

بررسی رفتار سایشی نانوکامپوزیت فلزی تنگستن مس ساخته شده به روش سنتز ترموشیمیایی

مهدی جهانگیری^{۱*}، مزدک هاشم پور^۲، حکمت رضوی زاده^۳، حمیدرضا رضایی^۴

تاریخ دریافت: ۲۰ مرداد ۹۲ تاریخ پذیرش: ۱ آبان ۹۲

چکیده

در این کار یک روش رسوبدهی همگن ترموشیمیایی برای تولید نانوکامپوزیت W-25wt%Cu استفاده شد و رسوبهای حاصل از سنتز ترموشیمیایی تحت کلسینه شدن و احیا قرار گرفتند. عملیات تفجوشی در دمای ۱۲۰۰ °C و تحت اتمسفر هیدروژن به مدت ۱۰۵ دقیقه انجام شد که چگالی محصول را تا ۹۸٪ میزان دانسیته تئوری بالا برد. تستهای سایش بر روی این ماده توسط دستگاه پین و دیسک و در سه نیروی مختلف ۵N، ۱۰N و ۱۵N انجام گرفته و انرژی مستهلک شده در فواصل مختلف سایش محاسبه شد. برآورد شیب نمودار «انرژی استهلاکی مسافت سایش» در تمام نیروها، نشان از ثابت بودن این شیب در هر نیروی خاص داشت. هرچند میزان این شیب، نسبت مستقیمی با بزرگی نیروی عمودی داشت (a J/m برای ۵ نیوتن، b J/m برای ۱۰ نیوتن و c J/m برای ۱۵ نیوتن) که نشان از توان بیشتر نیروهای بالا در تزریق انرژی به ماده و ایجاد تخریب سایشی داشت، با اتکا به شیب ثابت این نمودار در هر نیروی عمودی خاص، مکانیزم سایش در طول فرایند سایش تحت آن نیروی خاص بدون تغییر می ماند. مطالعه همزمان پارامترهای مکانیکی و ریزساختاری سایش، مود سایشی غالب در این ماده را «خستگی» و پروسه سایشی فعال را «ورقه‌ای شدن (Delamination)» ارزیابی کرد که شکل گیری ترک‌های زیرسطحی و فرسایش تدریجی لایه‌های تحت سایش در وقوع این مکانیزم بسیار تاثیرگذار بود.

واژگان کلیدی: نانوکامپوزیت تنگستن مس، سایش، انرژی استهلاکی، ورقه‌ای شدن.

۱. مقدمه

مواد کامپوزیت با تکیه بر اصل اساسی استفاده هم‌زمان از فواید غیرمشابه مواد ناهمگون، در نتیجه‌ای به جهانی گسترده از امکانات و توانایی‌های جدید به روی آدمی گشوده‌اند [۱]. از این دیدگاه، مس با خواص هدایت الکتریکی و حرارتی خود و تنگستن با خواص سختی و مقاومت سایشی خود، ترکیبی فوق‌العاده برای طیف گسترده‌ای از کاربردها از کارکردهای سایشی در کتاکت‌های

لغزشی ولتاژ بالا و الکترودهای EDM گرفته تا Heat Sinkها و الکترودهای قوس فراهم می‌آورند [۲-۴]. این کامپوزیت به طرق مختلفی از غوطه‌وری اسکلت تنگستن در مس مذاب گرفته تا آلیاژسازی مکانیکی، تغییر فرم پلاستیک شدید و نیز روش‌های ترموشیمیایی و مکانوترموشیمیایی به تولید رسیده است [۵-۱۰]. این کامپوزیت به طرق مختلفی از غوطه‌وری اسکلت تنگستن در مس مذاب گرفته تا آلیاژسازی مکانیکی، تغییر فرم پلاستیک شدید و نیز روش‌های ترموشیمیایی و

۱. کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر اصفهان، ایران: mehdi.jahangiri@gmail.com

۲. کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

۳. استاد، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

۴. استاد، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

پودر کامپوزیتی با ۲۵٪ وزنی مس تشکیل شود. به محلول نیترات، مقداری آمونیاک اضافه شد که از قرار ۱cc به ازای هر ۱۰۰cc از محلول نیترات بود؛ سپس محلول تنگستات سدیم با مجموعه محلول نیترات سدیم و آمونیاک، مخلوط شد. این مخلوط با هیترا تا دمای ۹۰ °C گرم شد و به مدت ۶ ساعت به وسیله همزن مغناطیسی هم زده شد تا آمونیاک آن کاملاً تبخیر شود که در نهایت به تولید رسوبی سبز رنگ انجامید. این رسوب سپس به وسیله کاغذ صافی ریز از باقی مانده محلول، آبی جدا شد و در خشک کن و در دمای ۱۵۰ °C به مدت ۴۵ دقیقه حرارت دید تا کاملاً خشک شود. رسوبها در دمای ۴۵۰ °C به مدت ۱ ساعت در یک کوره مافل کلسینه شدند و متعاقب آن به مدت ۲/۵ ساعت در دمای ۸۰۰ °C و تحت اتمسفر هیدروژن، در کوره تیوبی احیا شدند تا پودر کامپوزیت W-Cu با درصد وزنی ۲۵٪Cu حاصل شود. پروسه تفجوشی در دمای ۱۲۰۰ °C در کوره تیوبی و تحت اتمسفر هیدروژن به مدت ۱۰۵ دقیقه انجام شد. دانسیته محصول نهایی از طریق روش ارشمیدس اندازه گیری شد.

