



بهبود رفتار سایشی فولاد ۴۱۴۰ با ایجاد پوشش کامپوزیتی WC-Co به روش HVOF جایگزین پوشش های کروم شش ظرفیتی

احمد تحویلیان^۱، سعید اخوان^۲، سعید صلواتی^۳، حامد نوری^۴، مهدی صالحی^۵

۱. کارشناسی ارشد مهندسی مواد دانشگاه صنعتی اصفهان
۲. کارشناسی ارشد مهندسی مواد دانشگاه صنعتی اصفهان
۳. دانشجوی دکتری مهندسی مواد دانشگاه مک گیل کانادا
۴. کارشناسی ارشد مهندسی مواد دانشگاه صنعتی سهند
۵. عضو هیئت علمی دانشگاه صنعتی اصفهان - دکتری مهندسی مواد

چکیده

با توجه به خطرات زیست محیطی فرایند آبکاری کروم سخت، یافتن روش های جایگزین برای این پوشش امری اجتناب ناپذیر است. یکی از روش های مناسب جهت جایگزینی این فرایند، استفاده از روش های پاشش حرارتی است. در این پژوهش پوشش های WC-۱۰Co-۴Cr و WC-۱۲Co و WC-۱۷Co در شرایط مختلف بر روی زیرلایه ای از جنس فولاد ۴۱۴۰ توسط فرایند HVOF اعمال شده و خواص ریزساختاری پوشش های حاصل توسط آنالیز XRD و میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج XRD نشان داد که تغییر ساختاری کمی در حین فرایند، برای پودرهای مورد استفاده رخ داده است. نتایج SEM نشان داد که ضخامت پوشش های حاصل در حدود ۲۰۰ میکرومتر بوده و کمترین میزان تخلخل برای پوشش WC-۱۷Co به دست آمده است. نتایج آزمون سایش نشان داد که تمامی پوشش های ایجاد شده نسبت به فولاد ۴۱۴۰ بدون پوشش، بیش از ۴ برابر مقاوم تر هستند و بهترین مقاومت سایشی برای پوشش WC-۱۰Co-۴Cr state ۱ به دست آمد.

واژه های کلیدی: HVOF، آبکاری کروم سخت، پوشش WC-Co، مقاومت سایشی

مقدمه

خواص قطعات مهندسی نه تنها وابسته به خواص درونی آنها است بلکه وابسته به مشخصات و خواص سطح آنها نیز هست. این مسئله خصوصاً در ارتباط با قطعات تحت سایش صادق است، زیرا هم باید خواص مورد نیاز کلی قطعه را تأمین نمایند و هم سطح آنها تحت شرایط پیچیده و سخت باید مقاوم باشد [۱]. سایش فرایندی است که طی آن در اثر تماس میان سطح قطعه با سطوحی دیگر، قطعه از بین می‌رود. معمولاً از روان کارها به منظور کاهش میزان اصطکاک و سایش استفاده می‌شود ولی این مواد هم در شرایط سخت مانند فشار کم، اکسیداسیون دمای بالا، نیرو و سرعت‌های زیاد کارکرد خودشان را از دست می‌دهند. تحت این شرایط بهترین گزینه پوشش دهی سطح می‌باشد [۲ و ۱]. تاکنون در کشور برای ایجاد پوشش‌های سطحی مقاوم در کاربردهای هوایی از فرایند آبکاری کروم سخت استفاده می‌شده است. حمام‌های آبکاری کروم حاوی اسید کرومیک است که کروم به شکل شش ظرفیتی در آن موجود است. کروم شش ظرفیتی به عنوان یک عامل سرطان‌زا شناخته شده است که میزان سمی بودن آن از آرسنیک و کادمیوم نیز بیشتر است. در حین آبکاری، بخارات حاوی کروم شش ظرفیتی از مخازن حاوی مواد در هوا پراکنده می‌شوند که لازم است از محیط زدوده گردند و همچنین پسماندهای حاصل از فرایندهای آبکاری کروم جزو زباله‌های زیان‌آور دسته‌بندی می‌شوند و به همین دلیل باید استفاده از این فرایند متوقف گردد [۳]. امروزه با توجه به خسارات جبران‌ناپذیر زیست‌محیطی این فرایند و تلاش برای دستیابی به پوشش با کارایی بالاتر، تحقیقات در زمینه جایگزینی فرایند آبکاری کروم سخت توسط فرایندهای نوین پوشش دهی همگام با سایر کشورهای پیشرفته دنیا امری لازم و ضروری به نظر می‌رسد. تحقیقات نشان می‌دهد، فرایند پاشش حرارتی HVOF^۱ می‌تواند بهترین گزینه برای جایگزینی آبکاری کروم سخت باشد. برای پوشش دهی آلیاژهای فلزی و کامپوزیت‌های سرامیک-فلز مانند کاربید تنگستن-کبالت می‌توان از فرایند HVOF استفاده کرد و پوشش‌های چگال و با چسبندگی خوب به زیرلایه را تولید نمود [۳ و ۴ و ۵ و ۶]. از عوامل مؤثر بر ترکیب خواص پوشش‌ها در این فرایند می‌توان به عواملی همچون دمای محفظه‌ی تفنگ HVOF که تحت تأثیر میزان سوخت و اکسیژن ورودی می‌باشد، دبی و طراحی نازل هوای فشرده جهت خنک کاری و موقعیت قرارگیری آن نسبت به قطعه‌ی تحت پاشش، فاصله‌ی تفنگ تا قطعه و... اشاره کرد [۵]. در این تحقیق عملکرد HVOF برای پوشش دهی چند نوع پودر WC-Co بر روی زیرلایه از جنس فولاد ۴۱۴۰ که کاربردهای هوایی دارد، مورد مطالعه قرار گرفته و نتایج به دست آمده بررسی شد.

