

افزایش مقاومت به سایش زیرلایه مسی پوشش داده شده با نانوکامپوزیت مس آلومینا به روش احتراق محلولی*

مقاله پژوهشی

احسان محمدی^(۲)هادی نصیری^(۱)

چکیده

یکی از روش‌های نوین برای سنتز سریع و کم‌هزینه نانومواد، سنتز احتراقی در محلول است. در کار ارائه شده از نیترات‌های مس و آلومینیم با نقش اکسیدکنندگی و از اوره به عنوان سوخت و از گرافیت نیز برای ماده کمکی استفاده شد. آزمایش‌ها در ۵ درصد وزنی مختلف فاز آلومینا (۵، ۱۵، ۲۵، ۳۵ و ۴۵) با نسبت سوخت به اکسیدکننده ۱/۲۵ انجام شد و نمودارهای دما برحسب زمان در حین انجام سنتز رسم شد و میزان مقاومت به سایش نمونه‌ها مطالعه شد. نتایج نشان داد در نسبت ۲۵ درصد وزنی فاز آلومینا میزان مقاومت به سایش زیرلایه مسی پوشش داده شده تا حدود برابر افزایش یافت. همچنین میکرو ساختار و فازهای تشکیل شده این پوشش با میکروسکوپ‌های SEM مجهز به TEM EDS و آنالیز XRD بررسی شد که نتایج تولید پوشش نانوکامپوزیتی مس آلومینا را در یک مرحله در اتمسفر هوا تأیید کرد.

واژه‌های کلیدی نانوکامپوزیت مس آلومینا، احتراق محلولی، مقاومت به سایش، دمای احتراق.

The Increase in the Wear Resistance of Copper Substrate Coated by Cu-Al₂O₃ Nanocomposite Through Solution Combustion Method

H. Nasiri

E. Mohammadi

Abstract

Solution Combustion is a new and low costs method in order to synthesis nanomaterials. In the presented investigation, Copper and Aluminum nitrates, Urea and Graphite are used as oxidizer, fuel and auxiliary materials, respectively. All experiments categorized in five groups in terms of percentage of alumina (5, 15, 25, 35 and 45 wt. %) and fuel to oxidizer ratio of 1.25. Time- Temperature diagrams are plotted during reaction and wear tests carried out for all samples. Results showed, sample with 25 wt. % alumina can increase the wear resistance 4 times than non-coated copper substrate. Also, the coating microstructure were investigated by SEM equipped by EDS, TEM and XRD. The results proved synthesis of nanocomposite copper-alumina coating just in one-step.

Key Words Copper-Alumina Nanocomposite, Solution Combustion, Wear Resistance, Combustion Temperature.

* تاریخ دریافت مقاله ۹۷/۱۰/۲۵ و تاریخ پذیرش آن ۹۸/۳/۲۵ می‌باشد.

(۱) نویسنده مسئول: استادیار، گروه مهندسی مواد، دانشکده مهندسی مکانیک و مواد، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران.

Email: nasiri@birjandut.ac.ir

(۲) کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

مقدمه

مس دارای کاربردهای فراوانی در ساخت قطعات مهندسی است. از مهم ترین علل محدودکننده آن پایین بودن خواص مکانیکی در سطح آن مانند مقاومت به سایش و سختی است. استفاده از پوشش های نانوکامپوزیتی راهی مناسب برای رفع این عیب و از طرفی حفظ خواص ذاتی مس است. استفاده از ذرات سرمایی در نقش فاز تقویت کننده مانند SiC ، TiO_2 و Al_2O_3 در میان فاز زمینه مسی از مهم ترین این پوشش هاست. آلومینا به دلیل ارزان بودن و پایداری در دماهای بالا و برخورداری از استحکام مناسب ماده ای مطلوب در نقش فاز تقویت کننده است [1-2].

