه $34/66$ نانومتر می‌باشد.

شکل (۴) نتایج آنالیز الگو پراش پرتو X نمونه پس از زینتر را با نمونه پس از ۶۰ ساعت آسیاب کردن و قبل از زینتر مقایسه می‌کند. با توجه به شکل پیک‌های مس پس از زینتر نسبت به نمونه پودری زینتر نشده، به سمت راست جابجا شده‌اند. در واقع زاویه پیک متناظر با صفحه (۱۱۱) در این مرحله برابر $43/21^\circ$ است و پس از زینتر به حدود $43/43^\circ$ می‌رسد که در مقایسه با زاویه $43/45^\circ$ مربوط به پیک متناظر با صفحه (۱۱۱) مس خالص نشان‌دهنده این است که کروم از شبکه مس خارج شده و بنابراین پیک‌های مس آلیاژی به سمت مس خالص میل کرده است. علاوه بر این، پس از زینتر نمونه‌ها، شدت پیک‌ها افزایش یافته که این نیز دلیلی بر خارج شدن کروم از شبکه مس در این مرحله است. اما در این الگوی پراش به علت ریزدانه‌گی یا مقدار کم اکسید کروم موجود، پیک‌های اکسید کروم مشاهده نشده است.

پس از تعیین زمان و نسبت گلوله به پودر بهینه برای تهیه آلیاژ و اطمینان از تشکیل کامپوزیت، در ادامه به بررسی برخی خواص فیزیکی و مکانیکی نمونه‌ها پرداخته می‌شود. چگالی نمونه‌ها قبل و پس از زینتر بر اساس استاندارد ASTM b328 بر طبق رابطه ارشمیدس و درصد تخلخل نمونه‌ها نیز به دست آمده است. نتایج محاسبات در جدول (۱) ارائه شده است.

پس از اکسیداسیون داخلی و زینتر در نمونه‌های تهیه شده به روش آلیاژسازی مکانیکی، به علت افزایش سطح مرز دانه‌ها،

جدول (۱): چگالی و درصد تخلخل نمونه.

نمونه	چگالی خام (g/cm ³)	چگالی پس از زینتر (g/cm ³)	چگالی تئوری (g/cm ³)	چگالی نسبی	درصد تخلخل
Cu-Cr-Cu ₂ O	۶/۸	-	۸/۷۰۶	۰/۷۸	۲۲
Cu-Cr ₂ O ₃	-	۷/۶۳	۸/۸۲	۰/۸۶	۱۳/۵

پهنای شیارها افزایش می‌یابد و علاوه بر آن با توجه به آنالیز شیمیایی EDS یک لایه سطحی متفاوت با زمینه در سطح نمونه‌های ساییده شده، تشکیل شده است. آنالیز شیمیایی EDS بیانگر افزایش حضور اکسیژن در سطوح سایش با افزایش مسافت لغزش است.

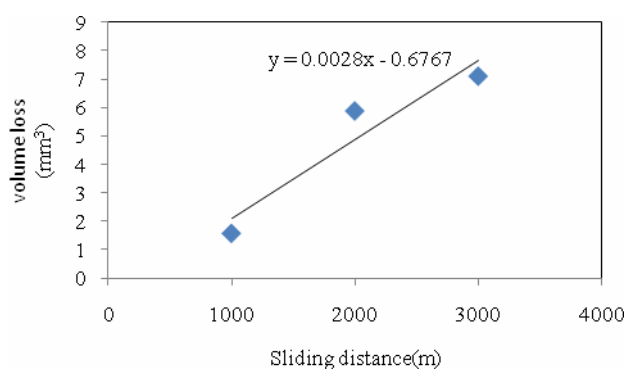
در حقیقت گرمای ایجاد شده ناشی از اصطکاک نمونه روی سطح دیسک موجب بالا رفتن دما تا حدود تشکیل و پایداری فازهای اکسیدی زمینه می‌گردد. حضور این لایه‌های اکسیدی مانع از تماس مستقیم پین کامپوزیت با سطح دیسک می‌شود و بنابراین، میزان کاهش حجم نمونه در مسافت‌های بالاتر اندکی کاهش می‌یابد. با افزایش مسافت لغزش غیر از خطوط و شیارهای سایش، حفره‌ها و کندگی‌هایی با مکانیزم سایش تورقی نیز دیده می‌شود. ترک‌هایی عمود بر جهت سایش در سطح نمونه‌ها مشاهده می‌شود که در مسافت‌های بالاتر به وضوح در شکل (۶-ت) مشخص است. بنابراین، مکانیزم‌های حاکم در این نمونه‌ها ترکیبی از مکانیزم سایش سایا، اکسیداسیونی و تورقی است.

