

مشخصه‌یابی لایه سل ژل ایجاد شده روی پوشش‌های WC-12Co تولیدی به

روش HVOF و بررسی رفتار سایشی آن

نرگس عموسلطانی، حمیدرضا سلیمی‌جزی، محمدعلی گل‌عذار

دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان

روح‌الله بیرانوند، علی سعیدی، اردشیر نظامی‌نیا

شرکت فولاد مبارکه اصفهان، اصفهان

(دریافت مقاله: ۹۴/۰۳/۱۳ - پذیرش مقاله: ۹۶/۰۳/۲۴)

چکیده

کاربرد تنگستن یکی از قدیمی‌ترین محصولات متالورژی پودر است که به ماده سخت و مقاوم به سایش شناخته شده است. ترکیب این کاربرد با فلزات نرمی مانند کبالت که به عنوان بایندر عمل کرده، باعث بهبود تافنس می‌شود به گونه‌ای که از شکست ترد جلوگیری می‌شود. در این تحقیق، پودرهای WC-12Co روی زیرلایه فولادی به روش سوخت اکسیژن با سرعت بالا (HVOF) رسوب داده شدند. این پوشش‌ها به دلیل ساختار لایه‌ای و تخلخل در محیط‌های سایشی عملکرد ضعیفی دارند. بنابراین، هدف از انجام این پژوهش، اعمال لایه روی پوشش‌های تنگستن کاربرد - کبالت با روش سل ژل است. ساختار پوشش‌ها توسط آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD) بررسی شده و ضخامت پوشش‌ها توسط نرم‌افزار آنالیز تصویری و با استفاده از تصاویر حاصل از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) تعیین شدند. جهت مطالعه مقاومت به سایش پوشش‌ها در دمای محیط آزمون پین روی دیسک بکار گرفته شد. پوشش آلومینا با ضخامت حدود ۱۴ میکرومتر بر روی پوشش اولیه توسط روش سل ژل ایجاد شد. ضریب اصطکاک پوشش‌ها از ۰/۶ قبل از آب‌بندی به ۰/۳ پس از آب‌بندی کاهش یافت. نتایج نشان داد که مقاومت به سایش پوشش‌ها بعد از فرآیند آب‌بندی از نرخ سایش $5/5 \times 10^{-3}$ به $3/4 \times 10^{-3}$ کاهش یافته است که می‌تواند ناشی از مسدود شدن تخلخل‌ها و ایجاد لایه اکسیدی باشد. واژه‌های کلیدی: پاشش حرارتی، پوشش کامپوزیتی، سل ژل، آب‌بندی، مقاومت به سایش.

Characterization and Wear Behavior of a Coated Sol-Gel Layer on WC/Co Coatings Deposited by HVOF

Narges Amousoltani, Hamidreza Salimijazi, Mohammadali Golozar
Department of Material Engineering, Isfahan University of Technology

Rohollah Beyranvand, Ali saeidi, Ardeshir Nezaminiya

Esfahan's Mobarakeh Steel Company, Esfahan

(Received 3 June 2015, accepted 14 June 2017)

Abstract

Tungsten carbide powders have been known as one of the hardness and wear resistance materials. The combinations of carbide with soft metals such as cobalt as a binder are widely used to improve the wear resistance, toughness and prevent brittle failure. In this research, WC-12Co powders were deposited on steel substrate by high velocity oxygen fuel (HVOF) spraying. Due to the existence of pores and microcracks in the coatings, the corrosion and wear resistance properties of the coatings could be improved by sealing the porosities and cracks via a post deposition treatment. A thin layer of Al₂O₃ were deposited on the HVOF thermally sprayed WC-Co coatings by Sol-Gel method. The phase composition of coatings was investigated by X-Ray Diffraction (XRD) analysis and the morphology and microstructure of the coatings as well as their thicknesses were investigated by Scanning Electron Microscopy (SEM) followed by image analysis. To study the wear resistance of the coatings a pin on disk wear tester was used. The results showed that the coefficient of friction was reduced from 0.6 to about 0.3 after sealing. The wear rates of the sealed coatings were decreased from 5.5×10^{-3} in the as-sprayed coatings to 3.4×10^{-3} in the sealed coatings. The wear resistance of coatings after the sol-gel sealing process was improved due to the filling of the pores and cracks as well as formation of the aluminum and cobalt oxides on the surface during wearing test.

Keywords: Thermal spray, Composite coatings; Sol- Gel; Wear resistance, Sealing.

E-mail of corresponding author: n.amousoltani@ma.iut.ac.ir.