روش های فراوانی در علم مهندسی سطح برای تولید این پوشش های نانوکامپوزیتی موجود است؛ از مهم ترین آن ها می توان از صنعت آبکاری، پوشش های پاششی، سلژل، رسوب هم زمان و آسیاب کاری نام برد. معایبی در روش های ذکر شده موجود است که استفاده از آن ها را محدود می کند؛ از مهم ترین عوامل می توان به کنترل سخت فرایند پوشش، هزینه بر بودن، زمان بر بودن، نیاز به تکنولوژی پیچیده و عملیات های تکمیلی این روش ها اشاره کرد. بنابراین تولید روش های جدید با راندمان بالا و هزینه پایین ذهن بسیاری از پژوهشگران علاقه مند در این زمینه را به خود مشغول کرده است [3-7]. روش سنتز احتراقی در محلول ترکیبی از احتراق و محلول واکنش پذیر است. معمولاً سنتز احتراقی در محلول شامل واکنش خودپیش رونده در یک محلول از نیترات فلزات و سوخت های مختلف است که ممکن است براساس نحوه انجام سنتز دسته بندی شود. بعد از پیش حرارت دهی تا دماهای مطلوب (۱۵۰ تا ۴۰۰ درجه سانتی گراد)، شعله خودبه خود تمام حجم را در بر می گیرد (حالت حجمی) و به تشکیل محصولات جامد ریز با ترکیب مناسب و همگن منجر می شود. ابتدا محیط واکنش اولیه در یک حالت مایع قرار می گیرد تا امکان مخلوط شدن در سطح مولکولی را فراهم کند. بدین ترتیب اجازه می دهد محصول به صورت دقیق و فرمول بندی یکنواخت ترکیبات و در مقیاس نانو سنتز شود.

دوم، دمای واکنش بالا باعث اطمینان از خلوص و کریستاله بودن محصول می شود. این خصوصیات باعث می شود نیاز به مراحل اضافی برطرف شود؛ یعنی کلسینه محصول در دمای بالا که به صورت متعارف در روشی همانند سلژل مورد نیاز است تا محصول به ترکیب مناسب و کریستاله برسد. سوم، زمان کوتاه فرایند و تشکیل میزان بالایی از گازها در حین انجام واکنش از رشد اندازه ذرات ممانعت می کند و شرایط را برای تولید پودرهای نانواندازه با مساحت سطح ویژه بالا مطلوب می کند. تمام خصوصیات که در بالا برای فرایند سنتز احتراقی در محلول بیان شد، برای کاربردهای متنوعی از جمله کاتالیست ها، سلول های سوختی و بیولوژی مطلوب است [3,8]. اصول سنتز نانومواد به این روش مبتنی بر واکنش های اکسایش احیایی است که بین نیترات فلزات و سوخت ها رخ می دهد. گرمای آزاد شده بر اثر این واکنش ها نیاز به منبع حرارتی خارجی برای ادامه واکنش را از بین می برد [9-11].

سوخت هایی که تاکنون برای فرایند سنتز احتراقی مصرف شده اند، عبارت اند از: اوره، گلايسين، CH ، ODH ، DFH ، TFTA و... با به کار بردن این سوخت ها تعداد زیادی از اکسیدهای فلزات تاکنون سنتز یافته اند. به استثنای اوره و گلايسين، اغلب سوخت های دیگر استفاده شده در فرایند سنتز احتراقی در محلول از مشتقات هیدرازین هستند که به وسیله هیدرات هیدرازین تهیه می شوند، که سرطان زا هستند [2].

در این تحقیق برای اولین بار از روش سنتز احتراقی در محلول برای تولید پوشش های نانوکامپوزیتی مس آلومینا با بالاترین مقدار مقاومت به سایشی ممکن استفاده شده است. علاوه بر این تلاش شده است پوشش مدنظر در یک مرحله و در اتمسفر هوا روی زیرلایه مسی اعمال شود.

جدول ۱ ضرایب مربوط به رابطه (۱) برای تولید پوشش با درصدهای وزنی متفاوت فاز تقویت کننده آلومینا

آلومینا ↓	a	b	c	d	e	f	g	h
۵	۲	۳۰/۳	۶۵/۵	۳۰/۳	۱	۶۵/۵	۱۳۱	۹۷/۳
۱۵	۲	۹	۲۳	۹	۱	۲۳	۴۶	۳۳/۵
۲۵	۲	۴/۸	۱۴/۶	۴/۸	۱	۱۴/۶	۲۹/۲	۲۲/۴
۳۵	۲	۳	۱۱	۳	۱	۱۱	۲۲	۱۷
۴۵	۲	۱/۹	۸/۹	۱/۹	۱	۸/۹	۱۷	۱۳/۸

شد [12]. در این حالت گرافیت باقی مانده در محصول نهایی وجود نخواهد داشت. محاسبه نسبت سوخت به اکسیدکننده برگرفته از روش آقای جین و همکارانش بوده است [13]. مواد اولیه آماده شده در حداقل مقدار آب مقطر (۲ سی سی) حل شدند.

آماده سازی زیرلایه مسی

زیرلایه مسی در ابعاد $10 \times 10 \times 3$ میلی متر برش داده شد. قطعات بعد از دستیابی به ابعاد مدنظر با کاغذ سمباده حاوی SiC پولیش داده شدند. برای چربی زدایی و زدودن هرگونه آلودگی زیرلایه های مسی، در ابتدا با آب مقطر و صابون شست و شو داده شدند و سپس ۱۰ دقیقه در بشر حاوی استون در حمام اولتراسونیک شست و شوی نهایی شدند.