۴- نتیجه‌گیری

به منظور تولید کامپوزیت مس/اکسید کروم به روش آلیاژسازی مکانیکی و اکسیداسیون داخلی، در این پژوهش زمان مناسب برای آلیاژسازی ۶۰ ساعت و نسبت گلوله به پودر ۲۰ به ۱ در نظر گرفته شده است. پس از بررسی برخی خواص فیزیکی و مکانیکی نتایج زیر در مجموع به دست آمده است:

۱- چگالی نمونه بعد از اکسیداسیون داخلی افزایش می‌یابد.

۲- مقاومت الکتریکی ویژه نمونه پس از اکسیداسیون داخلی به

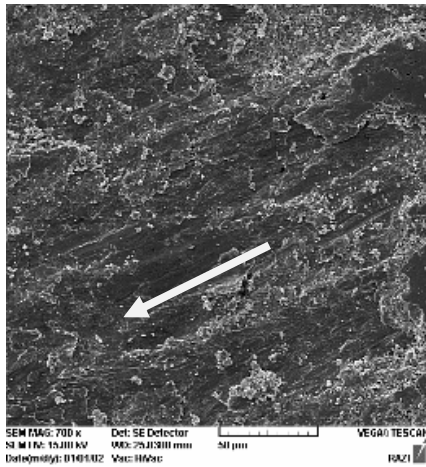


شکل (۵): نمودار کاهش حجم بر حسب مسافت نمونه.

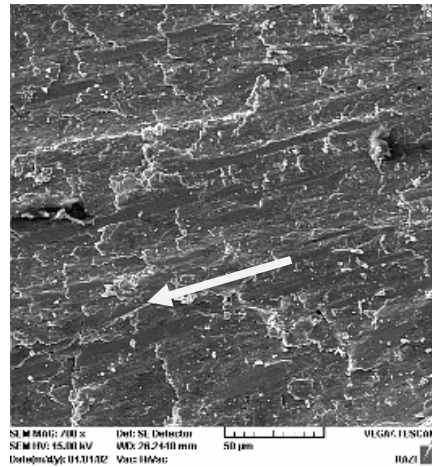
کاهش حجم نسبت به مسافت برای نمونه در شکل (۵) نشان داده شده است. به طور کلی با افزایش مسافت لغزش، میزان کاهش حجم نمونه‌ها باید افزایش یابد.

با توجه به نمودار کاهش حجم نمونه مس-۱ درصد وزنی کروم سرعت کاهش حجم در مسافت ۳۰۰۰ متر نسبت به ۲۰۰۰ متر اندکی کمتر از مسافت ۲۰۰۰ متر به ۱۰۰۰ متر است. که در ادامه با بررسی تصاویر میکروسکوپ الکترونی سطوح ساییده شده در شکل (۶) به بررسی آن پرداخته می‌شود. پس از رسم نمودار نقطه‌ای کاهش حجم در مسافت‌های لغزش مختلف برای نمونه‌های مختلف، معادله بهترین تقریب خطی منحنی را به دست آورده و از روی شیب، نرخ سایش معادل $0.0028 \text{ mm}^3/\text{m}$ است.