مقدمه

پوشش‌ها از نظر حفاظت سطوح در برابر فرآیندهای تخریب مختلف مانند خوردگی، سایش و اکسیداسیون در دمای بالا اهمیت پیدا می‌کنند. از این رو در بسیاری از کاربردها، پوشش‌های پاشش حرارتی برای حفاظت مواد در برابر فرایندهای تخریب فوق استفاده شده اند [۱]. در سال‌های اخیر فرآیندهای گسترده‌ای از روش‌های پاشش پیشرفت کرده که براساس مبنای ذوب مواد پوشش و حرکت آن در شکل قطرات مذاب به سمت سطح زیرلایه است [۲]. رایج‌ترین مواد سرامیکی برای پاشش شامل انواع مختلف آلومینا، آلومینا/تیتانیا، اکسید کروم و زیرکونیا است. همچنین کاربردهای سمنتیت و دیگر مخلوط‌های فلزی - سرامیکی در کاهش سایش و خوردگی مورد توجه هستند. پودرهای کاربردی تنگستن به وسیله روش‌های مختلفی از جمله HVOF برای تولید پوشش‌های متراکم با سختی زیاد و مقاومت به سایش رسوب داده می‌شوند. میکروساختار و خصوصیات پوشش نه تنها به ترکیب شیمیایی پودرها وابسته است بلکه از استحاله فازی که در طول فرآیند پاشش اتفاق می‌افتد متأثر است [۳]. در این سیستم، اکسیژن و یک گاز سوختنی در فشار و نرخ جریان بالا به محفظه احتراق وارد می‌شود. سپس پودر از طریق یک گاز حامل (نیترژن، آرگون و هلیوم) به داخل محفظه تزریق و پس از آن تا زمانی که به حالت نیمه مذاب یا مذاب برسد حرارت داده می‌شود و با شتاب به سطح زیر لایه منتقل و تولید یک پوشش متراکم با خواص چسبندگی عالی می‌کند [۴]. بدین ترتیب لایه‌ها پشت سر هم پوشش داده می‌شوند و یک ساختار لایه‌ای ایجاد می‌کنند. پوشش‌ها به وسیله حفره‌های بین لایه‌ای در اثر به دام افتادن هوا و تخلخل‌ها ناشی از ذوب ناکافی مواد پوشش یا عدم پوشانی اسپلت‌ها در مقیاس بزرگتر مشخص می‌شوند. تخلخل‌ها و ترک‌ها روی خواص پوشش‌های پاششی تاثیر منفی دارند. کاهش خصوصیات این نوع پوشش‌ها هنگامی که در محیط‌های

خورنده قرار می‌گیرند به دلیل نفوذ سیال به داخل پوشش بارزتر می‌گردد. از جمله کاربردهای اخیر پوشش‌های پاشش حرارتی کاربردی تنگستن استفاده در قالب‌های مس خطوط ریخته‌گری مداوم و جایگزینی آنها با پوشش کرم سخت است. به دلیل نفوذ فلاکس مورد استفاده در این خطوط به داخل پوشش عملاً کارایی پوشش کاهش می‌یابد. تلاش‌های زیادی جهت کاهش تعداد و اندازه حفرات و ترک‌ها با استفاده از بهینه‌سازی پارامترهای رسوب گذاری انجام شده است. با این حال، پوشش با خواص مطلوب را نمی‌توان تنها با تغییر پارامترها به دست آورد. بنابراین زمینه برای آب‌بندی پوشش‌های پاشش حرارتی توسعه داده شده است. با این تعریف، آب‌بندی، عملیات بعد از پاشش است که به معنی پر کردن یا بسته شدن منافذ و ترک‌ها نزدیک سطح با روش‌های مختلفی صورت می‌گیرد. یکی از این روش‌ها ذوب مجدد با لیزر از سطح پوشش است که با موفقیت انجام شده است. این روش به دلیل مشکلاتی مانند ترک خوردگی منطقه مجدد ذوب شده در حین سرد شدن و ایجاد رسوبات درشت محدودیت دارد. روش‌های دیگر شامل نفوذ فلز مذاب، رزین‌های پلاستیکی یا آلومینیم فسفات به داخل پوشش وجود دارد. همچنین، رسوب پوشش اضافی در بالای لایه پاشش داده شده روشی برای آب‌بندی حفره‌ها است. این فرآیند مانند رسوب فیزیکی بخار باعث بهبود خواص تریبولوژیکی نیز می‌شود. یکی از محدودیت‌های عمده در تمام این روش‌ها این است که عملیات آب‌بندی حفره‌ها به طور کامل صورت نمی‌گیرد [۵]. راهکارهایی جهت کاهش تخلخل پوشش‌های پاشش حرارتی برای عملیات آب‌بندی ارائه شده است. یکی از آنها فرآیند سل - ژل در یک حلال با ویسکوزیته کم برای پر شدن حفره‌ها و به دنبال آن هیدرولیز و کندانس شدن و در نهایت آب‌بندی در پوشش‌های تنگستن مونوکارباید-کبالت کروم است. بنابراین، آلومینیم ایزوپروپوکسید در الکل ایزوپروپیل به عنوان محلول

برای آماده‌سازی سطح نمونه‌ها قبل از فرآیند سل-ژل، عملیات چربی‌زدایی و تمیزکاری نمونه‌ها در سه محیط استون، الکل و آب مقطر، هر کدام به مدت ۲۰ دقیقه و با استفاده از حمام التراسونیک انجام شد. پس از آن نمونه‌ها با فشار هوای گرم خشک شده و تا قبل از عملیات پوشش‌دهی در دسیکاتور نگهداری شدند. برای تهیه و ساخت پوشش به روش سل-ژل، ۴ گرم پودر آلومینیم تری ایزوپروپیلایت (C₉H₂₁AlO₃, Merck) در ۱۶ گرم الکل ۲ا و پروپاندیول (C₃H₈O₂, Merck) به مدت ۴ ساعت در دمای ۹۰ درجه سانتیگراد توسط همزن مغناطیسی با سرعتی کم هم زده شد. پس از آماده‌سازی و خشک شدن محلول، عملیات پوشش‌دهی زیرلایه‌ها توسط بازوی مکانیکی و به صورت عمودی انجام شد. در این حالت نمونه‌ها با سرعت ثابت ۲۷ mm/min وارد محلول و از آن خارج شدند. عملیات پیرسازی و خشک کردن زیرلایه‌های پوشش داده شده تحت شرایط کنترل شده و به صورت ۲۴ ساعت در دمای ۱۲۰ درجه سانتیگراد به انجام رسید. عملیات کلسینه کردن پوشش‌های حاصل با استفاده از یک کوره قابل برنامه‌ریزی در دمای ۵۰۰ درجه سانتیگراد و به مدت ۳ ساعت با نرخ گرمایش ۱°C/min ۰/۵ صورت گرفت. علاوه بر این، نمونه‌ها تا رسیدن دمای کوره به دمای محیط از داخل کوره خارج نشدند. لازم به ذکر است که روند توضیح داده شده در بالا مربوط به شرایط بهینه‌سازی شده پوشش‌ها در مرجع [۱] است.