مواد و روش تحقیق

در این پژوهش از نمونه‌هایی با جنس فولاد ۴۱۴۰ به عنوان زیرلایه استفاده شد. این نمونه‌ها در ابعاد $12 \times 2 \times 1$ آماده و سطح آنها تا زبری ۲ دلتا سنگ‌زنی شد. قبل از انجام فرایند پاشش، نمونه‌ها مورد فرایند شن‌پاشی با استفاده از پودر کاربید سیلیسیم (SiC) قرار گرفته و سطح آنها خشن سازی شد. سپس با استفاده از محلول شستشو تمیز شدند تا هرگونه آلودگی سطحی اعم از اکسیدها، روغن‌ها، و مواد چسبنده پاک شود و سطح فعال فلز آماده‌ی پاشش شود.

^۱ High Velocity Oxy-Fuel

جهت ایجاد پوشش سخت مقاوم به سایش WC-Co سه نوع پودر تجاری متداول با ترکیب های WC-10Co-4Cr و WC-12Co و WC-17Co ساخت شرکت Metalisation انتخاب شد.

برای پاشش پودرهای مذکور بر روی زیرلایه های آماده شده، از دستگاه HVOF مدل MET JET III ساخت شرکت Metallization با سوخت مایع (ATK) استفاده شد که نسبت به بقیه دستگاه های HVOF دارای سرعت بسیار بالایی برای پاشش پودر بر روی زیرلایه می باشد و انرژی سینتیکی بسیار بالا و سختی و چسبندگی مناسب تری را برای پوشش ایجاد می کند. شرایط و پارامترهای پوشش دهی نمونه ها در جدول ۱ آورده شده است. نرخ تغذیه پودر برای همه نمونه ها ۸۰ گرم بر دقیقه و زاویه پاشش نسبت به سطح زیرلایه ۹۰ درجه در نظر گرفته شد.

جهت بررسی تأثیر پاشش بر ترکیب پودر از آزمایش پراش اشعه ایکس استفاده شد. بدین منظور از دستگاه XRD ساخت شرکت Philips مدل Xpert استفاده شد. اشعه مورد استفاده، اشعه تک فام $CuK\alpha$ با طول موج ۱/۵۴۲ آنگستروم می باشد. زمان هر گام ۱ ثانیه، اندازه گام ۰/۰۵ درجه و محدوده مورد بررسی بازه ۱۰۰-۲۰ درجه انتخاب گردید.

از میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل Philips XL30 برای مطالعه ریزساختار و مورفولوژی پوشش ها و همچنین بررسی میزان تخلخل پوشش، باندهای مکانیکی بین پوشش و زیرلایه و ضخامت پوشش استفاده شد. به منظور اندازه گیری میزان تخلخل پوشش از روش آنالیز تصویری تصاویر SEM و نرم افزار ابزار تصویر^۱ بهره گرفته شد.

جهت بررسی تأثیر پوشش دهی بر رفتار تریبولوژیکی فولاد ۴۱۴۰، آزمایش رفت و برگشتی سایش بر روی نمونه های فولادی بدون پوشش و با پوشش طبق استاندارد ASTM G۹۹ انجام شد. جهت تهیه نمودارهای کاهش وزن نسبت به مسافت سایش، از ترازوی با دقت ۰/۰۰۰۱ گرم در فواصل سایشی ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۵۰۰، ۷۰۰ و ۱۰۰۰ متر استفاده شد و هر بار نمونه کاملاً شسته شد تا از ذرات سایشی پاک شود و سپس خشک شده و وزن شدند. آزمون سایش با نیروی عمودی ۵۰ نیوتن و سرعت حرکت ۵ متر بر ثانیه در مسیر سایش ۸۰ سانتی متری در دمای محیط انجام شد. جنس ساینده WC-Co زینتر شده بوده و از هیچ روانکاری استفاده نشد.

نتایج و بحث

همان طور که می دانیم در حین پاشش پودر WC-Co با استفاده از فرایندهای پاشش حرارتی پدیده هایی مانند:

از دست رفتن کربن و تشکیل W_2C و حتی گاهی W

واکنش WC با کبالت و تشکیل ترکیبی مثل: Co_3W_3C

اکسید شدن تنگستن دکرپوره شده (W) برای تشکیل WO_3

تبخیر انتخابی کبالت، به خصوص در فرایند پاشش پلاسمایی اتمسفری

رخ می دهد که می تواند باعث تغییرات فازی در ساختار پوشش نسبت به پودر شود [۷ و ۸ و ۹]. لذا آزمایش XRD بر روی نمونه هایی که با استفاده از پودرها و شرایط پاشش مختلف تهیه شده بودند انجام گرفت تا تغییرات فازی در حین

^۱ Image Tools

پاشش مشخص شود. معیار ارزیابی کیفیت پوشش از روی نمودارهای XRD اصولاً بر این منوال است که از نظر ایجاد فازهای نامطلوب مثل W_2C و فاز ترد غنی از کبالت در زمینه^۱ مورد بررسی قرار می‌گیرند [۱۰ و ۱۱] و بهترین حالت، زمانی است که کمترین میزان استحاله‌ی WC به فازهای دیگر رخ داده باشد.

شکل ۱ الگوهای XRD مربوط به پودر $WC-10Co-4Cr$ و پوشش $WC-10Co-4Cr$ در حالتی که میزان سوخت ۲۵۰ میلی‌لیتر بر دقیقه انتخاب شده (state ۱) و پوشش $WC-10Co-4Cr$ در حالتی که میزان سوخت ۲۷۰ میلی‌لیتر بر دقیقه انتخاب شده (state ۲) را نشان می‌دهند. ملاحظه می‌شود که در هر دو حالت استحاله‌ی WC به W_2C به کمترین میزان ممکن صورت گرفته است و پایداری فاز سخت‌تر به میزان مطلوبی حفظ شده است. مقایسه‌ی دو پوشش نشان می‌دهد که در حالتی که از سوخت به میزان ۲۵۰ استفاده شده است استحاله‌ی مذکور کمتر بوده است. همچنین می‌بینیم که بین پودر و پوشش تفاوت فازی بسیار کمی ایجاد شده که بیانگر خصوصیت مثبت HVOF و پارامترهای انتخاب شده برای آن جهت پوشش دهی می‌باشد که کمترین تغییر در خواص پودر را سبب می‌شود.