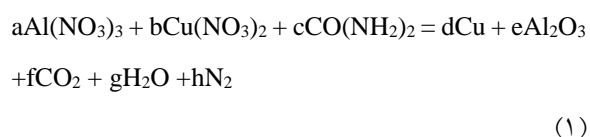
فرایند پوشش دهی

محلول حاوی مواد اولیه روی هات پلت با دمای 300°C درجه سانتی گراد قرار می گیرد. زیرلایه مسی درون ظرف حاوی محلول گذاشته می شود، پس از تبخیر آب و تشکیل زل، احتراق بعد از حدود ۵ دقیقه با سرعت و به صورت حجمی و ناگهانی انجام می شود و پوشش روی زیرلایه می نشیند. از ابزار Data Acquzation مدل Advantech USB4718 برای ترسیم نمودار دما زمان و تحلیل رفتار دمایی نمونه ها از زمانی که محلول روی هات پلت گذاشته می شود تا زمانی که سنتز انجام شود و نمونه پوشش داده شده به دمای محیط برسد، استفاده شد. این دستگاه از طریق کابل USB به کامپیوتر متصل می شود و به وسیله یک سیم ترموکوپل نوع K به

مواد و روش تحقیق

آماده سازی محلول

در این پژوهش از نیترات مس، نیترات آلومینیم به عنوان اکسید کننده ها و از اوره نیز به عنوان سوخت برای تولید پوشش نانوکامپوزیتی مس آلومینا استفاده شد، به طوری که مس در نقش زمینه و آلومینا در نقش فاز تقویت کننده باشند. از گرافیت نیز به عنوان ماده کمکی برای جلوگیری از اکسیداسیون مس فلزی سنتز شده در اتمسفر هوا استفاده شد [12]. گرافیت با نیترات های مس و آلومینیم و اوره قبل از اضافه کردن آب مقطر مخلوط شد. در حین حرارت دهی، محلول همواره در حال هم زده شدن با مگنت با سرعت ۱۴۰ دور بر دقیقه بود. محاسبه نیترات مس و نیترات آلومینیم برای سنتز محصولی حاوی ۵، ۱۵، ۲۵، ۳۵ و ۴۵ درصد وزنی فاز تقویت کننده آلومینا طبق معادله (۱) محاسبه شد. در جدول (۱) ضرایب استوکیومتری رابطه (۱) برای تولید پوششی با نسبت های متفاوت فاز تقویت کننده آلومینا نشان داده شده است.

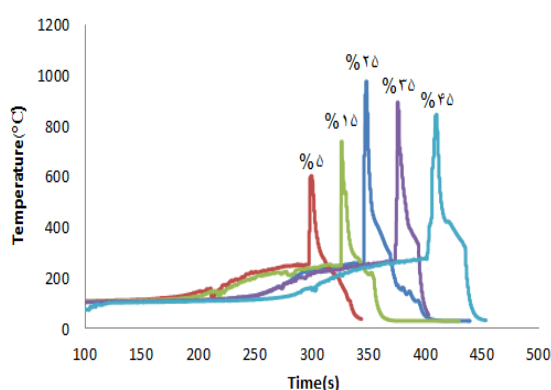


میزان گرافیت اضافه شده براساس رابطه (۲) محاسبه شد.



استفاده از ۲۵ درصد میزان استوکیومتری گرافیت به عنوان بهترین مقدار آن براساس آزمایش ها در نظر گرفته

نسبت‌های متفاوت فاز تقویت‌کننده، پوشش‌دهی در نسبت‌های ۵، ۱۵، ۲۵، ۳۵ و ۴۵ درصد وزنی فاز آلومینا با نسبت سوخت به اکسیدکننده ۱/۲۵ انجام شد. برای درک بهتر رفتار سایشی نمونه‌های پوشش داده شده با درصد‌های متفاوت فاز تقویت‌کننده آلومینا، ابتدا رفتار دمایی حین سنتز بررسی می‌شود. شکل (۱) منحنی دما زمان پوشش‌های تشکیل شده با نسبت‌های متفاوت فاز تقویت‌کننده آلومینا را نشان می‌دهد.