برای اندازه‌گیری ضخامت پوشش‌ها ابتدا به روش مقطع زدن نمونه‌ها و با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل Philips XL 30 و با استفاده از الکترون برگشتی از سطح مقطع پوشش‌ها تصاویر تهیه شد و سپس ضخامت پوشش‌ها توسط نرم‌افزار (TS view) اندازه‌گیری شد. جهت تعیین فاز از پراش پرتوی ایکس استفاده شد. الگوهای پراش توسط دیفرکتومتر پرتو ایکس مدل Xpert Philips با تابش CuK α و طول موج ۱/۵۴۰۴ آنگستروم به دست آمدند. محدوده روبش بین ۲۰ تا ۱۰۰

درزگیر برای این پوشش انتخاب شده است. این روش با موفقیت برای آب‌بندی پوشش‌های پلاسمای زیرکونیایی پایدار شده با ایتیریم و آلومینا استفاده شده است [۱].

بیشتر تحقیقات قبلی بر بررسی رفتار سایشی پوشش‌های کامپوزیتی بعد از فرآیند سل ژل در محیط خورنده متمرکز بوده است و مشخصه‌یابی پوشش‌های ایجاد شده در اثر فرآیند سل ژل بررسی نشده است.

هدف در تحقیق حاضر، بهبود رفتار سایشی پوشش‌های کاربرد تنگستن‌کیالت با اعمال لایه ایجاد شده در اثر فرآیند سل ژل است.

مواد و روش تحقیق

نمونه‌های مورد آزمایش به شکل دیسکی با مساحت ۲cm² ۱۹/۶۲، قطر ۵ سانتی‌متر و ضخامت ۵ میلی‌متر تهیه شدند. زیرلایه‌ها ابتدا تحت فرآیند ماسه‌پاشی و سپس چربی‌زدایی به وسیله استون واقع شدند و میانگین زبری سطح (R_a) آن‌ها در حدود ۱۰-۸ میکرومتر اندازه‌گیری شد. سپس پودر میکروساختار با شماره ۷۱. 0w20 80 توسط روش پاشش حرارتی به کمک دستگاه پرتوان HVOF با مشخصه HP-HVOF K2/GTV, Germany روی سطح زیرلایه‌ها نشانده شد. برای تولید پوشش‌ها، از پارامترهای پاشش پر سرعت ارایه شده در جدول ۱-۱ (که توسط شرکت سازنده بهینه شده است) بهره‌گیری شد.

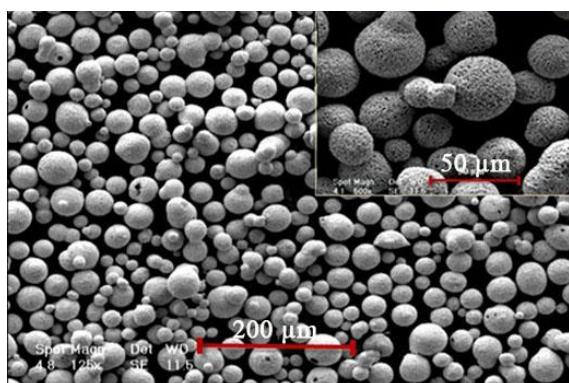
جدول ۱. پارامترهای پوشش‌دهی.

| پارامتر | مقدار |
|-------------------------------|-------|
| فاصله پاشش (سانتی‌متر) | ۳۸ |
| شار اکسیژن (لیتر بر دقیقه) | ۹۰۰ |
| سوخت مایع (لیتر بر دقیقه) | ۰/۴۳ |
| نرخ تغذیه پودر (گرم بر دقیقه) | ۸۰ |

نتایج و بحث

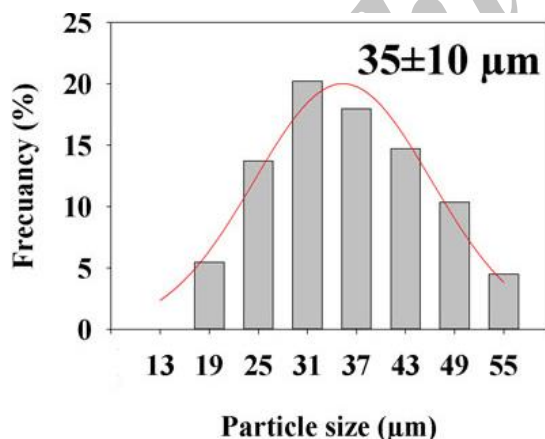
مشخصه یابی ساختار پوشش

مطابق شکل ۱، ذرات پودر آگلومره و تف جوشی شده WC-12Co دارای مورفولوژی کروی و ساختار متخلخل هستند. ذرات پودر متشکل از ذرات تنگستن مونو کارباید بوده که درون زمینه فلزی کبالت قرار گرفته است.



شکل ۱. تصاویر میکروسکوپی الکترونی مورفولوژی ذرات پودر WC-12Co.