شکل ۲ الگوهای XRD مربوط به پودر و پوشش $WC-12Co$ را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که به دلیل ارجحیتی که برای پارامتر سوخت ۲۵۰ نسبت به ۲۷۰ در مورد پوشش $WC-10Co-4Cr$ مشاهده شد، برای بقیه پودرها فقط از میزان سوخت ۲۵۰ استفاده شد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در این نوع پوشش هم میزان استحاله‌ی فاز سخت WC به فازهای با سختی کمتر بسیار کم بوده است اما در مقایسه با پوشش‌های $WC-10Co-4Cr$ استحاله‌ی مذکور به میزان بیشتری رخ داده است. در این شکل نیز به وضوح پایداری پیک‌های پودر در پوشش مشاهده می‌گردد. این مسئله همان‌طور که قبلاً هم در مورد پوشش $WC-10Co-4Cr$ گفته شد، نشانگر حفظ خواص پودر طی فرایند پاشش است.

در مورد گراف‌های XRD پودر و پوشش $WC-17Co$ که در شکل ۳ آمده است نیز مطالب گفته شده در مورد انواع دیگر پوشش‌ها، یعنی تغییر ناچیز در خواص پودر قابل مشاهده است.

شکل ۴ ساختار فولاد در نزدیکی پوشش را نشان می‌دهد. این تصاویر به خوبی تشکیل ساختار ریختگی را برای زیرلایه فولادی نشان می‌دهد. تحقیقات نشان داده است در هنگام برخورد ذرات پوشش با سطح زیرلایه، در کسری از ثانیه حرارت بالایی به سطح نمونه منتقل می‌شود. این حرارت باعث ذوب سطحی به مقدار بسیار کم و پس از آن انجماد سریع به دلیل گرادیان حرارتی بسیار بالا و انتقال حرارت سریع در فولاد می‌شود. این امر سبب می‌شود تا در نزدیکی پوشش در زیرلایه (ناحیه فصل مشترک) دانه‌های فولاد بسیار ریزتر از بقیه ساختار گردد. در واقع ساختار ایجاد شده شبیه فولاد ریختگی و با اندازه دانه‌های بسیار ریز است که با حرکت به سمت نواحی پایین‌تر زیرلایه، به تدریج درشت‌تر شده تا نهایتاً به ساختار اصلی زیرلایه برسیم. این رفتار قبلاً توسط دیگر محققین نیز گزارش شده است [۱۱].

همچنین در شکل ۴ مشاهده می‌شود که پوشش در فرورفتگی‌های زیرلایه گیر کرده و در آن ایجاد سوراخ کلیدی نموده است. برخورد ذرات WC-Co با سطح فلزات در فرایند پاشش حرارتی HVOF سبب می‌شود که در اولین

لایه پوشش، سطح زیرلایه تغییر شکل پلاستیک دهد و ذرات به داخل زیرلایه فروروند [۱۲]. از طرف دیگر سند بلاست کردن سطح قبل از پاشش سبب به وجود آمدن فرورفتگی‌ها و برآمدگی‌هایی می‌کند که می‌توانند به ایجاد قفل مکانیکی بین پوشش و زیرلایه کمک کنند و اتصالات قوی مانند سوراخ‌های کلیدی را به وجود آورند. سند بلاست سطح همچنین می‌تواند سطح فعال فلزی ایجاد کند که با پوشش وارد واکنش شده و اتصالات متالورژیکی رخ دهد.

شکل ۵ تصاویر SEM پوشش WC-۱۰Co-۴Cr با شرایط پاششی state ۱ را نشان می‌دهد. در شکل ۵-الف پوششی با یکنواختی مناسب و قفل مکانیکی قابل قبول به سطح زیرلایه مشاهده می‌شود و بنابراین پیش‌بینی گردید که چسبندگی مناسبی بین پوشش و زیرلایه ایجاد شده باشد. شکل ۵-ب تصویر SE پوشش را نشان می‌دهد که برای تعیین میزان تخلخل تهیه شده است. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود هیچ‌گونه تخلخلی در این مقطع پوشش کشف نشد و نشانگر تخلخل نزدیک به صفر برای این پودر و با پارامترهای مشخص ایجاد این پوشش می‌باشد.

در شکل ۶ تصاویر SEM پوشش WC-۱۰Co-۴Cr با شرایط پاششی state ۲ آورده شده است. همان‌گونه که در شکل ۶-الف دیده می‌شود با انتخاب میزان سوخت بیشتر و در واقع حرارت بیشتر شعله برای پوشش دهی پودر WC-۱۰Co-۴Cr، در فصل مشترک پوشش و زیرلایه مقداری ذوب‌شدگی و یا ایجاد ساختار ریختگی مشاهده می‌شود، که خوردگی پوشش و زیرلایه را به همراه دارد که فاکتور غیرقابل قبولی برای پوشش‌های پاشش حرارتی می‌باشد. از سوی دیگر با توجه به شکل ۶-ب میزان تخلخل قابل ملاحظه‌ای در نواحی نزدیک به سطح پوشش ایجاد شده که در مورد اول وجود نداشت. از این رو و نیز با توجه به تغییرات فازی بیشتر، هنگامی که میزان سوخت بالاتری انتخاب کردیم، سوخت ورودی ۲۷۵ میلی‌لیتر بر دقیقه نامناسب شناخته شد و برای بقیه‌ی پودرها مورد استفاده قرار نگرفت.

شکل ۷- تصاویر SEM پوشش WC-۱۲Co را نشان می‌دهد. شکل ۷-الف پوشش بسیار یکنواخت و با قفل مکانیکی و فصل مشترک بسیار مناسب برای پوشش WC-۱۲Co را نشان می‌دهند. شکل ۴ نیز تصویر مربوط به همین نمونه را با بزرگنمایی بالاتر نشان می‌دهد و کیفیت خوب پوشش را تأیید می‌کند. با توجه به شکل ۷-ب مقداری کندگی در مقطع پوشش مشاهده می‌شود که گمان می‌رود مربوط به مراحل آماده‌سازی نمونه و جدا شدن مقداری از کبالت زمینه باشد. اما تخلخل نزدیک به صفر مشاهده شد.