شکل ۱ منحنی‌های دما برحسب زمان در نسبت‌های مختلف فاز تقویت‌کننده آلومینا

همان‌طور که در منحنی‌های شکل (۱) نشان داده شده، مشخص است با افزایش آلومینا از ۵ تا ۴۵ درصد دمای احتراق و اکسایش از حداقل مقدار 600°C برای نمونه با ۵ درصد وزنی آلومینا تا دمای 976°C برای نمونه با ۲۵ درصد وزنی آلومینا افزایش می‌یابد. و اکسایش‌های اکسایش و احیای پی‌درپی در زمان بسیار کوتاه (حدود ۲ تا ۳ ثانیه) سبب افزایش دمای احتراق و اکسایش در سیستم سه‌تایی نیترات مس، نیترات آلومینیم و اوره به دماهای بالای 900°C می‌شود [14]. همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده است، میزان دمای احتراق روندی افزایشی تا ۲۵ درصد وزنی فاز آلومینا از خود نشان می‌دهد. از طرفی دیگر با افزایش مقدار نیترات آلومینیم مصرفی برای تولید آلومینای بیشتر از ۲۵ درصد وزنی در محصول، مقدار نیترات مس در محلول کاهش می‌یابد به طوری که کاسته شدن نیترات مس سبب می‌شود این اکسیدکننده توان فراهم کردن حرارت مورد نیاز برای واکسایش نیترات آلومینیم و اوره را نداشته باشد، زیرا در ابتدا واکسایش

محلول متصل می‌شود. این دستگاه قادر است تا ۱۰۰۰ درجه دمای را در هر ثانیه از محیط واکسایش به کامپیوتر منتقل و منحنی‌های دما زمان را رسم کند.

آزمون‌ها

از دستگاه آزمون سایش ساخته شده در آزمایشگاه طبق روش Pin On Disk آزمون سایش انجام شد. نرخ سایش گزارش شده از تقسیم اختلاف جرم بر مصافت طی شده حین سایش ۵۰ متر به دست می‌آید. این آزمون برای بررسی اثر مقدار درصد وزنی فاز تقویت‌کننده آلومینا بر مقاومت به سایش پوشش ایجاد شده انجام گرفت. این آزمون با درصد‌های وزنی مختلف فاز تقویت‌کننده آلومینای محاسبه شده طبق معادله (۱)، ۵، ۱۵، ۲۵، ۳۵ و ۴۵ درصد با نسبت سوخت به اکسیدکننده ۱/۲۵ انجام شد. برای تعیین فازهای تشکیل شده، آزمایش XRD روی نمونه‌ها انجام شد. برای این آزمون دستگاه (Philips X'pert) با طیف K_{α} مس با طول موج $\lambda=0.15406\text{ nm}$ ، $\theta=0.2^{\circ}$ ، سرعت اسکن نیم تا یک درجه بر دقیقه و از زاویه 90° – 4° بررسی شد.

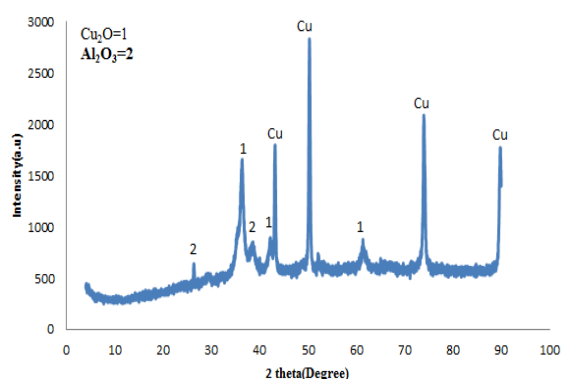
میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل VP1450 محصول کمپانی LEO-Germany برای بررسی ساختار و مورفولوژی پوشش ایجاد شده استفاده شد. میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) مدل CM120 محصول کمپانی Philips برای بررسی نانوذرات آلومینا استفاده شد.

پوشش تشکیل شده روی زیرلایه مسی با محلول واکسایشی با نسبت سوخت به اکسیدکننده ۱/۲۵ از سطح زیرلایه تراشیده شد و در حلال شامل اسیدنیتریک و آب مقطر با نسبت ۱-۱ روی همزن مغناطیسی به مدت نیم ساعت در دمای محیط قرار گرفت تا مس موجود حل شود. پس از حل شدن مس موجود محلول به دست آمده از کاغذ صافی عبور داده می‌شود. محصول باقی مانده روی کاغذ صافی یک ساعت در آن در دمای 70°C در ساعتی گراد قرار گرفت. سپس برای آنالیز TEM فرستاده شد.

نتایج و بحث

برای بررسی مقاومت به سایش پوشش ایجاد شده در

سایشی پوشش‌های تولیدی در ۲۵ درصد وزنی فاز تقویت‌کننده آلومینا به دست آمده است، بنابراین با بررسی رفتار سایشی و ریزساختار، فازهای تشکیل شده در این مقدار فاز تقویت‌کننده آلومینا انجام گرفت. شکل (۳) الگوی XRD مربوط به نمونه پوشش داده شده روی زیرلایه مسی با نسبت سوخت به اکسیدکننده ۱/۲۵ و استفاده از ۲۵ درصد وزنی میزان استوکیومتری گرافیت را نشان می‌دهد.