نمودار توزیع اندازه ذرات پودر در شکل ۲ مشاهده می شود.



شکل ۲. نمودار توزیع ذرات پودر WC-12Co.

شکل ۳ الگوی پراش پرتوی ایکس پودرهای WC-12Co را نشان می دهد. ذرات پودر شامل فازهای تنگستن مونو کارباید و کبالت است.

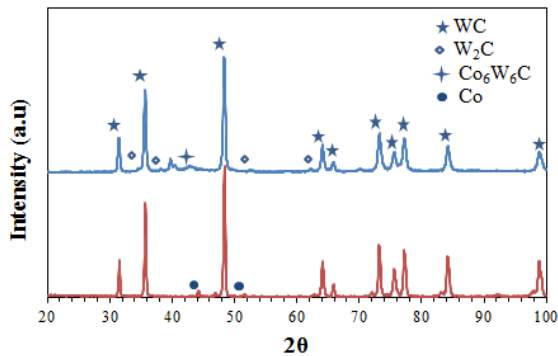
درجه انتخاب گردید. مقاومت به سایش پوشش WC-12Co در دمای محیط، با انجام آزمون گلوله روی دیسک طبق استاندارد ASTM- G99 ارزیابی شد. نمونه های دیسکی شکل آب بندی شده با قطر ۵ سانتی متر تحت عملیات سنباده زنی و پولیش تا دستیابی به میانگین زبری سطح (Ra) در حدود ۱ میکرومتر قرار گرفتند. از گلوله های کاربید سیلیسیم با قطر حدود یک سانتی متر و سختی حدود ۱۲۵۰ ویکرز به عنوان ساینده استفاده شد. پارامترهای آزمون سایش در جدول ۲ ارائه شده است. نرخ سایش پوشش در دمای محیط از طریق اندازه گیری اختلاف جرم نمونه ها قبل و بعد از آزمون سایش و با استفاده از یک ترازوی الکترونیکی با دقت ۰/۰۰۰۱ میلی گرم اندازه گیری شد.

جدول ۲. پارامترهای آزمون سایش گلوله بر روی دیسک.

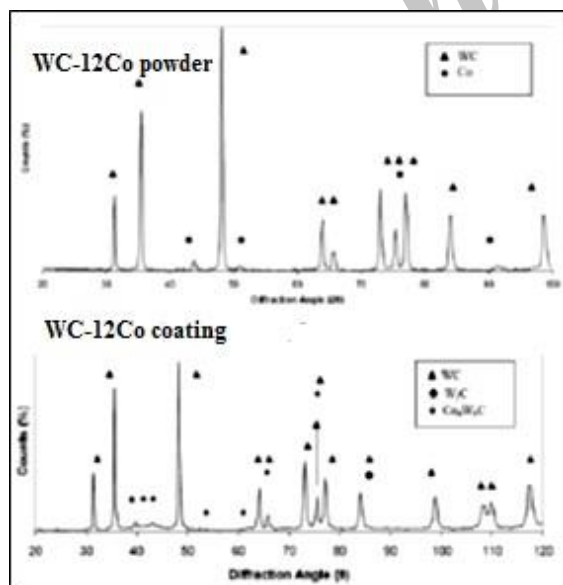
| مقدار | پارامتر آزمون سایش |
|-------|--------------------------|
| ۱۰۰۰ | مسافت لغزش (متر) |
| ۲۰ | نیروی عمودی (نیوتن) |
| ۰/۱ | سرعت لغزش (متر بر ثانیه) |
| ۲۵ | دما (درجه سانتیگراد) |
| ۶۲ | رطوبت (درصد) |

در حین انجام آزمون سایش، پروفیل ضریب اصطکاک به طور پیوسته به ثبت رسید. همچنین جهت تعیین مکانیزهای حاکم بر سایش پوشش ها از میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شد.

الگوی پراش پرتوی ایکس پوشش در شکل ۵ نشان داده شده است. الگوی پراش پرتو ایکس پوشش WC-12Co حضور فازهای تنگستن دی کارباید و η ($\text{Co}_6\text{W}_6\text{C}$) را در ساختار این پوشش نشان می‌دهد. همچنین، هیچ پیکی از فاز زمینه کبالت اولیه در الگوی پراش پوشش مشاهده نمی‌شود. این نتیجه بیان می‌کند فاز کبالت در حین پاشش عمدتاً با کربن و تنگستن واکنش داده و تشکیل فاز η را داده است. واضح است که فاز تنگستن مونوکارباید در حین پاشش پرسرعت پودرها تجزیه و دگرپوره شده است. صحت این نتایج با توجه به مرجع [۶] و شکل ۶ قابل تایید است.

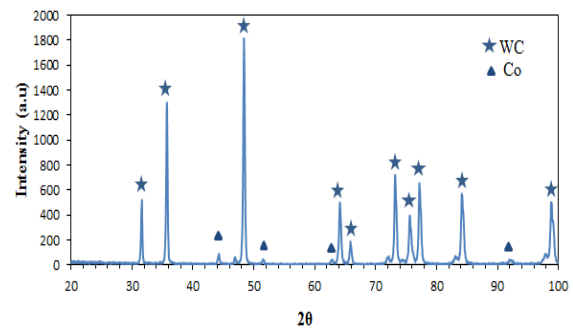


شکل ۵. الگوی پراش پرتوی ایکس پوشش WC-12Co



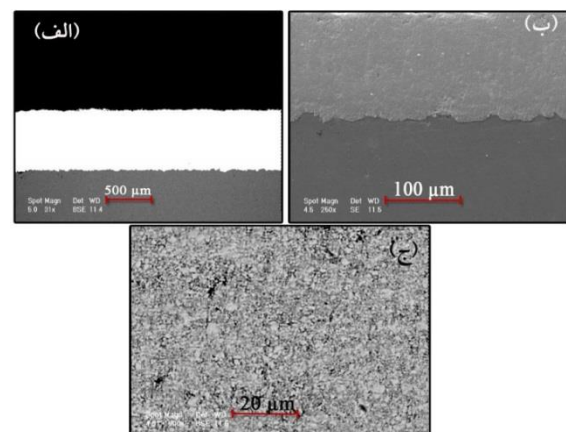
شکل ۶. الگوی پراش پرتوی ایکس پوشش و پودر WC-12Co

[۶].