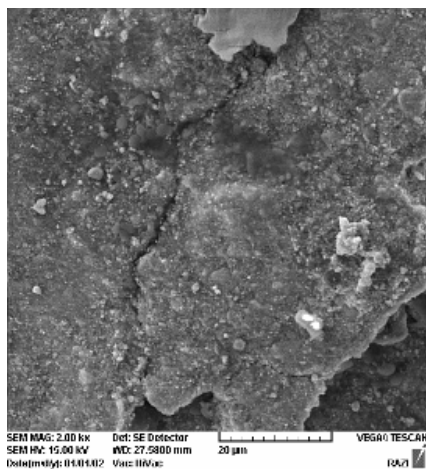
شکل (۶) تصاویر SEM نمونه کامپوزیتی در مسافت‌های مختلف لغزش را نشان می‌دهد. با توجه به تصاویر سایش نمونه‌ها در مسافت‌های ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ متر، شیارها و کانال‌هایی موازی با جهت سایش مشاهده می‌شود، بنابراین مکانیزم غالب در این مسافت‌ها، سایش سایا می‌باشد. با افزایش مسافت سایش عمق و



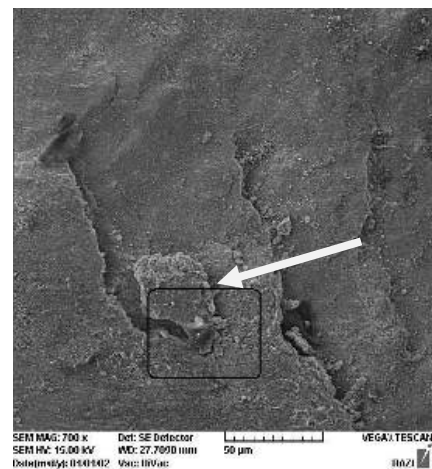
(ب)



(الف)



(ت)



(پ)

شکل (۶): تصویر SEM از سطح ساییده شده نمونه تحت نیروی ۲۰ نیوتن در مسافت‌های (الف) ۱۰۰۰ متر، (ب) ۲۰۰۰ متر، (پ) ۳۰۰۰ متر و (ت) قسمت مشخص شده از شکل (پ) در بزرگنمایی بالاتر.

۵- مراجع

- [1] V. Rajkovic, D. Bozic and M. T. Jovanovic, "Effects of Copper and Al_2O_3 Particles on Characteristics of Cu- Al_2O_3 Composites", Materials and Design, Vol. 31, pp. 1962-1970, 2010.
- [2] S. Liang, X. Wang, D. Kong and Z. Fan, "Preparation of Cu/ Cr_2O_3 Composites by Mechanical Activation and In Situ Oxidation", Journal of Composite Materials, Vol. 43, pp. 1491-1501, 2009.
- [3] ASM Handbook, Alloy Phase Diagram, Vol. 3, 1992.
- [4] S. Liang and P. Xiao, "Effect of Al(Cr) Content on the Distribution of Al_2O_3 (Cr_2O_3) Particles Formed by Internal Oxidation", Key Engineering Materials, Vol. 334-335, pp. 189-192, 2007.

علت خارج شدن کروم از شبکه مس، کاهش می‌یابد.
 ۳- در آزمون سایش، کاهش حجم نمونه با افزایش مسافت لغزش افزایش می‌یابد. مقاومت به سایش کامپوزیت تهیه شده بیش از مقاومت به سایش مس خالص است. مکانیزم غالب سایش در مسافت‌های کوتاه، سایش سایا است که با افزایش مسافت سایش مکانیزم اکسیداسیونی و تورقی نیز فعال می‌شوند.

- [5] C. Suryanarayana, "Mechanical Alloying and Milling", Progress in Materials Science, Vol. 46, 2001.
- [6] V. Rajkovic, D. Bozic and M. T. Jovanvic, "Properties of Copper Matrix Reinforced with Nano- and Micro-Sized Al_2O_3 Particles", Journal of Alloy and Compounds, Vol. 495, pp. 177-184, 2008.

۶- پی نوشت

- 1- Pin on disc
- 2- In Situ
- 3- Merck
- 4- Acros
- 5- Glove box
- 6- Kelvin-Bridge