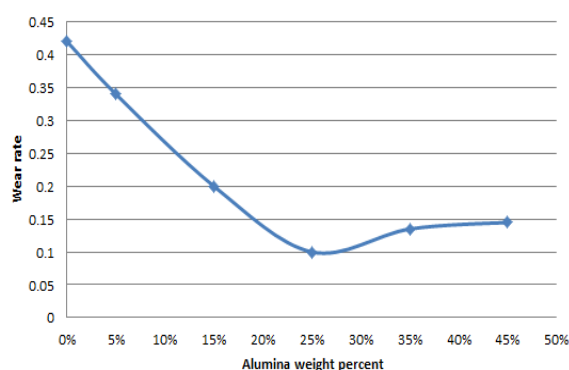
شکل ۳ الگوی تفرق اشعه ایکس برای نمونه پوشش داده شده با نسبت سوخت به اکسیدکننده ۱/۲۵ و استفاده از ۲۵ درصد وزنی فاز تقویت‌کننده آلومینا

شکل (۳) تشکیل فازهای مس و آلومینا را نشان می‌دهد. حضور ترکیبات احیاکننده در سوخت سبب انجام واکنش‌های اکسایش کاهش حین سنتز می‌شود. از طرفی دیگر حضور گرافیت در محلول مانع از اکسیداسیون مس سنتز شده در اتمسفر هوا می‌شود [16]. شکل (۴) میکروساختار از پوشش تشکیل شده در نسبت ۱/۲۵ سوخت به اکسیدکننده و استفاده از ۲۵ درصد میزان استوکیومتری گرافیت را نشان می‌دهد.

از خصوصیات سنتز احتراقی در محلول، تشکیل گازهای فراوان در حین احتراق است [8]. نیترات مس، نیترات آلومینیم و اوره موجود در محلول طبق واکنش ۱ روی سطح زیرلایه باهم ترکیب شده‌اند و محصول به دست آمده حاوی گازهای CO_2 ، N_2 و H_2O فراوان است که خروج این گازها در زمان کوتاه، خلل و فرج‌های فراوانی روی سطح از

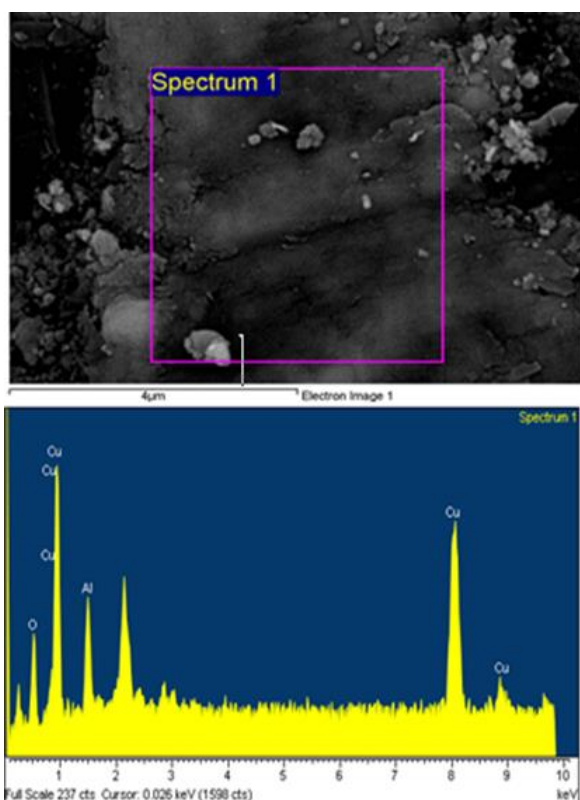
بین نیترات مس و اوره شروع می‌شود و حرارت آزاد شده به وسیله آن سیستم واکنشی نیترات آلومینیم و اوره را فعال می‌کند. به این ترتیب دمای احتراق محلول در نسبت‌های بیشتر از ۲۵ درصد کاهش می‌یابد.

پس از بررسی رفتار دمایی پوشش ایجاد شده با نسبت‌های متفاوت آلومینا، رفتار سایشی نمونه‌های پوشش داده شده با درصد‌های متفاوت فاز آلومینا مطالعه شد. مقادیر نرخ سایش برحسب درصد‌های متفاوت فاز تقویت‌کننده آلومینا در شکل (۲) نشان داده شده است.