شکل ۳. الگوی پراش پرتوی ایکس پودر WC-12Co

در شکل ۴ مشاهده می‌شود که در اثر انجام فرآیند پاشش بر سرعت، پوشش‌هایی با ضخامت بیشتر از ۵۰۰ میکرومتر بر روی سطح زیر لایه فولادی به دست آمده است. آنالیز میزان تخلخل پوشش، مقدار تخلخل کمتر از ۷٪ را به دست می‌دهد. نقاط خالی در مقطع پوشش علاوه بر تخلخل می‌تواند به دلیل عدم آماده‌سازی صحیح نمونه باشد که باعث کنده شدن و خارج شدن ذرات WC از ساختار می‌گردد. علت اصلی این مطلب را می‌توان در عدم استفاده از دستگاه‌های اتوماتیک سنباده‌زنی و پولیش در نتیجه تغییرات نامطلوب نیروی وارده و زاویه نمونه نسبت به دیسک گردان سنباده یا پولیش دانست.

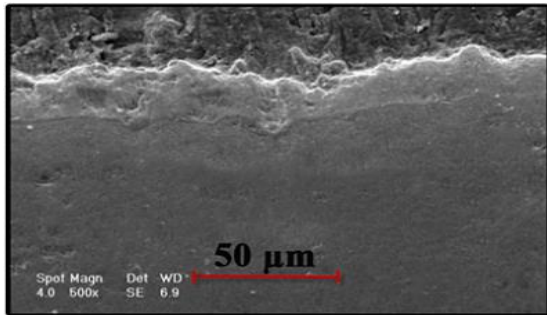


شکل ۴. تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی مقاطع عرضی پوشش WC-12Co در بزرگنمایی‌های مختلف.

فرآیند سل ژل

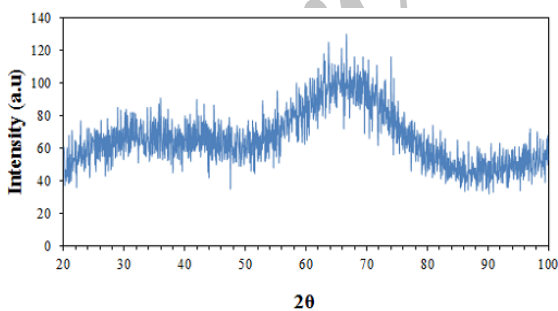
تولید پوشش

دز شکل ۸، مقطع عرضی پوشش ایجاد شده با فرآیند سل ژل، بعد از ۲۴ ساعت پیرسازی و کلسینه شدن در دمای ۵۰۰ درجه سانتیگراد مشاهده می‌شود. ضخامت پوشش ایجاد شده حدود ۱۴ میکرومتر است.



شکل ۹. تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی مقطع عرضی پوشش WC-12Co آب‌بندی شده با فرآیند سل-ژل.

در شکل ۹ الگوی پراش پرتوی ایکس پوشش ایجاد شده با فرآیند سل ژل مشاهده می‌شود. در این الگو، پیک قابل تشخیصی وجود ندارد و آمورف بودن پوشش تأیید می‌شود. با توجه به ساختار آمورف، رفتار خوردگی پوشش را بهبود می‌بخشد، این ساختار مطلوب است.



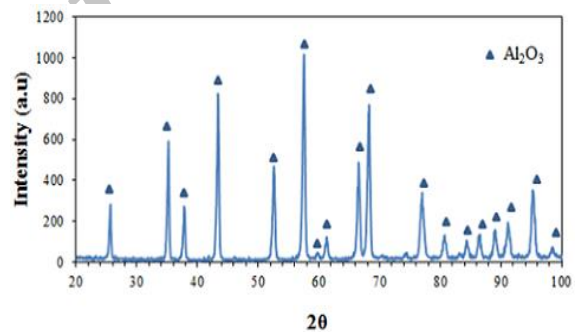
شکل ۱۰. الگوی پراش پرتوی ایکس پوشش ایجاد شده با فرآیند سل ژل بعد از ۲۴ ساعت پیرسازی و کلسینه شدن در دمای ۵۰۰ درجه سانتیگراد.