۲.۲. آزمون‌های سختی و سایش

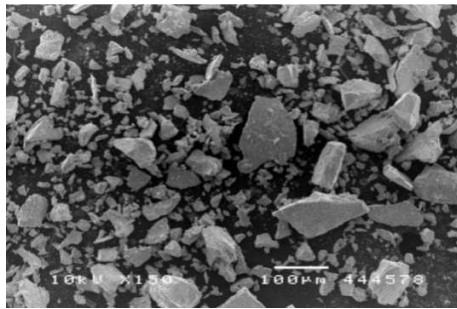
آزمون سختی ماکرو در مقیاس ویکرز توسط دستگاه سختی سنج WOLPERT ساخت کشور آلمان و بار ۱۰ نیوتن برای نمونه تفجوشی شده انجام شد. هر تست، ۵ بار برای هر نمونه تکرار شده و عدد میانگین به عنوان عدد سختی آن نمونه گزارش شده است. برای انجام آزمایش سایش از یک دستگاه سایش پین و دیسک استفاده شد. دیسکها از جنس نانوکامپوزیت تنگستن مس تولید شده در مراحل قبل و پینها از جنس فولاد ۵۲۱۰۰ با سختی ۶۲RC تهیه شدند. نیروهای اعمالی استفاده شده با توجه به تست بارپذیری با مقادیر ۵، ۱۰ و ۱۵ نیوتن در نظر گرفته شدند. هر نمونه در نیروی اعمالی مسافتی برابر با ۹۰۰ متر را طی کرده و در جریان آزمایش، میزان کاهش جرم با دقت چهار رقم اعشار توسط ترازوی دیجیتال SARTORIUS (ساخت آلمان) اندازه گیری شد.

و مکانوترموشیمیایی به تولید رسیده است [۵-۱۰]. در تمامی این روشها مشخص شده است که سایز فوق ریز در اجزا و نیز توزیع یکنواخت و همگن اجزا در همدیگر خاصیت تفجوشی پذیری و در نتیجه کامپوزیت نهایی را ارتقا می دهد، به ویژه در تفجوشی حالت مایع سیستم کامپوزیتی ای نظیر W-Cu که مکانیزم غالب تفجوشی در آن بازآرایی ذرات است [۱۱]. ذرات WC از موفق ترین همراهان مس برای تولید کامپوزیتی برای کارهای سایشی بوده اند. هرچند به سبب خواص الکتریکی ضعیف خود، چندان جوابگوی نیاز صنایع الکتریکی نبوده اند [۱۲]. از این دیدگاه، کامپوزیت W-Cu با در نظر گرفتن مقاوم ساز W به جای WC توانسته است ضمن حفظ خواص مقاومت سایشی، خواص الکتریکی را نیز ارتقا بخشد. مطالعات انجام شده در زمینه بررسی رفتار سایشی و یا فرسایشی کامپوزیت های W-Cu بسیار محدود بوده و به چند مقایسه مختصر محدود می شود. ونگ و همکارانش رفتار فرسایش جرقه ای این کامپوزیت را مطالعه کردند [۱۳ و ۱۴]. دشبانده و لین مقایسه هایی را مابین رفتار سایشی W-Cu و WC-Cu انجام داده اند [۱۲ و ۱۵]. در این تحقیق هدف، تولید کامپوزیت W-Cu در ابعاد نانو با روشی تکرارپذیر و مقرون به صرفه بوده است؛ به گونه ای که هم به سبب نانو سایز بودن ذرات سازنده، دارای مزایای تفجوشی پذیری بالا و مقاومت سایشی قوی و هم به سبب صرفه اقتصادی، قابلیت تولید در مقیاس صنعتی را دارا باشد. به علاوه با توجه به خلاء موجود در زمینه بررسی رفتار سایشی این ماده، پژوهشی جهت یافتن مکانیزم سایش در این کامپوزیت در دستور کار قرار گرفت. بدین منظور از تست پین و دیسک برای ارزیابی رفتار تریبولوژیکی بهره گرفته شد.