در مورد پوشش WC-۱۷Co برخلاف پوشش WC-۱۲Co و WC-۱۰Co-۴Cr (در حالت سوخت ۲۵۰ میلی‌لیتر) کیفیت مناسبی در فصل مشترک پوشش و زیرلایه مشاهده نمی‌شود. هرچند قفل مکانیکی خوبی ایجاد شده است اما ایجاد فاز سوم بین پوشش و زمینه می‌تواند باعث ضعف خواص مکانیکی پوشش گردد. این مطلب در شکل ۸-الف به وضوح دیده می‌شود. عمق حفره‌هایی که در شکل ۸-ب برای پوشش WC-۱۷Co دیده می‌شود بیانگر حضور تخلخل بیش از ۱ درصد در پوشش مذکور می‌باشد و بنابراین افت خواص مورد نظر در این پوشش، در مقایسه با دو نمونه نام‌برده شده قابل پیش‌بینی است.

برای اندازه‌گیری ضخامت پوشش از تصاویر SEM تهیه شده از سطح مقطع نمونه‌های پوشش داده شده، استفاده شد و در همه نمونه‌ها، ضخامت پوشش اعمال شده در حدود ۲۰۰ میکرومتر به دست آمد. بر اساس محاسباتی که با

شیشه‌سازی انجام شد، ضخامتی در حدود ۱۵۰ میکرومتر به‌عنوان ضخامت بهینه معرفی شد و لذا این پوشش‌ها قابلیت پولیش تا ۵۰ میکرومتر باربرداری از سطح را دارند.

نتایج اندازه‌گیری‌های تخلخل بر اساس آنالیز تصویری و با استفاده از آنالیز ۱۰ تصویر برای هر نمونه در نرم‌افزار ابزار تصویر در جدول ۲ گزارش شده است. نتایج گزارش شده میانگین ۱۰ اندازه‌گیری است. لیو^۱ و همکاران [۱۳] حدود ۱۶ پوشش WC-Co ایجاد شده با پارامترهای مختلف HVOF را مورد بررسی قرار دادند و نتایج تخلخل سنجی آن‌ها نشان داد که درصد تخلخل‌ها بین ۰/۰۱ تا ۱/۸۴ بوده است که عدد ۱/۸۴ مربوط به بدترین پوشش بود. این نتایج نشان می‌دهد که میزان تخلخل موجود در پوشش‌های ایجاد شده در این پژوهش از حد مطلوب بالاتر است. می‌توان ادعا نمود به دلیل عدم دسترسی به دستگاه‌های اتوماتیک مناسب برای آماده‌سازی سطح متالوگرافی، ذرات WC از سطح مقطع پوشش جدا شده و تخلخل کاذب ایجاد شده است. لازم به ذکر است که در این تحقیق خطای مربوط به در نظرگیری عواملی غیر از تخلخل از نتایج حذف نشده است و با توجه به این نکات می‌توان میزان تخلخل این پوشش‌ها را در حد قابل قبول دانست. همان‌گونه که مشاهده می‌شود تخلخل موجود در پوششی که همراه با لایه میانی Ni-Cr ایجاد شده است از بقیه نمونه‌ها بیشتر بود. علت را می‌توان در ایجاد سطحی ناهموار با تپه‌هایی بلندتر از سطح سند بلاست شده دانست که ممکن است باعث گیر افتادن هوا در بین اسپلت‌های WC و تپه‌های Ni-Cr شود.

شکل ۹ مقایسه‌ی نمودارهای کاهش وزن نمونه‌های تحت سایش بر حسب مسافت سایش را برای فولاد ۴۱۴۰ و پوشش‌های WC-Co نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود بدترین پوشش از نظر رفتار سایشی، مقاومتی در حدود ۴ برابر فولاد از خود نشان می‌دهد. همچنین دیده می‌شود، برخلاف آنچه در دیگر گزارشات [۱۴ و ۱۵ و ۱۶] برای رفتار سایشی دمای محیط این‌گونه پوشش‌ها ذکر شده است، پوشش‌های WC-۱۲Co و WC-۱۷Co رفتار سایشی ضعیف‌تری را نسبت به گروه پوشش‌های WC-۱۰Co-۴Cr از خود نشان می‌دهند. علت این مطلب را قطعاً باید در فاز بایندر جستجو کرد. فلز کبالت نسبت به WC و کروم از سختی بسیار پایین‌تری برخوردار است. همچنین در دمای بالا می‌تواند از طریق چسبیدن به اجزای ساینده از سطح کنده شود. بنابراین مکانیزم‌های مختلفی در دمای بالا برای بیرون راندن کبالت از سطح پوشش وارد عمل می‌شوند. بر طبق مشاهدات یانگ^۲ [۱۶] می‌توان گفت فشار وارد بر فاز بایندر کبالت همراه با دمای بالا، کبالت را به سمت بیرون از بین دانه‌های WC اکستروود می‌کند؛ از طرفی در حین لغزش گلوله ساینده مقداری از کبالت از طریق سایش چسبان کنده می‌شود. کبالت عامل چسباننده و نیز جذب‌کننده ضربه برای کامپوزیت WC-Co محسوب می‌گردد. با خارج شدن کبالت از بین ذرات WC، این ذرات نیز می‌توانند در اثر نیروی برشی ایجاد شده از طریق اصطکاک از سطح جدا شوند. همچنین خرد شدن دانه‌های تنهای WC که به‌صورت برآمدگی‌های جزیره مانند پس از خارج شدن کبالت بر روی سطح باقی می‌مانند، به از دست رفتن ماده از سطح پوشش کمک می‌کند. نتایج آزمایشات لی^۳ این تئوری را تأیید می‌کند [۹]. این عامل سبب می‌شود تا پوشش‌هایی که فقط کبالت را به‌عنوان بایندر در سطح دارند زودتر از پوشش‌های دیگر ساییده شوند. از طرفی

^۱ Liu

^۲ Yang

^۳ Li

میزان بالاتر سایش WC-12Co نسبت به WC-17Co را می‌توان به تردتر بودن آن نسبت داد. در عوض در پوشش‌های WC-10Co-4Cr، کروم موجود در پوشش با سختی بالا، موجب استحکام دادن به فاز بایندر می‌شود و آن را در برابر خیش زدن در دمای بالا از طرف گلوله ساینده حفظ می‌کند. به همین دلیل پوشش‌های حاوی کروم در فاز بایندر، همگی رفتار سایشی مطلوب‌تری را نشان داده‌اند.