رفتار سایشی پوشش‌ها

منحنی تغییرات ضریب اصطکاک بر حسب مسافت لغزش برای پوشش WC-12Co و پوشش کامپوزیتی بعد از

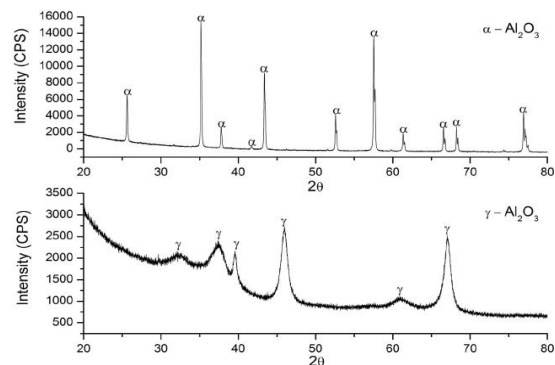
آنالیز پراش پرتوی ایکس پودر

شکل ۷، الگوی پراش پرتوی ایکس پودر آلومینیم‌تری ایزوپروپیل‌ت را بعد از ۲۴ ساعت پیرسازی و کلسینه شدن در دمای ۱۲۰۰ درجه سانتیگراد نشان می‌دهد. با توجه به اینکه پودر مورد نظر در دمای ۱۲۰۰ درجه سانتیگراد کریستالی می‌شود، این دما برای عملیات حرارتی پودر انتخاب شد. تمام پیک‌های موجود در الگوی پراش، از نظر موقعیت پیک و شدت، انطباق خوبی با فاز آلومینیم اکسید دارند. این نتایج با توجه به مرجع [۷] و شکل ۸ قابل تأیید است.



شکل ۷. الگوی پراش پرتوی ایکس پودر آلومینیم‌تری

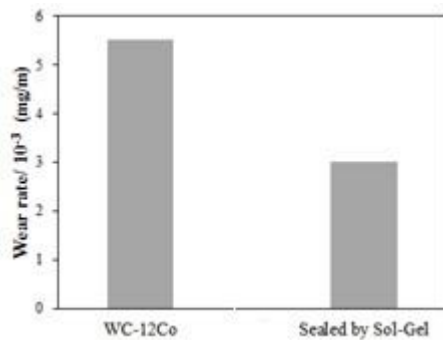
ایزوپروپیل‌ت بعد از ۲۴ ساعت پیرسازی و کلسینه شدن در دمای ۱۲۰۰ درجه سانتیگراد.



شکل ۸. الگوی پراش پرتوی ایکس پودر آلومینیم‌تری

ایزوپروپیل‌ت بعد از ۲۴ ساعت پیرسازی و کلسینه شدن در دمای ۱۲۰۰ درجه سانتیگراد [۷].

میلی‌گرم بر متر، نرخ سایش کمتری را ارائه می‌کنند. این مقادیر، رشد قابل ملاحظه مقاومت به سایش پوشش‌های آب‌بندی شده با فرآیند سل ژل نسبت به پوشش WC-12Co را نشان می‌دهد.

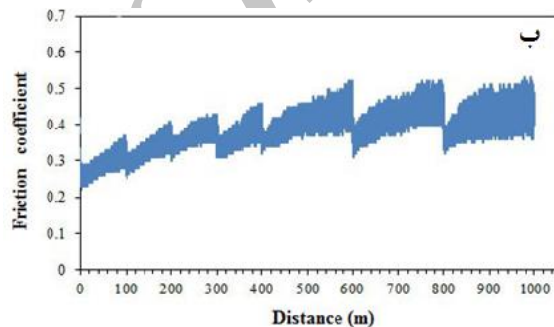
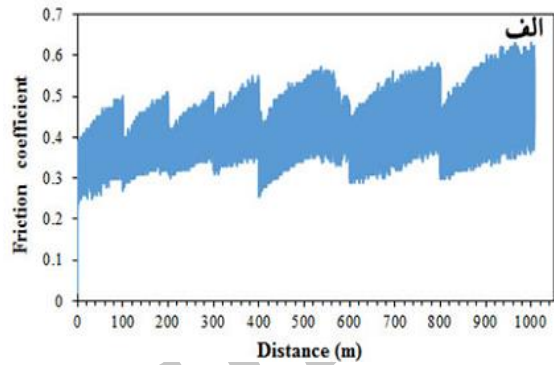


شکل ۱۲. مقایسه نرخ سایش پوشش‌های WC-12Co و پوشش‌های آب‌بندی شده با فرآیند الکتروپلیتینگ و سل ژل.

به منظور ارزیابی دلایل بهبود مقاومت سایشی پوشش آب‌بندی شده، در مقایسه با پوشش کامپوزیتی WC-12Co در دمای محیط، سطوح سایش بوسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به طیف سنج توزیع انرژی مورد مطالعه قرار گرفت.

سطح سایش پوشش WC-12Co در شکل ۱۳ نمایش داده شده است. سطح سایش پوشش کامپوزیتی WC-12Co تشکیل ترک‌های زیر سطحی و در ادامه ورقه‌ای شدن را نشان می‌دهد. ترک‌ها در راستای فازهای ترد موجود در میکروساختار پوشش مانند فاز تنگستن دی‌کارباید و فاز زمینه کبالت غنی از تنگستن، که مسیرهای ترجیحی برای رشد ترک به حساب می‌آیند [۸-۱۰] و نیز در مرز اسپلت‌ها اشاعه یافته و شبکه‌ای از ترک‌های زیر سطحی را ایجاد می‌کنند. این رخداد با جدایش قابل ملاحظه ماده از سطح پوشش‌ها با مکانیزم ورقه‌ای شدن همراه است. با توجه به تصاویر میکروسکوپی الکترون روبشی حضور فیلم سایشی با کنتراست تیره رنگ بر روی سطح سایش پوشش WC-12Co مشاهده می‌شود. نتایج آنالیز طیف سنجی توزیع

فرآیند سل ژل که در دمای محیط و تحت نیروی عمودی ۲۰ نیوتن سایش یافته‌اند، در شکل ۱۰ نشان داده شده است.