۲. مراحل پژوهش

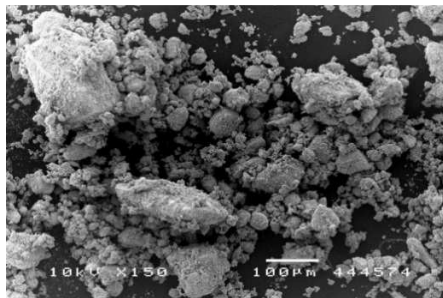
۱.۲. ساخت کامپوزیت

نخست محلول های تنگستات سدیم و نیترات مس به صورت جداگانه و با حل کردن نمک هر کدام در آب مقطر تهیه شد. میزان مواد اولیه براساس نسبت های استوکیومتری که به گونه ای تنظیم شد که



شکل (۲): تصویر SEM رسوب‌های خام حاصل از رسوب‌دهی

این رسوب‌ها در اثر کلسینه‌شدن در اتمسفر هوا در دمای 450°C به صورت کلوخه‌هایی همچنان بزرگ اما تجزیه‌شده به فازهای CuO ، CuWO_{4-x} و WO_3 درآمده‌اند [۱۷]. تصویر SEM این کلوخه‌های کلسینه‌شده را در شکل (۳) مشاهده می‌کنیم.



شکل (۳): تصویر SEM رسوب‌های کلسینه‌شده در اتمسفر هوا در دمای 450°C

پودرهای کلسینه‌شده که ترکیبی اکسیدی داشتند، تحت پروسه احیای هیدروژنی در دمای 800°C به پودر فلزات خالص مس و تنگستن تبدیل شدند [۱۸]. در شکل (۴) ریزساختار این پودرها که کماکان حالت کلوخه‌ای خود را حفظ کرده (البته کلوخه‌هایی کوچک‌تر) و نیز آنالیز EDS پودر را که حاکی از حضور دو فاز فلزی W و Cu است در قسمت‌های الف و ب می‌بینیم.



شکل (۱): فلوجارت مراحل آزمون سایش

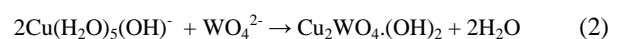
کلیه این آزمایش‌ها در سرعت لغزشی 0.07m/s ، فرکانس 60Hz و در رطوبت 40% هوا انجام شد.

پس از اتمام سایش، نمونه‌ها تصویربرداری سطحی شدند. در انتها مجموعه اطلاعات به دست آمده، مطابق با فلوجارت مشاهده‌شده در شکل (۱)، جهت نتیجه‌گیری نهایی استفاده شدند.

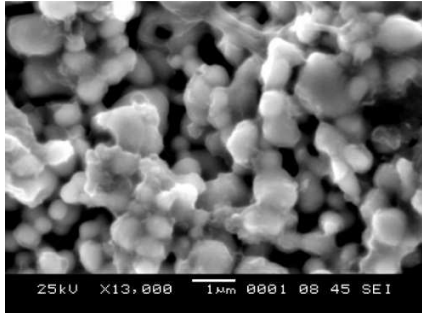
۳. نتایج و بحث

شکل (۲) نشان دهنده تصویر SEM رسوب‌های خام حاصل از رسوب‌دهی همگن ترموشیمیایی است. الگوهای XRD این پودرها حضور دو فاز $\text{Cu}_2\text{WO}_4(\text{OH})_2$ و $\text{CuWO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ با متوسط اندازه کریستالیت 10nm را ثابت کردند. همان‌طور که در شکل (۲) نیز مشخص است، این رسوب‌ها به صورت کلوخه‌های متراکمی با ابعاد $1-10\mu\text{m}$ تشکیل شدند.

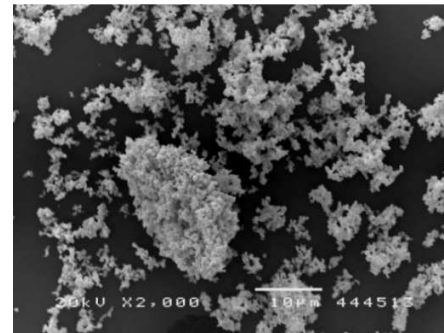
از آن‌جا که مواد اولیه‌ی این واکنش رسوب‌دهی محلول‌های آبی نترات مس و تنگستات سدیم بودند، واکنش‌های رسوب‌دهی به صورت واکنش‌های ۱ و ۲ درخور فرموله شدن هستند [۱۶]:



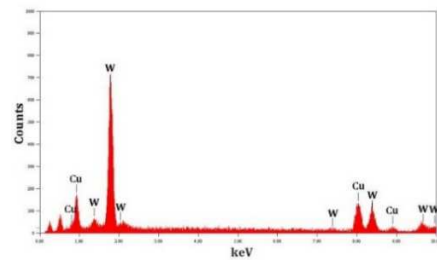
به منظور حصول برداشتی نزدیک به واقع از مکانیزم سایش و نحوه استهلاک این ماده در اثر موقعیت سایشی، مجموعه‌ای از مطالعات ریزساختاری همراه با تحلیل نمودارهای سایشی مد نظر قرار گرفت.