نتیجه‌گیری

- (۱) با توجه به انتخاب مناسب پارامترهای فرایند HVOF تغییر قابل ملاحظه‌ای در ساختار پوشش در مقایسه با پودرهای WC-Co اولیه مشاهده نشد.
- (۲) مقاومت در برابر سایش برای ضعیف‌ترین پوشش بیش از پنج برابر فولاد ۴۱۴۰ بود. بیشترین مقاومت به سایش را پوشش WC-10Co-4Cr با شرایط پاشش دمای پایین داشت و کمترین مقاومت به سایش مربوط به پوشش WC-12Co بود.
- (۳) حضور کروم در فاز بایندر پوشش‌های WC-10Co-4Cr باعث افزایش مقاومت به سایش پوشش‌های کاربید تنگستن کبالت نسبت به پوشش‌های WC-12Co و WC-17Co می‌گردد، به طوری که با حضور ۴ درصد کروم در فاز بایندر، به جای کبالت، مقاومت سایشی در حدود ۳ برابر افزایش یافت.

مراجع

- [۱] Stachowiak, G.W., Batchelor, A.W., Engineering tribology, Butterworth-Heinemann, ۲۰۰۱
- [۲] D.Errico, G.E., Bugliosi, S., Cuppini, D., Erosion of Ceramics and Cermets, Proceedings of the Advances in Materials and Processing Technologies AMPT.۹۹, Dublin, Ireland, pp.۱۲۱۳-۱۲۲۱, ۱۹۹۹
- [۳] BRUCE D. SARTWELL, KEITH O. LEGG, JERRY SCHELL "Validation of HVOF WC/Co Thermal Spray Coatings as a Replacement for Hard Chrome Plating on Aircraft Landing Gear", Naval Research Laboratory, Washington, DC, March ۳۱, ۲۰۰۴.
- [۴] "High Velocity Oxy Fuel Final Results Report" Final Report issued by Science Applications International Corporation under Government Contract F۰۹۶۰۳-۹۰-D۲۲۱۵, Oklahoma City Air Logistics Center, Tinker Air Force Base, May ۲۵, ۱۹۹۴.
- [۵] ف. اشرفی زاده، م. صالحی، متالورژی سطح و تریبولوژی، جلد اول، انتشارات علوم و تکنولوژی سطح ایران، ۱۳۷۴.
- [۶] J.R.Davis, "Surface Engineering for Corrosion and Wear Resistance" ASM International (۲۰۰۱).
- [۵] Bhushan, Bh, Modern tribology handbook, CRC press, ۲۰۰۱.
- [۷] "Coatings as a Replacement for Hard Chrome Plating on Aircraft Landing Gear, Part I: Material Testing." Prepared by Hard Chrome Alternatives Team for Environmental Security Technology Certification Program, Revision A, September ۱۹۹۹.
- [۸] "HVOF Final Results Report" Final Report issued by Science Applications International Corporation under Government Contract F۰۹۶۰۳-۹۰-D۲۲۱۵, Oklahoma City Air Logistics Center, Tinker Air Force Base, May ۲۵, ۱۹۹۴.

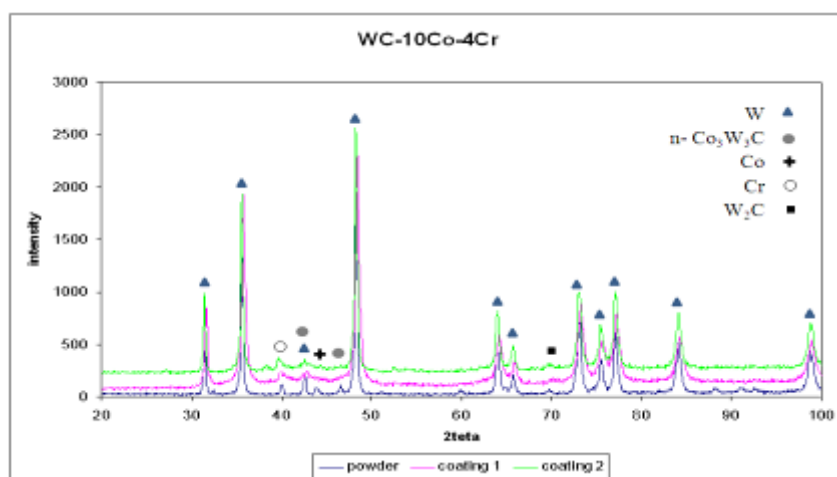
- [۹] Li. C, Ohmori. A, Tani. K, "Effect of WC Particle Size on the Abrasive Wear of Thermally Sprayed WC-Co Coatings", Materials and Manufacturing Processes, Vol. ۱۴, pp. ۱۷۵-۱۸۴, ۱۹۹۹.
- [۱۰] Verdon. C, Karimi. A, Martin. J. L, "A study of high velocity oxy-fuel thermally sprayed tungsten carbide based coatings. Part I: Microstructures", Materials Science and Engineering A, Vol. ۴۶, pp. ۱۱-۲۴, ۱۹۹۸.
- [۱۱] Bolelli. G, Lusvarghia. L, Barletta. M, "HVOF-sprayed WC-Co-Cr coatings on Al alloy: Effect of the coating thickness on the tribological properties", Wear, Vol. ۲۶۷, pp. ۹۴۴-۹۵۳, ۲۰۰۹
- [۱۲] Lung. M, Chun. J. P, "Influence of coating microstructure on the abrasive wear resistance of WC/Co cermet coatings", Surface and Coating Technology, Vol. ۱۲۴, pp. ۲۳۵-۲۴۲, ۲۰۰۰.
- [۱۳] Liu. S, Liu. G, "Preparing nano-crystalline rare earth doped WC/Co powder by high energy ball milling", International Journal of Refractory Metals & Hard Materials, Vol. ۲۴, pp. ۴۶۱-۴۶۴, ۲۰۰۶.
- [۱۴] Qiao. Y, Liu. Y, Fischer. E, "Sliding and Abrasive Wear Resistance of Thermal Sprayed WC-Co Coatings", ASM International, Volume ۱۰(۱), pp. ۱۱۸-۱۲۵, ۲۰۰۱.
- [۱۵] Stewart. D.A, Shipway. P.H, McCartney. D.G, "Abrasive wear behavior of conventional and nanocomposite HVOF-sprayed WC-Co coatings", Wear, Vol. ۲۲۵, pp. ۷۸۹-۷۹۸, ۱۹۹۹.
- [۱۶] Yanga. Q, Senda. T, Hirose. A, "Sliding wear behavior of WC-۱۲%Co coatings at elevated temperatures", Surface and Coating Technology, Vol. ۲۰۰, pp. ۴۲۰۸-۴۲۱۲, ۲۰۰۶.