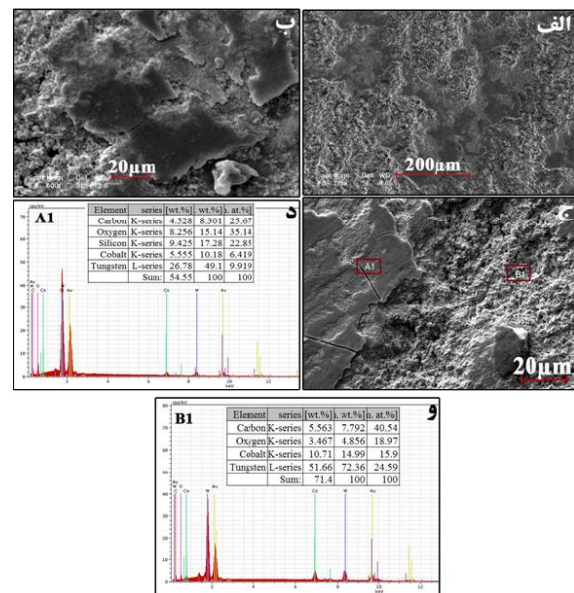
شکل ۱۱. نمودارهای تغییرات ضریب اصطکاک بر حسب مسافت لغزش تحت نیروی ۲۰ نیوتن برای (الف) پوشش کامپوزیتی، (ب) پوشش کامپوزیتی بعد از فرآیند سل ژل.

ضریب اصطکاک پوشش WC-12Co تا مسافت ۳۰۰ متر به مقدار ۰/۵ می‌رسد، سپس مقدار ضریب اصطکاک افزایش یافته و به یک ناحیه پایدار، در محدوده ۰/۴ - ۰/۶ با نوسانات شدید وارد می‌شود. ملاحظه می‌شود که ضریب اصطکاک برای نمونه‌های آب‌بندی شده تا ۰/۳ کاهش می‌یابد. از طرف دیگر، پروفیل ضریب اصطکاک برای پوشش‌های آب‌بندی شده هم به لحاظ ضریب اصطکاک و هم به لحاظ دامنه نوسانات، مقدار کمتری را در مقایسه با پوشش کامپوزیتی WC-12Co ارائه می‌کند. با توجه به شکل ۱۲ نرخ سایش پوشش WC-12Co معادل $5/5 \times 10^{-3}$ میلی‌گرم بر متر اندازه‌گیری شد، در حالی که پوشش‌های آب‌بندی شده با $3/4 \times 10^{-3}$

تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از سطح سایش پوشش‌های آب‌بندی شده در شکل‌های ۱۴ نشان داده شده است. سطوح سایش پوشش‌ها، یک سطح نسبتاً هموار را نشان می‌دهد و مشابه با پوشش WC-12Co ترک‌های زیر سطحی و ورقه‌ای شدن مکانیزم حاکم بر فرآیند سایش است. با توجه به تصاویر میکروسکوپی الکترونی، وسعت فیلم سایش حاصل از سایش در این پوشش‌ها به مراتب کمتر از پوشش WC-12Co است که این یافته کاهش مقدار ماده انتقال یافته از گلوله ساینده سیلیسیم کارباید به سطح پوشش با مکانیزم سایش چسبان را نشان می‌دهد.

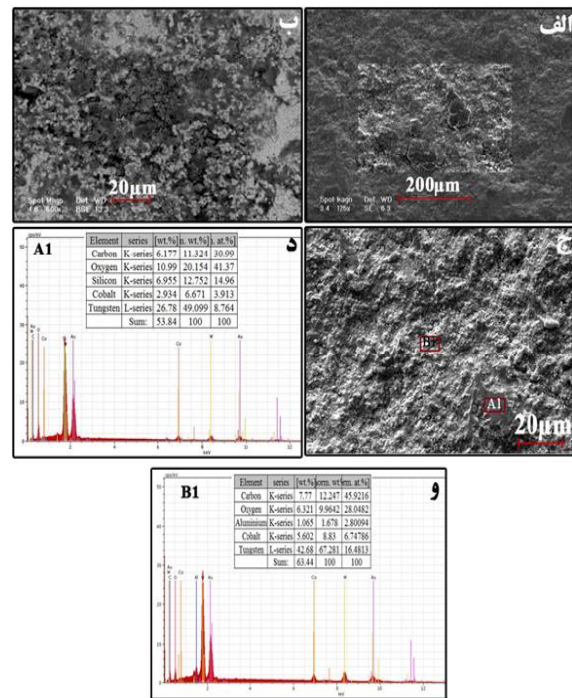
در حین سایش این پوشش‌ها، زمینه فلزی کبالت/آلومینیم که تمایل بالایی برای تغییر شکل پلاستیکی دارند یک لایه‌ی نازک را بر روی فصل مشترک لغزش ایجاد می‌کنند که درون آن ذرات تنگستن مونوکارباید با اتصال نسبتاً قوی قرار گرفته‌اند. بنابراین، ذرات تنگستن مونوکارباید به وسیله زمینه فلزی پشتیبانی شده تا بتوانند عملکرد مقاوم به سایش خود را در برابر گلوله ساینده ارائه دهند. نتیجه این امر، کاهش قابل ملاحظه نرخ سایش در این پوشش‌ها در مقایسه با پوشش WC-12Co است. از سوی دیگر، تشکیل لایه فلزی محتوی ذرات تنگستن مونوکارباید در محل فصل مشترک لغزش، به نحو مؤثری از مساحت سطح واقعی تماس بین پوشش و گلوله ساینده کاسته که پیامد آن کاهش میزان ضریب اصطکاک و نیز افت نوسانات آن، مطابق شکل ۱۱ (ب)، است [۱۱]. این یافته به وسیله تصاویر میکروسکوپی (که بیانگر وسعت کم فیلم سایش یا کنتراست تیره رنگ، به ویژه برای پوشش آب‌بندی شده با فرآیند سل ژل است) و نیز داده‌های طیف‌سنجی توزیع انرژی (که مقدار کم عنصر سیلیسیم را در اثر انتقال ماده از گلوله به پوشش نشان می‌دهد) قابل تأیید است.