(الف)

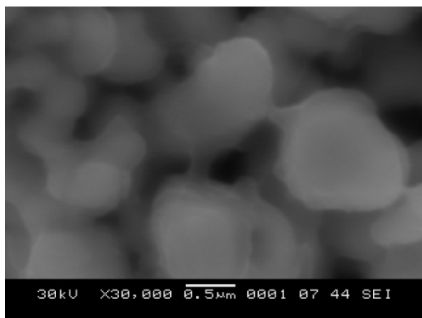


(الف)



(ب)

شکل (۴): الف) تصویر SEM پودرهای احیا شده و ب) آنالیز EDS پودرهای احیا شده



(ب)

شکل (۵): تصویر SEM کامپوزیت تفجوشی شده و غشای مس مابین ذرات تنگستن در دو بزرگ‌نمایی

در شکل ۶ تصویر سطح سایش نمونه‌های تحت نیروهای مختلف مشاهده می‌شود. در شکل ۶ الف، سطح سایش نمونه تحت نیروی ۵N دیده می‌شود. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، لطمه‌های سطحی محدود به آسیب‌های کم‌عمق و مسطح است که بدون شیارهای عمیق در سراسر نمونه دیده می‌شوند. همچنین در این تصاویر ذراتی بسیار ریز و به صورت برجستگی‌های برفک‌مانند مشاهده می‌شود که احتمالاً مربوط به ذرات خارج‌شده از عمق ماده‌اند [۱۹]. در شکل (۶ ب)، سطح سایش برای نیروی ۱۰N

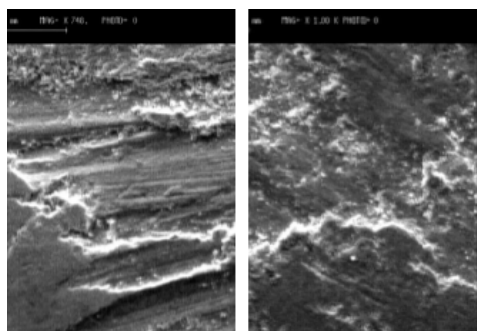
پودرهای احیا شده پس از پرس شدن در ۲۰۰MPa در دمای ۱۲۰۰°C و تحت اتمسفر هیدروژن تفجوشی شدند. نتایج حاصل از بررسی چگالی نمونه‌ها در دماهای مختلف نشان داد که عمده تفجوشی پس از عبور از دمای ۱۰۸۳°C یعنی دمای ذوب مس حاصل می‌شود که گواه تفوق مکانیزم تفجوشی حالت مایع است [۱۹، ۲۰].

بهترین چگالی در دمای ۱۲۰۰°C به دست آمد که معادل ۹۸٪ چگالی تئوریک این کامپوزیت بود. شکل (۵) به خوبی نشانگر غشای مس است که در حالت مذاب فضای مابین ذرات تنگستن را پر کرده است. این تصویر از سطح مقطع شکسته شده و اچ شده کامپوزیت برداشته شده است. با اتمام پروسه تفجوشی و پیش از بررسی مکانیزم سایش، نمونه‌ها تحت آزمون سختی ویکرز HV قرار گرفتند. آزمون بر روی ۴ نمونه و روی هر نمونه در ۱۰ نقطه انجام شد که میانگین سختی برای این کامپوزیت عدد ۲۲۰HV برآورد شد.

مشاهده می‌شود. لطمه‌های سطحی در این نمونه عمیق‌تر بوده و کندگی‌هایی درخوراغتنا را در نمونه پدید آورده است. همچنین در این تصویر می‌توان به حضور ترک‌هایی پی برد که تا اعماق سطح ادامه یافته‌اند و در واقع منشاء کندگی‌های سطح هستند. در شکل ۶ ج، سطح سایش برای نیروی ۱۵N مشاهده می‌شود. شدت صدمه‌های وارده در این نمونه بسیار عمیق بوده و صفحاتی با عمق زیاد از محل سایش کنده شده‌اند. همچنین در شکل (۶ د) که نمای دیگری از سطح همین نمونه را نشان می‌دهد، می‌توان به گودی حاصل از کنده‌شدن صفحات در محل ریشه‌دواندن ترک‌ها و همچنین صفحات دیگری که از همان محل کندگی‌های قبلی در آستانه کنده‌شدن هستند، توجه کرد. با توجه به شکل سطح نمونه‌های آسیب‌دیده و شیارهای ایجاد شده در اثر کندگی ورقه‌ها می‌توان ابعاد تقریبی آن‌ها را در محدوده ۵۰μm تخمین زد.

