



تحلیل ریزساختار و مقاومت به تخریب دمای بالا پوشش WC-12Co پاشش شده به روش HVOF بر روی فن‌های بازچرخانی گاز (GRF)

مجید میرزایی*^۱، عرفان بهرامی^۲، صابر قنادی^۳، فرهاد حسن آبادی^۳، مهدی خدایی^۲، حسین کوهانی^۱

۱. گروه پژوهشی مواد غیرفلزی، پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران

۲. گروه مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

۳. گروه مهندسی متالورژی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

چکیده

واژگان کلیدی:

فن‌های بازچرخانی گاز (GRF) در نیروگاه‌های حرارتی، به علت تماس مداوم با جریان گازهای داغ حاوی ترکیبات خورنده، ذرات ساینده و تجربه مکرر شوک‌های حرارتی، یکی از آسیب‌پذیرترین اجزای سیستم محسوب می‌شوند و به شدت در معرض تخریب‌های دمای بالا نظیر خوردگی داغ و فرسایش قرار دارند. این تخریب‌ها می‌توانند باعث کاهش چشمگیر عمر کاری، افزایش هزینه‌های تعمیرات و کاهش بازده کلی نیروگاه شوند. در این پژوهش، با هدف بهبود دوام این تجهیزات، پوشش سرمتی WC-12Co به روش پاشش حرارتی HVOF بر روی زیرلایه فولادی ST37 اعمال شد و ریزساختار و مقاومت آن در برابر مکانیزم‌های مختلف تخریب دمای بالا مورد ارزیابی جامع قرار گرفت. فرآیند مشخصه‌یابی شامل آنالیزهای XRD جهت شناسایی فازها، میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی (FESEM/EDS) برای مطالعه مورفولوژی و ترکیب شیمیایی، اندازه‌گیری زبری سطح و درصد تخلخل، آزمون خوردگی داغ در دمای 650°C در محیط نمک مذاب $\text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{V}_2\text{O}_5$ و آزمون فرسایش دمای بالا بر اساس استاندارد ASTM G76 بود. نتایج نشان داد که این پوشش با داشتن ریزساختار بسیار متراکم، تخلخل ناچیز (0/1٪)، سختی بالا ($\text{HV} > 1100$) و زبری یکنواخت ($5/2 \mu\text{m}$) توانسته است مقاومت قابل توجهی در برابر نفوذ نمک‌ها، تشکیل محصولات خوردگی و سایش ذرات در دمای بالا از خود نشان دهد. این ویژگی‌ها نشان‌دهنده پتانسیل بالای پوشش WC-12Co در بهبود طول عمر و عملکرد سطحی فن‌های بازچرخانی گاز در شرایط سخت نیروگاه‌های حرارتی است.

پوشش سرمتی

WC-12Co

فن بازچرخانی گاز

خوردگی داغ

فرسایش دمای بالا

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۵/۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۶/۹

DOI: 10.22034/ISSST.2025.2067024.1658

Microstructure analysis and high-temperature degradation resistance of HVOF-sprayed WC-12Co coating on Gas Recirculation Fans (GRF)

Abstract

In this study, a ternary Ni-Mo-Al alloy cladding was lasered on a plain carbon steel. The effect of laser power and laser speed on the microstructure of the resulting claddings was evaluated. The microstructure and chemical composition of the cladding obtained under different conditions were evaluated using optical microscopy, field emission scanning electron microscopy (FESEM), and energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS). Examination of the cross-sectional microstructure images of the coating showed that the coating has a microstructure of the transition zone, type II boundary, columnar dendrites, and coaxial dendrites. Elemental evaluations of the cladding showed that intermetallic compounds containing nickel, molybdenum, and iron were formed, which improved the microstructure and grain refinement. With increasing scanning speed, due to lower input heat, more nucleation occurred and the amount of dendrites increased and their dimensions became smaller. Also, as the scanning speed increases, the dilution also increases.

Keywords: Cermet coating; WC-12Co; Gas Recirculation Fan (GRF); Hot corrosion; High-temperature erosion

* Corresponding author E-mail: majidmirzaee7@gmail.com

۱- مقدمه

یکی از محورهای مهم نگهداری و بهره‌برداری در نیروگاه‌های مدرن تبدیل شده است.