جدول ۱: شرایط و پارامترهای ایجاد پوشش WC-Co بر روی نمونه ها به روش HVOF.

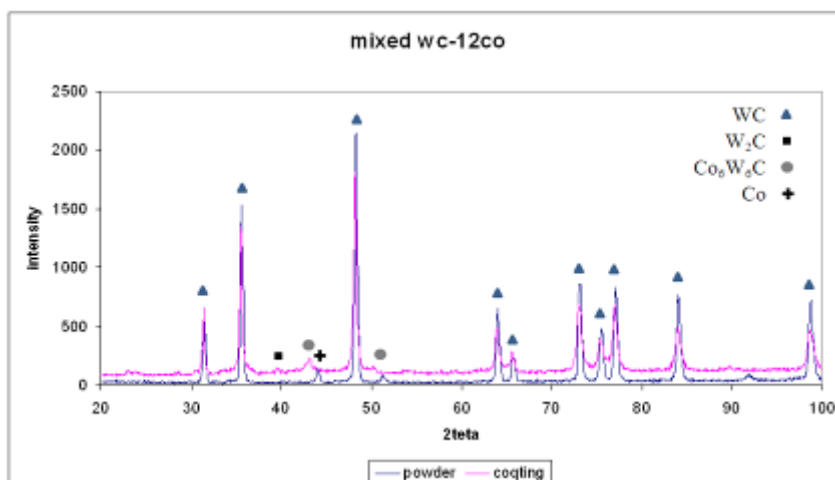
فشار اکسیژن (bar)	نرخ گاز حامل (lit/min)	فاصله پاشش (Cm)	نسبت اکسیژن به سوخت	نرخ تغذیه سوخت (milt/min)	نرخ تغذیه اکسیژن (lit/min)	نمونه
۲۰	۴	۳۵	۳/۳۲	۲۵۰	۸۳۰	WC-۱۰Co-۴Cr state ۱
۲۰	۴	۳۵	۳/۰۷	۲۷۰	۸۳۰	WC-۱۰Co-۴Cr state ۲
۲۰	۴	۳۵	۳/۳۲	۲۵۰	۸۳۰	WC-۱۲Co
۲۰	۴	۳۵	۳/۳۲	۲۵۰	۸۳۰	WC-۱۷Co
۲۰	۴	۳۵	۳/۳۲	۲۵۰	۸۳۰	WC-۱۰Co-۴Cr No sandblast
۲۰	۴	۳۵	۳/۳۲	۲۵۰	۸۳۰	WC-۱۰Co-۴Cr NiCr bondcoat

جدول ۲: نتایج تخلخل سنجی پوشش ها.

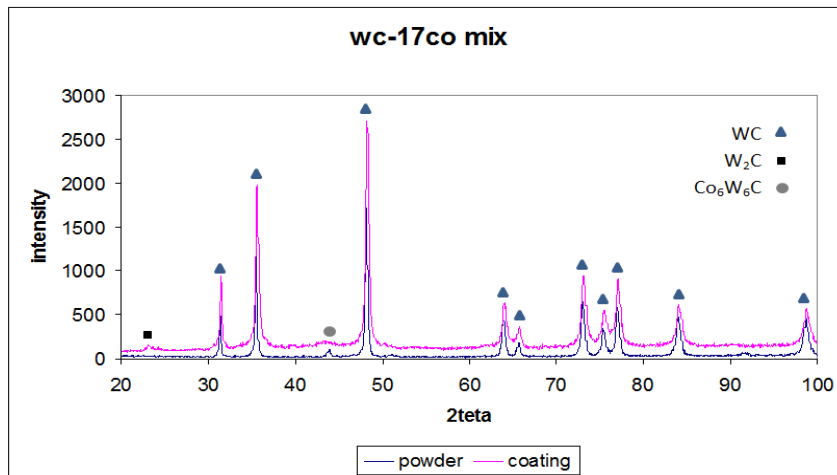
نمونه	درصد تخلخل
WC-۱۰Co-۴Cr state ۱	$1/3 \pm 0/3$
WC-۱۰Co-۴Cr state ۲	$1/2 \pm 0/1$
WC-۱۲Co	$1/4 \pm 0/2$
WC-۱۷Co	$1/1 \pm 0/2$
WC-۱۰Co-۴Cr No sandblast	$1/5 \pm 0/4$
WC-۱۰Co-۴Cr NiCr bondcoat	$2/1 \pm 0/3$