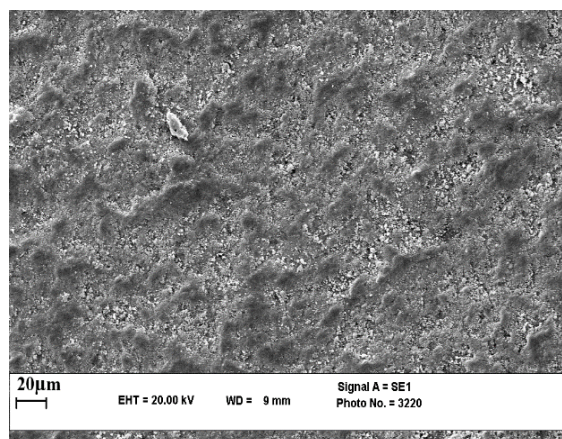
شکل ۲ منحنی تغییرات نرخ سایش با درصد‌های وزنی مختلف فاز تقویت‌کننده آلومینا

همان‌طور که در منحنی نرخ سایش شکل (۲) نشان داده شده است، با افزایش درصد فاز آلومینا از ۵ تا ۲۵ درصد وزنی مقاومت به سایش نیز افزایش یافته است که به دلیل افزایش دمای احتراق در محلول و در نتیجه افزایش چسبندگی بین پوشش و زیرلایه است. به بیان دیگر، افزایش دما سبب برقراری پیوند محکم‌تری بین فاز تقویت‌کننده، زمینه و زیرلایه می‌شود. همچنین در دمای بالاتر از ۹۰۰ درجه سلسیوس فاز گاما آلومینا به آلفا تبدیل می‌شود که این مسئله نیز باعث افزایش بیشتر مقاومت به سایش می‌شود [15]. با افزایش بیشتر فاز تقویت‌کننده آلومینا از ۲۵ تا ۴۵ درصد وزنی، دمای احتراق کاهش پیدا می‌کند و در نتیجه از چسبندگی پیوند ذرات آلومینا با زمینه کاسته می‌شود و به تبع آن مقاومت به سایش کاهش پیدا می‌کند. با توجه به نتایج، بهترین خواص

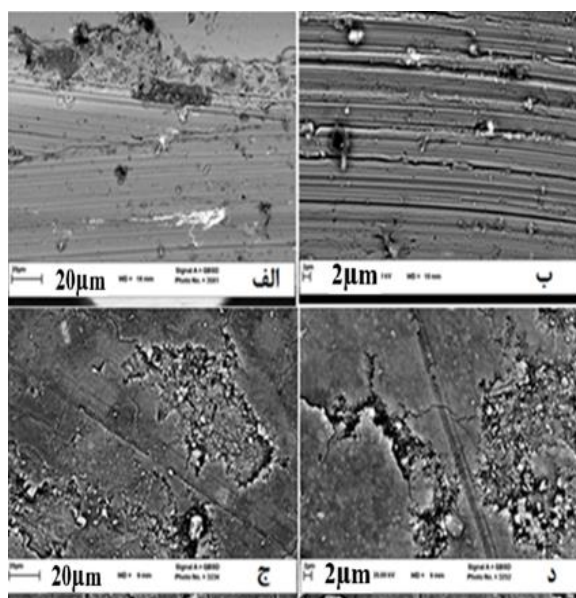


شکل ۵ آنالیز EDS مربوط به نمونه پوشش داده شده با نسبت سوخت به اکسیدکننده ۱/۲۵

خود برجا می‌گذارد. با فراترفتن نسبت سوخت به اکسیدکننده به بالاتر از نسبت استوکیومتری، میزان خروج گازها در هنگام سنتز بیشتر نیز می‌شود [15,17]. همان‌طور که شکل (۴) نشان می‌دهد، سطح پوشش تشکیل شده به این روش حاوی تخلخل فراوانی است که با توجه به نسبت ۱/۲۵ برای سوخت به اکسیدکننده قابل تفسیر است.

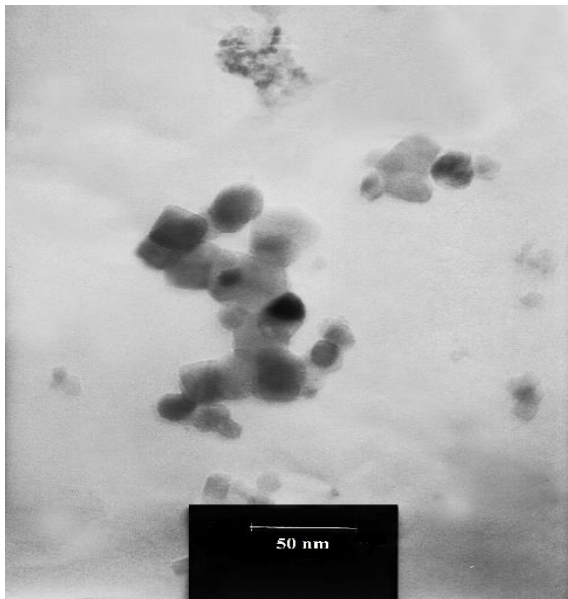


شکل ۴ میکروساختار حاصل از نمونه پوشش داده شده با نسبت سوخت به اکسیدکننده ۱/۲۵ و ۲۵ درصد وزنی فاز تقویت کننده آلومینا