در این میان، استفاده از پوشش‌های سطحی مقاوم به ویژه فناوری پاشش حرارتی^۱، به عنوان یکی از کارآمدترین روش‌های تقویت سطحی برای مقابله با تخریب مکانیکی و شیمیایی در تجهیزات صنعتی شناخته شده است. فناوری پاشش حرارتی به مهندسان این امکان را می‌دهد تا لایه‌هایی با خواص فیزیکی و شیمیایی متناسب با شرایط کاری، بر روی سطح قطعات اعمال کنند؛ لایه‌هایی که می‌توانند به‌طور همزمان در برابر دما، خوردگی و سایش مقاومت نشان دهند. از میان طیف متنوعی از پوشش‌های قابل استفاده، پوشش‌های سرمتی^۲ به دلیل ترکیب ویژگی‌های فلز و سرامیک، توجه بسیاری را به خود جلب کرده‌اند [۷، ۸].

پوشش‌های سرمتی به‌طور خاص، از ذرات سرامیکی سخت مانند کاربیدها در زمینه‌ای فلزی تشکیل شده‌اند که ترکیبی ایده‌آل از سختی، مقاومت در برابر سایش، و چقرمگی را فراهم می‌کنند. در بین آن‌ها، پوشش‌های بر پایه WC-12Co (Tungsten Carbide-12% Cobalt) به دلیل خواص مکانیکی عالی، مقاومت در برابر فرسایش، پایداری در دمای بالا، و چسبندگی مناسب، به‌طور گسترده در صنایع هوافضا، خودروسازی، و اخیراً در نیروگاه‌های حرارتی مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۹، ۱۰]. این پوشش‌ها نه تنها می‌توانند از سطح پره‌های فن در برابر ضربات ذرات خاکستر و گازهای خورنده محافظت کنند، بلکه می‌توانند عمر مفید قطعات را تا چند برابر افزایش دهند و هزینه‌های نگهداری و تعویض را به شدت کاهش دهند.

با این حال، اعمال موفق پوشش‌های WC-12Co در شرایط سخت کاری فن‌های GRF نیازمند بررسی دقیق فرآیندهای پاشش، انتخاب صحیح پارامترها و ارزیابی عملکرد پوشش در

در نیروگاه‌های حرارتی، عملکرد پایدار و مؤثر اجزای اصلی سیستم احتراق و انتقال حرارت، نقش کلیدی در راندمان کلی واحد تولید برق ایفا می‌کند. یکی از فناوری‌های نوین که با هدف بهینه‌سازی دمای بخار و کاهش آلاینده‌ها در سال‌های اخیر توسعه یافته، فناوری بازچرخانی گاز یا^۱ GRF است [۱]. در این فناوری، بخشی از گاز دودکش خروجی از مسیرهایی نظیر خروجی اکونومایزر یا فن مکش^۲، مجدداً به کوره بازگردانده می‌شود تا از یک سو، دمای گاز درون کوره کنترل شده و از سوی دیگر، میزان تشکیل اکسیدهای نیتروژن (NO_x) کاهش یابد [۲]. این فرآیند همچنین به بهبود عملکرد ری‌هیتر و افزایش راندمان تبادل حرارتی کمک می‌کند. با وجود مزایای آشکار، پیاده‌سازی سیستم GRF همراه با چالش‌های فنی قابل توجهی است که مستقیماً بر عملکرد فن بازچرخانی گاز اثر می‌گذارد. فن‌های GRF به دلیل قرار گرفتن در معرض گازهای دودکش با دمای بالا، ذرات معلق، و ترکیبات خورنده نظیر SO_x، NO_x همواره در معرض آسیب‌هایی از جمله تنش حرارتی، خوردگی، فرسایش و گرفتگی قرار دارند [۳]. این آسیب‌ها، گرچه موضوع اصلی این پژوهش نیستند، اما نقش مهمی در ایجاد نیاز به راهکارهای محافظتی برای افزایش دوام و پایداری عملکرد این فن‌ها دارند. به عبارت دیگر، تحلیل مکانیزم‌های تخریب در فن‌های GRF، زمینه‌ای ضروری برای درک چرایی استفاده از فناوری‌های پوششی پیشرفته است [۴-۶]. افزایش دمای کاری تا بیش از ۳۰۰ °C و برخورد مداوم ذرات جامد با سرعت بالا از جمله عواملی هستند که می‌توانند در کوتاه‌مدت موجب کاهش راندمان فن، افزایش ارتعاشات، و نهایتاً توقف ناگهانی سیستم شوند. از این رو، اتخاذ راهکارهای مؤثر برای حفاظت سطحی اجزای این فن‌ها، به