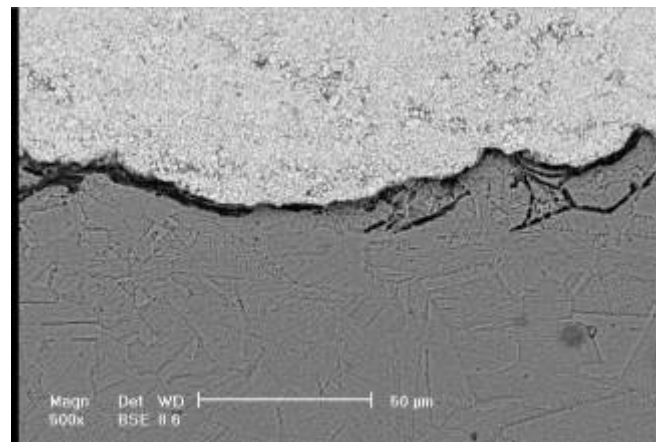
شکل ۱: الگوی XRD مقایسه‌ای برای پودر و پوشش WC-۱۰Co-۴Cr.



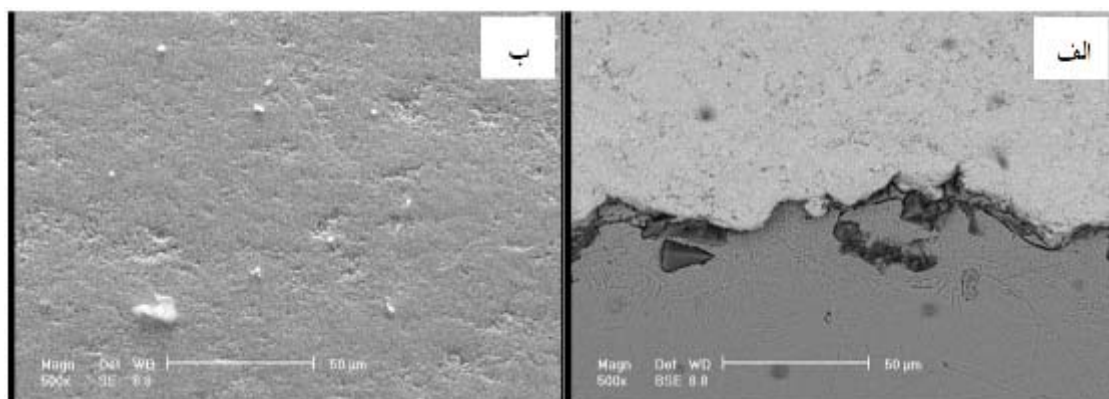
شکل ۲: الگوی XRD مقایسه‌ای برای پودر و پوشش WC-۱۲Cr.



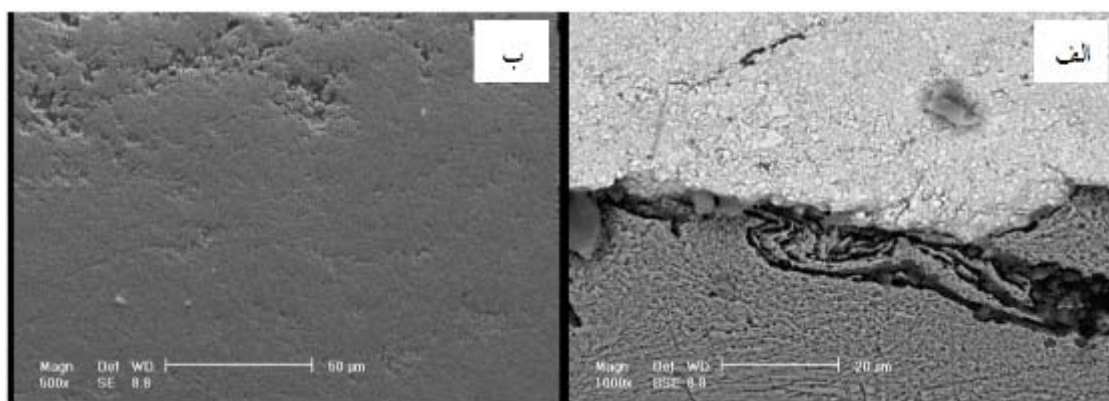
شکل ۳: الگوی XRD مقایسه‌ای برای پودر و پوشش WC-۱۷Co.



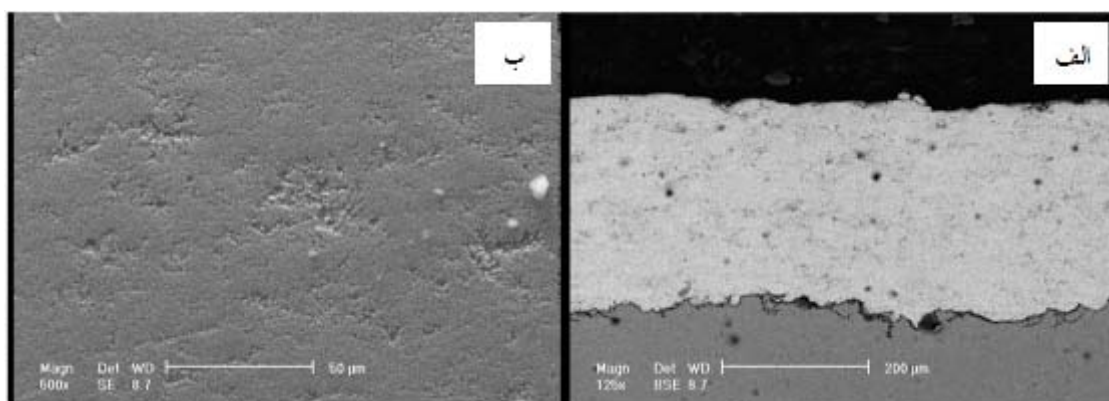
شکل ۴: تصویر SEM ساختار ریزدانه زیرلایه فولادی در نزدیکی فصل مشترک پوشش WC-۱۲C.