نکته با اهمیت درباره این کامپوزیت خاص، جنس نرم و منعطف زمینه مسی و نیز توانایی کار سختی‌پذیری آن در هم‌نشینی با ذرات سخت تنگستنی است. تلفیق این زوج با توجه به تنش‌های برشی شدید ایجاد شده روی سطح ماده، امکان شکل‌گیری تغییر فرم پلاستیک شدید در سطح ماده [۲۰] و متعاقباً جوانه‌زنی و گسترش ترک‌ها در زیر سطح تغییر فرم‌یافته را بسیار زیاد نموده [۲۱] و در نهایت منجر به وقوع پروسه سایشی ورقه‌ای شدن می‌گردد. ضمناً شایان ذکر است که محصول تولید شده از این روش، از مزیت چشمگیر دانسیته‌ای بسیار نزدیک به دانسیته تئوری برخوردار است که فی‌نفسه به معنی کمینه‌کردن تخلخل‌ها بوده و امکان فعال شدن پروسه‌های سایشی تخلخل محور را کاهش می‌دهد. اگر چه در روش‌های سنتی، تولید این کامپوزیت نظیر نفوذدهی مس مذاب در اسکلت تنگستن، درصد تخلخل و نقش آن در تخریب سایشی بالاست [۱۲ و ۱۵]، در روش جاری درصد بسیار پایین تخلخل جایی برای پروسه‌هایی سایشی از آن دست باقی نمی‌گذارد.

پس از مشاهده نتایج ریزساختاری سایش، در این قسمت به بررسی اطلاعات گردآوری‌شده از تست سایش می‌پردازیم. نمودار کاهش حجم در اثر سایش بر اساس مسافت پیموده‌شده برای نمونه‌ها، دربردارنده نکات مهمی است که رسم آن را الزامی می‌کند. بدین منظور کاهش جرم اندازه‌گیری شده در مسافت‌های ۲۵، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰، ۵۰۰، ۷۵۰ و ۹۰۰ متر ابتدا به کمک رابطه معکوس جرم و چگالی (رابطه ۳) به کاهش حجم تبدیل شد [۲] و سپس نمودار کاهش حجم براساس مسافت طی‌شده رسم گردید.

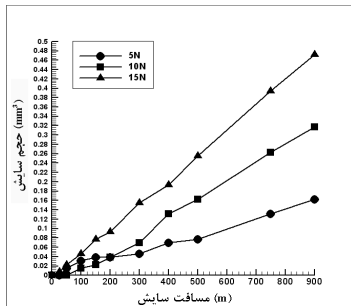


(ب)

(الف)

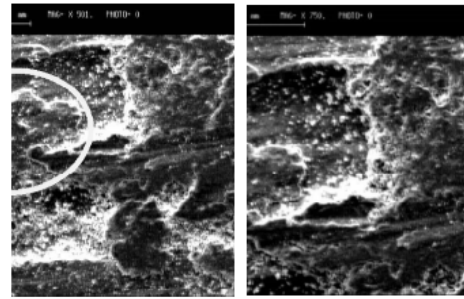
در چشم‌اندازی کلی به بحث مکانیزم‌ها، مودها و پروسه‌های سایشی، توافق گسترده‌ای بر وجود هفت مود سایشی مجزا (۱). خراشان، ۲. چسبان، ۳. سیلانی، ۴. خستگی، ۵. شیمیایی (یا

۷ دیدنی است. در این شکل به ترتیب نرخ‌های کاهش حجمی معادل x, y و z برای نیروهای ۵، ۱۰ و ۱۵ نیوتن محاسبه‌شدنی است.



شکل (۷): نمودار انطباقی کاهش حجم بر اساس مسافت سایشی برای همه نیروها

در مرحله بعد نرخ سایش برای تمامی نیروها محاسبه‌شده و با هم مقایسه شد. ضمناً به‌منظور امکان مقایسه میان عملکرد سایشی نانوکامپوزیت تنگستن‌مس تولیدی از روش ترموشیمیایی با کامپوزیت‌های تجاری تنگستن‌مس، نمودار انطباقی نرخ سایش این دو در شکل (۸) بررسی شده است. همان‌طور که در تصویر نیز مشخص است، با افزایش نیروی عمودی از ۵ به ۱۰ و سپس ۱۵ نیوتن، نرخ سایش از m به n و p افزایش یافته که در تایید استدلال‌های مربوط به نمودارهای کاهش حجم است. به‌عبارت دیگر با افزایش نیرو، میزان حجم نابودشده و جدا شده از جسم در طول مسافت‌های یکسان افزایش یافته است. به‌علاوه داده‌های سایشی مربوط به نمونه کامپوزیت تجاری در تمامی نیروها نرخ سایشی بالاتر از نمونه نانو به‌نمایش گذاشتند. بدین ترتیب که نرخ‌های سایشی معادل a, b و c در نیروهای ۵، ۱۰ و ۱۵ نیوتن برای کامپوزیت تجاری محاسبه شد که در مقایسه با نیروی مشابه اعمالی به کامپوزیت ساخته‌شده به روش مطروحه در این مقاله میزان w٪ رشد نشان می‌دهد.