شکل ۶ میکروساختار مربوط به سطح نمونه سایش قبل و پس از پوشش دهی، الف و ب: نمونه بدون پوشش، ج و د: نمونه پوشش داده شده

شکل (۵) آنالیز EDS از نمونه پوشش داده شده را نشان می‌دهد. حضور پیک مربوط به مس، آلومینیم و اکسیژن مربوط به فازهای تشکیل شده مس و آلومیناست. قابل ذکر است پیک شناسایی شده که علامت ندارد، به عنصر پلاتین مربوط است که ناشی از پوشش مربوط به آماده سازی برای تصویربرداری با SEM است. شکل (۶-ب) و (۶-الف) مربوط به سطح نمونه بدون پوشش در بزرگ‌نمایی‌های ۲۰۰۰ و ۵۰۰۰ برابر است و شکل (۶-ج و ۶-د) مربوط به سطح نمونه پوشش داده شده در همان بزرگ‌نمایی‌هاست.



شکل ۷ تصویر TEM گرفته شده از نانوذرات آلومینا

نتیجه گیری

- باتوجه به آزمایش ها و نتایج می توان موارد زیر را بیان کرد:
۱. بالاترین دمای پوشش دهی و مقاومت به ساییش در نسبت ۲۵ درصد وزنی فاز تقویت کننده آلومینا به دست آمد.
 ۲. بهترین نتیجه، افزایش ۴ برابری مقاومت به ساییش سطح پوشش داده شده را نسبت به فلز پایه نشان داد.
 ۳. پوشش نانوکامپوزیتی مس آلومینای تشکیل شده به روش سنتز احتراقی در محلول در عین چسبندگی بالا حاوی خلل و فرج بسیاری است.
 ۴. این پوشش فقط با یک مرحله سنتز و در اتمسفر هوا روی زیرلایه مسی قرار گرفت.
 ۵. اندازه ذرات فاز سرامیکی آلومینای سنتز شده در این تحقیق زیر ۲۰ نانومتر بود.

همان طور که از تصاویر بدون پوشش پیداست، سطح فلز پایه در اثر نیروی وارد شده دچار تغییر شکل پلاستیک شدیدی شده و از طرفی دیگر بر اثر جداسدن لایه ها از سطح فلز پایه و کشیده شدن این ذرات روی سطح، سطح حاوی خراش های عمیقی است. این درحالی است که در سطح نمونه های پوشش داده شده مقدار و عمق خراش ها کاهش چشمگیری یافته است. از طرفی دیگر، منحنی های شکل (۳) هم رشد حدودا ۴ برابری مقاومت به ساییش را در مقایسه با نمونه بدون پوشش نشان می دهد.

نتایج تصاویر SEM گرفته شده بعد از تست ساییش نمونه پوشش داده شده و همچنین شکل (۳) همه نشان از تأثیر مثبت فاز تقویت کننده آلومینا در پوشش نشسته شده است. برای اندازه گیری اندازه ذرات آلومینای سنتز شده از میکروسکوپ الکترونی عبوری استفاده شد. شکل (۷) تصویر TEM نانوذرات آلومینا را پس از انحلال محصول سنتز در اسید نیتریک نشان می دهد.

همان طور که از تصویر TEM پیداست، ابعاد ذرات آلومینای سنتز شده زیر ۲۰ نانومتر هستند. این مسئله به دلیل سرعت بالای انجام سنتز احتراقی در محلول و کم بودن زمان ماندگاری در دمای بالاست که سبب شده است محصول زمان لازم را برای رشد نداشته باشد. از طرفی دیگر خروج میزان زیادی گاز مانع از زینتر شدن ذرات سنتز شده می شود. باتوجه به ابعاد ذرات آلومینای به دست آمده از تصاویر TEM می توان پوشش تولید شده را نانوکامپوزیت نامید. تولید ذرات آلومینا با چنین ابعادی یکی از عوامل ارتقای خواص ساییش پوشش نانوکامپوزیت سنتز شده است.