^۱ Thermal Spray Coatings

^۲ Cermet Coatings

^۱ Gas Recirculation Fan

^۲ ID fan

در این پژوهش از فولاد ساده کربنی St37 به صورت ورق با ضخامت ۲ میلی متر و با آنالیز شیمیایی ارائه شده در جدول ۱ که به کمک آزمون طیفسنجی تفکیک انرژی موج به دست آمده است، به عنوان زیرلایه استفاده شده است. نمونه‌های فولادی به ابعاد ۱۰×۱۰ سانتی متر برش داده شده‌اند و برای کاهش اثرات تمرکز تنش و گوشه‌ها، حاشیه نمونه‌ها به صورت یکنواخت پرداخت و صیقل داده شده‌اند تا زوایای تیز حذف شود. همچنین، در انتخاب محل آزمون‌ها از نواحی مرکزی نمونه دور از لبه‌ها انجام گرفت تا تأثیر تمرکز تنش و اثرات گوشه‌ای به حداقل برسد. این اقدامات موجب شده تا داده‌های به دست آمده نمایانگر واقعی رفتار پوشش تحت شرایط کاری باشند.

جدول ۱. آنالیز شیمیایی فولاد St37 به عنوان زیرلایه

زیرلایه	گوگرد	فسفر	منگنز	سیلیسیم	کربن	آهن
درصد	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۳۵	۰/۳۵	۰/۱۷	Bal.
وزنی						
عناصر						

۲-۲- مشخصات پودرهای مورد استفاده

ماده مبتنی بر WC-Co دارای مشخصات WC-12Co (Global Tungsten Products, Towanda, PA, USA) می‌باشد که مشخصات پودر و آنالیز شیمیایی آن در جدول ۲ و جدول ۳ آمده است. این اطلاعات در کاتالوگ و دیتاشیت پودرهای پوشش‌دهی حرارت به صورت رسمی و استاندارد ارائه شده است.

جدول ۲. مشخصات پودرهای مورد استفاده برای پوشش

نوع پودر	اندازه ذرات (میکرومتر)	خلوص (%)	مورفولوژی
WC-12Co	۱۵+۲۵-	۹۹/۹	تقریباً کروی

محیط واقعی است [۱۱، ۱۲]. فرآیندهایی مانند پاشش حرارتی با سرعت بالا (HVOF) یا پاشش پلاسما، برای اعمال این نوع پوشش‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند که هر کدام مزایا و محدودیت‌های خاص خود را دارند. علاوه بر خواص ذاتی پوشش، نحوه آماده‌سازی سطح، ضخامت لایه، ریزساختار حاصل از پاشش، و حتی چسبندگی بین لایه و بستر فلزی، همگی در عملکرد نهایی پوشش مؤثرند. لذا در طراحی یک سیستم محافظتی مبتنی بر WC-12Co، توجه هم‌زمان به متالورژی پوشش و الزامات عملیاتی فن الزامی است.