(د) (ج)

شکل (۶): تصویر SEM کامپوزیت ساییده‌شده در الف (N5، ب) N10، ج) N15، و د) N15

نمودار انطباقی کاهش حجم بر اساس مسافت سایشی در نیروهای ۵، ۱۰ و ۱۵ نیوتن در شکل (۷) قابل مشاهده است.

$$\Delta V(\text{mm}^3) = [\Delta m(\text{g}) / \delta (\text{g}/\text{cm}^3)] \times 1000 \quad (3)$$

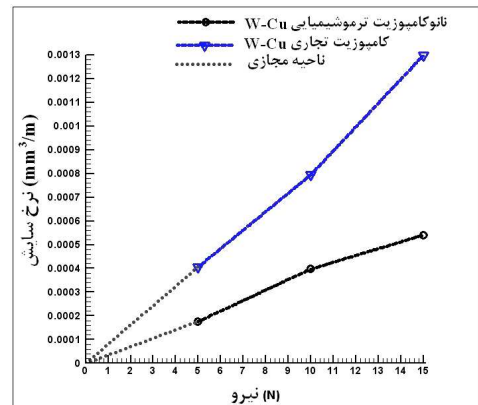
با توجه به اینکه میزان عمده‌ای از کاهش حجم با توجه به مطالعات ریزساختاری، ناشی از کنده‌شدن صفحات کارسخت شده است، در نیروی ۵N که کمترین امکانات برای این پدیده فراهم است، کمترین کاهش حجم مشاهده می‌شود. در حقیقت پروسه ورقه‌ای شدن در این کامپوزیت، فرایندی تدریجی و گام‌به‌گام است که به نوبه خود به مراحل قبلی نظیر جداشدن ذرات مقاوم‌ساز (تنگستن)، کارسختی سطح، شکل‌گیری تنش‌های زیر سطحی و جوانه‌زنی ترک‌ها وابسته بوده [۲۴] و در نتیجه، ظهور آن می‌تواند با توجه به کیفیت و کمیت پارامترهای سایش (نیروی عمودی، سرعت، دما، رطوبت) تسریع شود یا به تعویق افتد [۲۵]. از همین رو در نیروی ۵ نیوتن به‌علت پایین بودن نسبی تنش، فرایند ورقه‌ای شدن به تعویق افتاده و در مسافت‌های سایشی طولانی‌تر بروز می‌یابد. در شکل ۶ الف، نیز تنها خروج ذرات از سطح که به‌صورت ذرات برفک‌مانند دیده می‌شوند و یا تراشه‌های بسیار نازک مشاهده شده و شکل‌گیری ورقه‌ای شدن شدید هنوز به وقوع نپیوسته است. با افزایش نیرو و متعاقباً افزایش تغییر فرم پلاستیک و کارسختی، نرخ ورقه‌ای شدن افزایش یافته و کاهش حجم شدت می‌گیرد که اثرات مورفولوژیک آن در اشکال (۶ ب، ج، د) و اثرات کمی آن در شکل

نشان از توان بیشتر نیروهای بالا در تبدیل انرژی به ساییدگی و کندگی ماده دارد. به همین طریق پیش‌بینی‌شدنی است که پارامترهای دیگری که توان افزایش تزریق انرژی یا افزایش آهنگ تزریق انرژی به سیستم را دارند، می‌توانند پدیده سایش را تسریع کنند. برای مثال افزایش حجم تخریبی در مسافت‌های یکسان سایش برای سرعت‌های بالاتر که دربردارنده افزایش آهنگ تزریق انرژی به سیستم است، دور از تصور نیست.