انرژی تأیید می‌کند که فیلم سایش متشکل از عناصر تنگستن، کبالت، سیلیسیم، کربن و اکسیژن است، درصد بالای سیلیسیم موجود در لایه سایشی (۲۲/۸۵ درصد اتمی) نشان می‌دهد این لایه در اثر آمیخته شدن مواد جدا شده از سطح پوشش و گلوله ساینده سیلیسیم کارباید تشکیل شده و در حین آزمون سایش، با مکانیزم چسبان روی سطح سایش قرار گرفته‌اند. همانطور که از تصویر میکروسکوپی الکترون روبشی این پوشش بر می‌آید، فیلم سایشی نیز دستخوش ترک خوردگی و جدایش از روی سطح پوشش قرار می‌گیرد (شکل ۱۳ ج)). بنابراین به نظر می‌رسد که تشکیل فیلم سایش با مکانیزم چسبان و جدا شدن آن از روی سطح، که به‌طور متناوب در حین آزمون سایش اتفاق می‌افتد، سبب تغییر مداوم نیروی مماسی اعمال شده بر روی سطح سایش و در نتیجه بروز نوسانات شدید در پروفیل ضریب اصطکاک پوشش WC-12Co می‌شود.



شکل ۱۳. الف) و ب) و ج) تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی سطح سایش پوشش WC-12Co در بزرگنمایی‌های مختلف، (د) و (و) آنالیز طیف‌سنجی توزیع انرژی از سطح سایش یافته و نیافته پوشش WC-12Co.

- sprayed WC-CoCr coatings by sol-gel methods, Journal of Thermal Spray Technology, 20(4)(2011) 918-926.
2. R. Westergård, S. Hogmark, P. Vuoristo, *Tribological properties of sprayed alumina coatings sealed by electro-deposition of Cu*, Wear, 256(2004)1163-1175.
3. R. Schwetzke, H. Kreye, *Microstructure and properties of tungsten carbide coatings sprayed with various high velocity oxygen fuel spray systems*, Journal of Thermal Spray Technology, (1999).
4. C.M. Cotell, F.A. Smidt, *Thermal Spray Coatings*, ASM Handbook, Surface Engineering, 5(2002).
5. R. Westergard, S. Hogmark, *Enhancement of the tribological properties of plasma sprayed alumina*, Ph.D. Thesis, Acta Universitatis Upsaliensis Uppsala, (2002).
6. M. Norouzi, S. Jalali Azizpour¹, and H. Mohammadi Majd. *Mechanical Properties of WC-12Co HVOF Coatings*, Journal of American Science 7.9 (2011).
7. Vahtrus, Mikk, et al. *Mechanical and structural characterizations of gamma-and alpha-alumina nanofibers*, Materials Characterization 107(2015)119-124.
8. P. Chivavibul, M. Watanabe, S. Kuroda K. Shinida, *Effect of carbide size and Co content on the microstructure and mechanical properties of HVOF- sprayed WC-Co coatings*, Surf.coat.technol, 202(2006)1180-1190.
9. D.A Stewart, P.H. Shipway, D.G. McCartney, *Abrasive wear behaviour of conventional and nanocomposite HVOF-sprayed WC-Co coatings*, Wear, 789(1999) 225-229.
10. J. Yuan, Y. Zhu, X. Zheng, H. Ji, T. Yang, *Fabrication and evaluation of atmospheric plasma spraying WC-Co-Cu-MoS₂ composite coatings*, J. Alloys Comp, 509(2011)2576-2581, 2011.
11. Y.C. Zhu, K. Yukimura, C.X. Ding, P.Y. Zhang, *Tribological properties of nanostructured and conventional WC-Co coatings deposited by plasma spraying*, Thin Solid Films, 388(2011)277-282.



شکل ۱۴. (الف، ب و ج) تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی سطح سایش پوشش WC-12Co بعد از فرایند سل ژل در بزرگنمایی‌های مختلف، (د) آنالیز طیف‌سنجی توزیع انرژی از سطح سایش یافته و نیافته پوشش WC-12Co بعد از فرایند سل ژل.

نتیجه‌گیری

- انجام فرآیند آب‌بندی سل ژل برای مسدود شدن تخلخل‌های باز سطح پوشش پاشش حرارتی WC-12Co میسر است.
- آب‌بندی پوشش‌ها با فرآیند سل ژل باعث افزایش مقاومت به سایش و کاهش ضریب اصطکاک پوشش‌های پاشش حرارتی از ۰/۶ تا ۰/۳ می‌شود.

تشکر و قدر دانی

نویسندگان این مقاله از مجتمع فولاد مبارکه اصفهان به دلیل حمایت‌های مادی و فنی از این پژوهش تشکر و قدر دانی می‌نمایند.

مراجع

- S. Armada, M. Pilz, R. Liltvedt, H. Bratland, Espallargas N., *Sealing HVOF thermally*