از طرفی، تجربیات عملی حاصل از کاربرد این پوشش‌ها در فن‌های GRF نیروگاهی نشان می‌دهد که انتخاب صحیح مواد و فرآیند، نقش تعیین‌کننده‌ای در افزایش طول عمر قطعات دارد. مطالعات موردی انجام‌شده در برخی نیروگاه‌های زغال‌سوز، بیانگر کاهش قابل توجه نرخ فرسایش و پایداری شدن شرایط کاری فن‌های بازچرخانی گاز پس از اعمال پوشش WC-12Co بوده‌اند. این نتایج نه تنها پتانسیل بالای پوشش مذکور را برای حفاظت در برابر محیط‌های خورنده و فرسایشی تأیید می‌کنند، بلکه نشان می‌دهند که استفاده هدفمند از فناوری‌های پوششی می‌تواند جایگزینی مؤثر و اقتصادی برای استفاده از آلیاژهای گران‌قیمت باشد.

در همین راستا، این پژوهش با تمرکز بر ارزیابی عملکرد پوشش سرمته WC-12Co در فن‌های GRF نیروگاه حرارتی، به بررسی ویژگی‌های ساختاری، مکانیکی و مقاومتی این پوشش در برابر عوامل تخریبی اشاره شده می‌پردازد. با هدف ارائه راهکاری عملی برای افزایش دوام این فن‌ها در شرایط کاری واقعی، در این مقاله تلاش شده است تا به‌طور دقیق تأثیر پوشش مذکور بر رفتار سطحی و کارایی بلندمدت فن‌ها بررسی شود.

۲- مواد و فرآیند پوشش

۲-۱- زیرلایه مورد استفاده

جدول ۳. آنالیز شیمیایی پودرهای مورد استفاده برای پاشش

نوع پودر	w	Co	Ni	Cr	Total C	Free C	Fe	O
WC-12Co	Bal.	۱۱/۸-۱۲/۳	۰/۱-۰/۲	۰/۱	۵/۵-۶/۵	۰/۱-۰/۳	۰/۱۸-۰/۲۲	۰/۰۹

۲-۳- اعمال پاشش به روش HVOF

در این مرحله قبل از اعمال پوشش به روش پاشش قوسی به منظور از بین بردن آلودگی‌های سطحی و ایجاد زبری مطلوب جهت چسبندگی بهتر پوشش به زیرلایه، از سندبلاست با ذرات ساینده کاربید سیلیسم با مش ۴۶ در فاصله ۱۰ سانتیمتری از سطح نمونه‌ها استفاده شده است. در مرحله بعدی نمونه‌های سندبلاست شده با الکل شسته شده و با استفاده از دستگاه پاشش حرارتی HVOF، پوشش داده می‌شوند. پارامترهای پاشش در جدول ۴ آمده است. این پارامترها از سند EPRI-CS-1596 که مرتبط با آسیب‌های فن‌های نیروگاهی و راهکارهای افزایش عمر آنها بوده استخراج شده است [۱۳].

جدول ۴. پارامترهای رسوب دهی پوشش به روش HVOF [۱۳]

نمونه	فاصله (متر)	شار هیدروژن L/h	شار اکسیژن (۱۰ ^۳ × L/h)	سرعت تغذیه (g/min)
WC-12Co	۰/۲۳۰	۴۱/۰۶	۱۳/۸۵	۳۸

۲-۴- مشخصه یابی پوشش

پراش پرتو ایکس (XRD)

به منظور بررسی فازی نمونه‌های پودری و نمونه‌های پوشش داده شده از منظر تشکیل فاز آمورف و بلوری، از آزمون پراش پرتوی ایکس استفاده شد. در این پژوهش از دستگاه پراش پرتوی ایکس (Bruker, Advanced D8) تحت ولتاژ ۱۵ kV و ۴۰ mA استفاده شد. در تمام آزمایش‌ها از پرتوی ایکس CuK α با طول موج ۱/۵۴ Å و اندازه گام ۰/۰۰۱ درجه و محدوده ۲ θ بین ۲۰ تا ۹۰ درجه استفاده شد. فازهای موجود توسط نرم‌افزار Pert High Score Version 5.0d X-شناسایی گردید و محاسبات اندازه بلورک و کرنش شبکه با استفاده روش ویلیامسون-هال انجام شد.