۴. نتیجه‌گیری

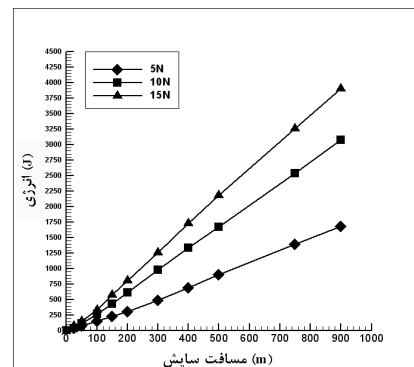
در این تحقیق کامپوزیت W-25wt%Cu به روش رسوب‌دهی همگن ترموشیمیایی با موفقیت ساخته شد. روش مذکور برای تولید نانوپودر کامپوزیتی این دو عنصر فلزی استفاده شد که متعاقب تف‌جوشی حالت مایع تحت اتمسفر کنترل‌شده هیدروژنی به تولید کامپوزیت متراکم جامد با چگالی نزدیک به ۹۸٪ میزان دانسیته تئوری و سختی معادل ۲۲۰HV منجر شد. همچنین متناسب با کاربردهای این ماده، مطالعات سایشی بر روی این ماده انجام شد که مختصراً نتایج زیر را در پی داشت. مود غالب سایشی در این ماده، خستگی و پروسه فعال در آن، ورقه‌ای‌شدن تشخیص داده شد. با افزایش نیروی عمودی از ۵ به ۱۰ و سپس ۱۵ نیوتن، نرخ سایش از m به n و p و نرخ کاهش حجم از x به y و z افزایش یافت. تغییر نرخ سایش با نیروی عمودی به صورت خطی از دیگر یافته‌های تأمل‌برانگیز تحقیق حاضر بود.

به‌علاوه، با افزایش نیروی عمودی از ۵ به ۱۰ و ۱۵ نیوتن، شیب نمودار «انرژی استهلاکی - مسافت سایش» به ترتیب از $a \text{ J/m}$ به $b \text{ J/m}$ و $c \text{ J/m}$ افزایش یافت ($X\%$ افزایش از ۵ به ۱۰ نیوتن و $Y\%$ از ۵ (یا ۱۰) به ۱۵ نیوتن) که نشان از توان بالاتر نیروهای بالا در تزریق انرژی به ماده و ایجاد تخریب سایشی داشت. بر اساس شیب ثابت نمودار «انرژی استهلاکی - مسافت سایش»، مکانیزم سایش در طول فرایند سایش در هر کدام از نیروها بدون تغییر می‌ماند.



شکل (۸): نمودار انطباقی نرخ سایش نانوکامپوزیت تنگستن‌مس تولیدی از روش ترموشیمیایی با کامپوزیت‌های تجاری تنگستن‌مس

از آنجا که انرژی مستهلاک شده در فرآیند سایش عمدتاً صرف ساییدن ماده و کندن آن می‌شود، میزان این انرژی معرف خوبی از مکانیزم سایش است [۲۶، ۲۷]. از این رو نمودار انرژی مستهلاک‌شده - مسافت سایش برای این کامپوزیت در شکل (۹) رسم شده است. این نمودار با استفاده از انتگرال‌گیری از نمودار نیرو-مسافت که توسط پردازشگر دستگاه سایش ثبت شده بود فراهم شد.



شکل (۹): نمودار انطباقی انرژی استهلاکی مسافت برای همه نیروها

همان‌طور که مشخص است تمامی نمودارها دارای شیب ثابتی هستند که در تمامی طول پروسه بدون تغییر می‌ماند (شیب $a \text{ J/m}$ برای نیروی ۵ نیوتن، $b \text{ J/m}$ برای نیروی ۱۰ نیوتن و $c \text{ J/m}$ برای نیروی ۱۵ نیوتن). این مسئله نشان از تغییر نکردن مکانیزم سایش در طول پروسه دارد. ضمناً با افزایش نیرو، شیب خط افزایش یافته که