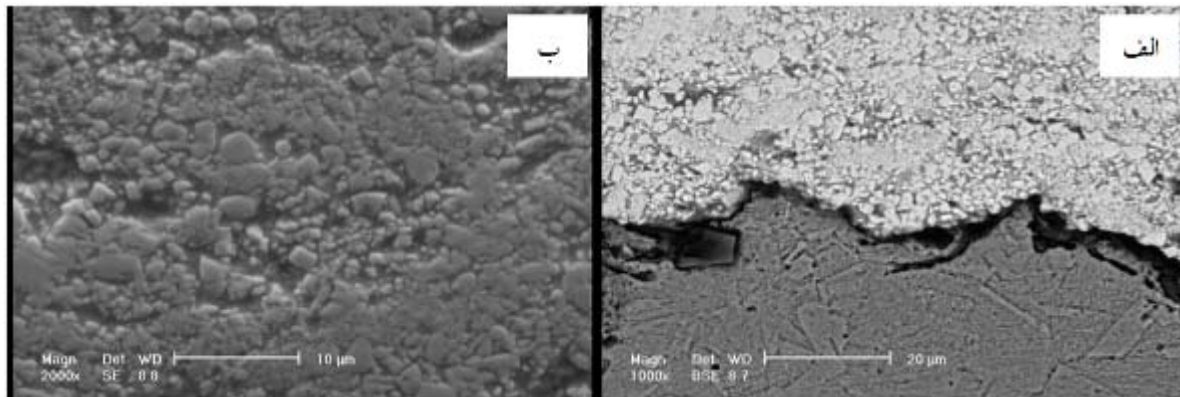
شکل ۵: تصاویر SEM مربوط به پوشش WC-10Co-4Cr- state ۱ (الف) فصل مشترک پوشش و زیرلایه (ب) تصویر SE پوشش.



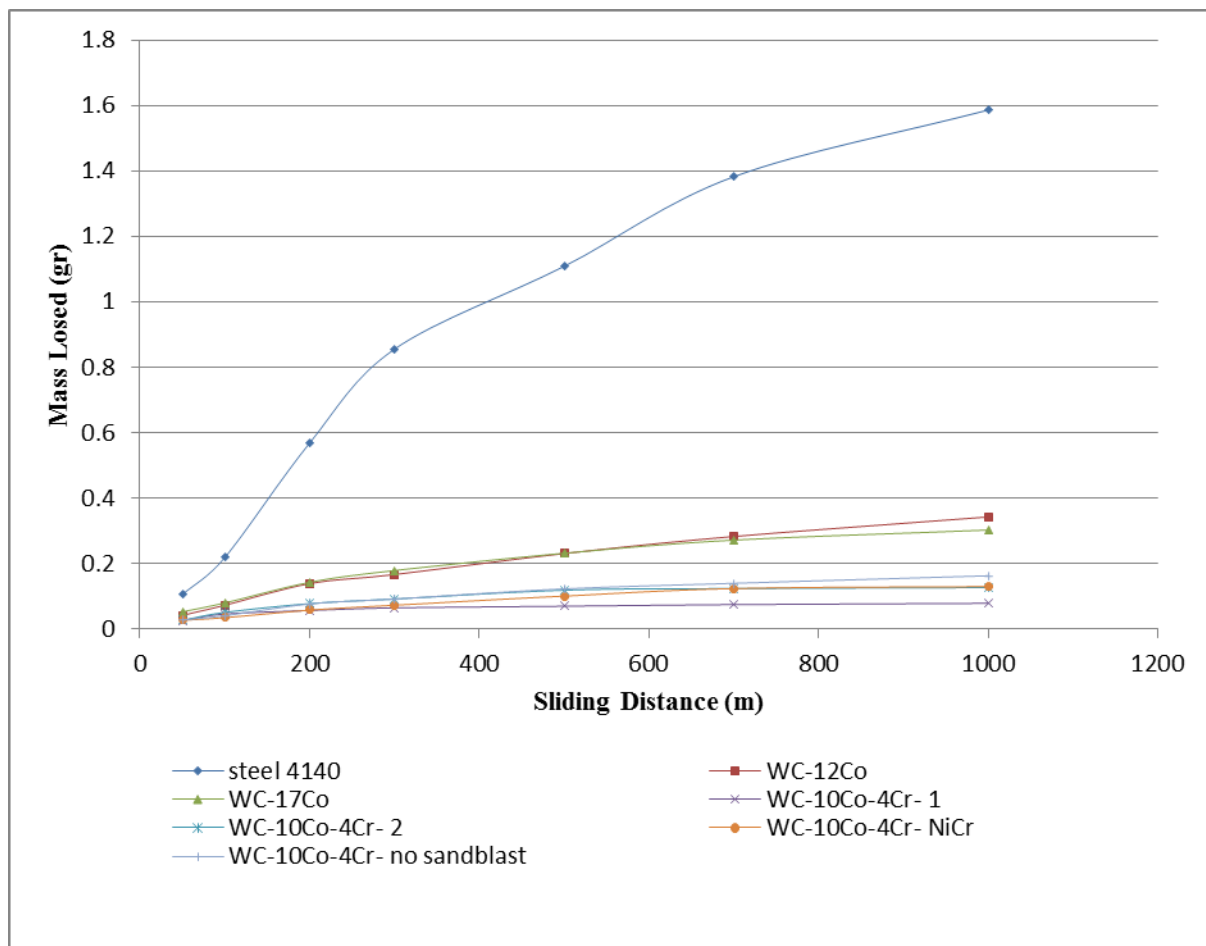
شکل ۷: تصاویر SEM مربوط به پوشش WC-10Co-4Cr- state ۲ (الف) فصل مشترک پوشش و زیرلایه (ب) تصویر SE پوشش.



شکل ۶: تصاویر SEM مربوط به پوشش WC-12Co (الف) فصل مشترک پوشش و زیرلایه (ب) تصویر SE پوشش.



شکل ۸: تصاویر SEM مربوط به پوشش WC-17Co (الف) فصل مشترک پوشش و زیرلایه (ب) تصویر SE پوشش.



شکل ۹: مقایسه‌ی نمودارهای کاهش وزن نمونه‌های تحت سایش برحسب مسافت.