آزمون میکروسکوپی الکترونی روبشی (FESEM)

به منظور بررسی مورفولوژی پودرهای سنتز شده از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (TESCAN, MIRA II) و برای بررسی مورفولوژی و ریزساختار پوشش‌های اعمالی در سطح و سطح مقطع و همچنین درصد تخلخل آنها از میکروسکوپ الکترونی روبشی (TESCAN, VEGA3) استفاده شد. همچنین هر دو دستگاه استفاده شده در این پژوهش مجهز به آزمون طیف سنجی تفکیک انرژی موج (EDS) شامل هر دو مورد نقطه‌ای و نقشه‌ای بودند. به منظور سهولت در فرآیند بررسی میکروسکوپی، نمونه‌های پوشش داده شده مانت شدند.

آزمون خوردگی داغ

برای آزمون خوردگی داغ، دمای ۶۵۰ °C انتخاب شد تا شرایط حاد و شتاب‌داده‌شده (scenario worst-case) ایجاد شود. هدف از این انتخاب، قرار دادن پوشش در محیطی با بیشترین شدت واکنش شیمیایی نمک‌های Na₂SO₄ و V₂O₅ بود تا ارزیابی مقاومت پوشش در شرایط سخت‌تر از حالت عملیاتی ممکن شود. این رویکرد در بسیاری از مطالعات مشابه به‌منظور شبیه‌سازی تسریع شده تخریب سطحی مورد استفاده قرار گرفته است. به منظور بررسی خوردگی داغ نوع دوم مطابق با

در مرحله بعدی به منظور انجام آزمون خوردگی داغ، نمونه‌ها به مدت ۱۶۰ ساعت داخل کوره در دمای 650 ± 15 (Heraeus, Germany) قرار گرفتند و در ابتدا در بازه‌های ۱، ۳ و ۵ ساعت وزن کُشی شدند. در ادامه نمونه‌ها هر ۱۰ ساعت یکبار توزین شدند.

برای کاهش نقش زیرلایه در تحلیل خوردگی داغ، ضخامت پوشش WC-12Co در حدود $225 \mu\text{m}$ انتخاب شد. پوشش از نظر ریزساختار متراکم و دارای تخلخل بسیار پایین بود. ارزیابی‌ها و مشاهدات پس از آزمون بر سطح پوشش متمرکز شد و از نواحی مرکزی نمونه (دور از لبه‌ها) برداشت گردید.

آزمایش فرسایش دما بالا

همانطور که بیان شد نوع دیگری از تخریب‌های مطرح در پره فن نیروگاهی، فرسایش دما بالا است. به دلیل استفاده از سوخت‌های سنگین نظیر مازوت و به دلیل دارا بودن ذرات ساینده تحت عنوان آلودگی سوخت‌ها و حتی خاکسترهای حاصل از سوختن آن‌ها، این ذرات هنگام سوختن به‌همراه جریان سیال گازه‌ای حاصل از احتراق به قسمتهای مختلف فن برخورد کرده و باعث فرسایش می‌شوند؛ و از آنجایی که سیال حمل‌کننده ذرات، گاز حاصل از احتراق است؛ این تخریب به فرسایش دما بالا معروف است. به‌منظور بررسی فرسایش دما بالا مطابق با استاندارد ASTM-G76، دستگاه فرسایش دما بالا با قابلیت کنترل دما ساخته شد [۱۴]. شکل ۱ تصویر و شماتیک دستگاه ساخته شده را نمایش می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود؛ این دستگاه مجهز به یک سیستم کنترلی بوده که دمای پایه، دمای نمونه را در دمای تعیین شده ثابت نگه می‌دارد. همچنین پارامترهای کنترلی این آزمون مطابق استاندارد در جدول ۵ آورده شده است. بنابراین، بعد از بستن نمونه بر روی پایه و گذشتن مدت زمان ۲۰ دقیقه، جهت هم‌دمای شدن، آزمون فرسایش دما بالا انجام شد. جرم هر یک از نمونه‌ها قبل و بعد از آزمون وزن‌کشی شد.