- [1] Kainer, K. U. *Metal Matrix Composites*. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2006.
- [2] Caceres, P. G. "Effect of microstructure on the abrasive wear properties of infiltrated tungsten alloys". *Materials Characterization* 49: 1-9, 2002.
- [3] Nayeb-Hashemi, H., Vaziri, A. and Ziemer, K. "Wear resistance of Cu-18 vol.% Nb (P/M) composites". *Materials Science and Engineering A*, (1-2): 390-396, 2008.
- [4] Jahan, M. P., Wong, Y. S. and Rahman, M. "A study on the fine-finish die-sinking micro-EDM of tungsten carbide using different electrode materials". *Journal of Materials Processing Technology*, 209:3956-67, 2009.
- [5] Da Costa, F. A., Da Silva, A. G. P. and Gomes, U. U. "The influence of the dispersion technique on the characteristics of the W-Cu powders and on the sintering behavior". *Powder Technology*, 134: 123, 2003.
- [6] Sabirov, I. and Pippan, R. "Formation of a W-25%Cu nanocomposite during high pressure torsion". *Scripta Materialia*, 52: 1293-8, 2005.
- [7] Cheng, J., Lei, C., Xiong, E., Jiang, Y. and Xia, Y. "Preparation and characterization of W-Cu nanopowders by a homogeneous precipitation process". *Journal of Alloys and Compounds*, 421: 146-150, 2006.
- [8] Ardestani, M., Arabi, H., Rezaie, H. R. and Razavizadeh, H. "Synthesis and densification of W-30 wt%Cu composite powders using ammonium meta tungstate and copper nitrate as precursors". *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 27: 796-800, 2009.
- [9] Ardestani, M., Arabi, H., Razavizadeh, H. and Rezaie, H. R. "The effect of sintering temperature on densification of nanoscale dispersed W-20-40wt%Cu composite powders". *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 27: 862-867, 2009.
- [10] Hashempour, M., Razavizadeh, H., Rezaie, H. R. and Salehi, M. T. "Thermochemical preparation of W-25%Cu nanocomposite powder through a CVT mechanism". *Materials Characterization*, 60: 1232-1240, 2009.
- [11] Aboud, T., Weiss, B. Z. and Chaim, R. "Mechanical alloying of the immiscible system W-Cu". *Nanostructured Materials*, 6: 405, 1991.
- [12] Deshpande, P. K., Li, J. H. and Lin, R. Y. "Infrared processed Cu composites reinforced with WC particles". *Materials Science and Engineering, A* 429: 58-65, 2006.
- [13] Wenge, C., Zhanying, K., Hongfang, S. and Bingjun, D. "Arc erosion behavior of a nanocomposite W-Cu electrical contact material". *Rare Metals*, 25 (1):37, 2006.
- [14] Wenge, C., Zhanying, K. and Bingjun, D. "Preparation and Arc Breakdown Behavior of Nanocrystalline W-Cu Electrical Contact Materials". *Journal of Materials Sciences and Technology*, 21 (6):875-878, 2005.
- [15] Deshpande, P. K. and Lin, R. Y. "Wear resistance of WC particle reinforced copper matrix composites and the effect of porosity". *Materials Science and Engineering, A* 418: 137-145, 2006.
- [16] Hashempour, M., Razavizadeh, H., Rezaie, H. R., Hashempour, M. and Ardestani, M. "Chemical mechanism of precipitate formation and PH effect on the morphology and thermochemical coprecipitation of W-Cu nanocomposite powders". *Mater. Chem. Phys.*, 123: 83-90, 2010.
- [17] Honga, S. H., Kima, B. K and Munir, Z. A. "Synthesis and consolidation of nanostructured W-10-40 wt.% Cu powders". *Materials Science and Engineering, A* 405: 325-332, 2005.
- [18] Hashempour, M., Rezaie, H. R., Razavizadeh, H., Mehrjoo, H., Salehi, M. T. and Ardestani, M. "Investigation on fabrication of W-Cu nanocomposite via a thermochemical co-precipitation method and its consolidation behavior", *Proceedings of the 5th International Conference on Diffusion in Solids and Liquids (DSL)*, Rome, Italy, 2009.
- [19] Prasad, S.V., Rohatgi, P. K. and Kosel, T. H. "Mechanisms of material removal during low stress and high stress abrasion of aluminum alloy-zircon particle composites". *Mater. Sci. Eng.*, 80 (2) : 213-220, 1986.
- [20] Lu, D., Gu, M. and Shi, Z. "Materials transfer and formation of mechanically mixed layer in dry sliding wear of metal matrix composites against steel". *Tribol*, 6: 57-61, 1999.
- [21] Wilson, S. and Ball, A. "Advances in Composites Tribology, Performance of Metal Matrix Composites under Various Tribological Conditions". Elsevier, Amsterdam, 8: 311, 1993.
- [22] Bhushan, B. (Editor-in-Chief). 2001. *Modern Tribology Handbook*, Chapter 7: Wear Mechanisms, chapter contributors: Kato, K., Adachi, K., CRC Press LLC, Mechanics and materials science series, Boca Raton, 2001.
- [23] Stachowiak, G. W. *WEAR - MATERIALS, MECHANISMS AND PRACTICE*. Chapter 2, 2006. *Classification of Wear Mechanisms/Models*, Chapter contributor: Kato, K., John Wiley & Sons Ltd, England.
- [24] Ludema, K. C. *Friction, Wear, Lubrication; A Textbook in Tribology*. CRC Press LLC, US, 1996.
- [25] Hegazy, A. A., Abdallah, M., Ibrahim, A. and Mostafa, S. F. 2010. Effect of Processing Parameters on the Mechanical Properties and Wear Behavior of W-Cu Composites, *Research Bulletin of the Australian Institute of High Energetic Materials*.
- [26] Huq, M. Z. and Celis, J. P. "Expressing wear rate in sliding contacts based on dissipated energy". *Wear* 53: 225-229, 1999.
- [27] Ramalho, A. and Miranda, J. C. "The relationship between wear and dissipated energy in sliding systems". *Wear*, 260: 361-367, 2006.