مراجع

1. Tasbihi, M., Kamila, Kočí, M., Troppová, I., Edelmanová, M., Reli, M., Capek, L., and Schomäcker, R., "Photocatalytic reduction of carbon dioxide over Cu/TiO₂ photocatalysts", *Environmental Science and Pollution Research*, Vol. 25, pp. 34903–34911, (2018).
2. Morshed, M., Titan, C. P., and Khan, J., "Effect of Cu-Al₂O₃ nanocomposite coating on flow boiling performance of a microchannel", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 51, pp. 1135-1143, (2013).

3. Khzouz, M., Joe Wood, J., Bruno Pollet, B., and Waldemar Bujalski, W., "Characterization and activity test of commercial Ni/Al₂O₃, Cu/ZnO/Al₂O₃ and prepared NiCu/Al₂O₃ catalysts for hydrogen production from methane and methanol fuels", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 38, pp.1664-1675, (2013).
4. Ozbay, N., Yargic, A., and Sahin, R., "Tailoring Cu/Al₂O₃ catalysts for the catalytic pyrolysis of tomato waste", *Journal of the Energy Institute*, Vol. 91, pp. 424-433, (2018).
5. Afkham, Y., Azari, Khosroshahi, R., Kheirifard, R., Taherzadeh Mousavian, R., and Brabazon, D., "Microstructure and Morphological Study of Ball-Milled Metal Matrix Nanocomposites", *Physics of Metals and Metallography*, Vol. 118, pp. 790-800, (2017).
6. Jabłońska, M., Wolkenar, B., Beale, A., Pischinger, S., and Palkovits, R., "Comparison of Cu-Mg-Al-O_x and Cu/Al₂O₃ in selective catalytic oxidation of ammonia (NH₃-SCO)", *Catalysis Communications*, Vol. 105, pp. 5-9, (2018).
7. Ivanova, T., Harizanova, A., Koutzarova, T., and Vertruyen, B., "Study of sol-gel Cu-doped Al₂O₃ thin films: structural and optical properties", *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 514, pp. 1-6, (2018).
8. Mukasyan, A., and Dinka, P., "Novel Approaches to Solution-Combustion Synthesis of Nanomaterials", *International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis*, Vol. 16, pp. 23-35, (2007).
9. Ranga, G., Mishra, B., and Sahu, R., "Synthesis of CuO, Cu and CuNi alloy particles by solution combustion using carbohydrazide and N-tertiarybutoxy-carbonylpiperazine fuels", *Materials Letters*, Vol 58, pp. 3523-3527, (2004).
10. Mukasyan, A. S., and Dinka, P., "Novel Method for Synthesis of Nano-Materials: Combustion of Active Impregnated Layers", *Advanced Engineering Materials*, DOI: 10.10002, (2007).
11. González-Cortés, S. L., and Imbert, F. E., "Fundamentals, properties and applications of solid catalysts prepared by solution combustion synthesis (SCS)", *Applied Catalysis A*, Vol. 452, pp. 117-131, (2013).
12. Nasiri, H., Vahdati Khaki, J., and Zebarjad, S. M., "One-step fabrication of Cu-Al₂O₃ nanocomposite via solution combustion synthesis route", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 509, pp. 5305-5308, (2011).
13. Jain, S. R., and Adiga, K. C., "A New Approach to Thermochemical Calculations of Condensed Fuel-Oxidizer Mixtures". *Combustion and Flame*, Vol. 40, pp. 71-79, (1981).
14. Fathy, A., and El-Kady, O., "Thermal expansion and thermal conductivity characteristics of Cu-Al₂O₃ Nanocomposites", *Materials and Design*, Vol. 46, pp. 355-359, (2013).
15. H. Nasiri, H., Vahdati Khaki, J., and Shahtahmassebi, N., "Effect of alumina percentage on size and superparamagnetic properties of Ni-Al₂O₃ nanocomposite synthesized by solution combustion ", *Materials and Design*, Vol. 109, pp.476-484, (2016).
16. Nasiri, H., Bahrami Motlagh, E., VahdatiKhaki, J., and Zebarjad, S. M., "Role of fuel/oxidizer ratio on the synthesis conditions of Cu-Al₂O₃ nanocomposite prepared through solution combustion synthesis", *Materials Research Bulletin*, Vol. 47, pp. 3676-3680, (2012).

-
17. Xanthopoulou, G., Thoda, O., Roslyakov, S., Steinman, A., Kovalev, D., Levashov, E., Vekinis, G., Sytshev, A., and Chroneos, A., "Solution combustion synthesis of nano-catalysts with a hierarchical structure ", *Journal of Catalysis*, Vol. 364, pp. 112–124, (2018).