استاندارد ISO-17245، از نمک‌های سدیم سولفات و وانادیم پنتا اکسید 60% وزنی $V_2O_5 + 40\%$ وزنی Na_2SO_4 استفاده شد. نسبت وزنی 60% وزنی V_2O_5 (وانادیم پنتا اکسید) و 40% وزنی Na_2SO_4 (سدیم سولفات) که در استاندارد-ISO 17245 برای بررسی خوردگی داغ نوع دوم استفاده می‌شود، ارتباط مستقیم با ترکیبات موجود در سوخت مازوت نیروگاه‌ها دارد. در ترکیب سوخت مازوت که عمدتاً به عنوان نفت کوره سنگین در نیروگاه‌ها مصرف می‌شود، عناصری مانند وانادیم و سولفات‌ها به صورت گوگرد به طور طبیعی وجود دارند. مازوت‌ها معمولاً حاوی درصد قابل توجهی گوگرد و فلزاتی مانند وانادیم هستند که در دمای بالای احتراق نقش مهمی در ایجاد مناطق خوردنده و خوردگی داغ بازی می‌کنند. به‌خصوص ترکیباتی مانند V_2O_5 و Na_2SO_4 که در دمای بالا واکنش‌های خوردنده و یژهای ایجاد می‌کنند. بنابراین، نسبت 60% وزنی V_2O_5 (وانادیم پنتا اکسید) و 40% وزنی Na_2SO_4 (سدیم سولفات) در ارزیابی خوردگی داغ، برای شبیه‌سازی محیط حاصل از احتراق سوخت مازوت و شرایط خوردگی ناشی از فلزاتی مانند وانادیم و ترکیبات سولفاتی تنظیم شده است که در سوخت مازوت وجود دارد و باعث خوردگی شدید تجهیزات نیروگاه می‌شود.

در استاندارد ISO 17245 نحوه شبیه‌سازی خوردگی داغ با رسوب نمک و ایجاد نمک مذاب در دمای حدود 500 درجه سانتی‌گراد بیان شده است که معمولاً آماده‌سازی نمونه‌ها شامل مراحل پیش‌گرم و تمیزسازی سطح جهت حذف رطوبت و آماده کردن نمونه‌ها برای جذب بهتر نمک است.

این روند پیش‌گرم معمولاً برای:

- حذف رطوبت سطحی که می‌تواند روی تشکیل یکنواخت نمک مذاب تاثیر بگذارد
- افزایش چسبندگی نمک بر سطح نمونه
- جلوگیری از اثرات ناخواسته بخار آب در زمان قرارگیری در محیط خوردنده

اندازه‌گیری درصد تخلخل پوشش‌ها بر اساس تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) انجام شده و پردازش تصاویر با نرم‌افزار ImageJ صورت گرفته است. این روش یکی از روش‌های متداول و پذیرفته شده در تحلیل ریزساختار پوشش‌ها است که در بسیاری از مقالات معتبر با ارجاع به استانداردهای بین‌المللی مانند ASTM E2108 یا استانداردهای مشابه به کار می‌رود. ابتدا تصاویر به صورت باینری (سیاه و سفید) تبدیل شده و سپس با ابزارهای انتخاب و شمارش پیکسل، نواحی تخلخل (سیاه) از نواحی ماده (سفید) جدا شدند. نسبت مساحت تخلخل به کل مساحت تصویر به عنوان درصد تخلخل گزارش شده است. اندازه‌گیری‌های زبری سطح با استفاده از پروفیلومتر Mitutoyo SurfTest SJ-410 انجام گرفت.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- پراش اشعه ایکس پوشش‌ها

پراش پرتو ایکس (XRD) پوشش WC-12Co بر روی زیرلایه فولادی نشان‌دهنده حضور چندین فاز مختلف است که ناشی از فرآیند حرارتی HVOF و واکنش‌های شیمیایی طی پاشش است. در الگوی پراش پرتو ایکس (XRD) برای پوشش WC-12Co، پیکهای مربوط به فازهای مختلف در زوایای خاصی ظاهر می‌شوند. این زوایا به ساختار کریستالی و فواصل بین صفحات بلوری بستگی دارد [۱۶]. مطابق شکل ۲ برای WC-12Co، پیک‌های اصلی مربوط به WC و فازهای W₂C هستند. زوایای پیک و شاخص صفحات عبارتند از [۱۶، ۱۷]:

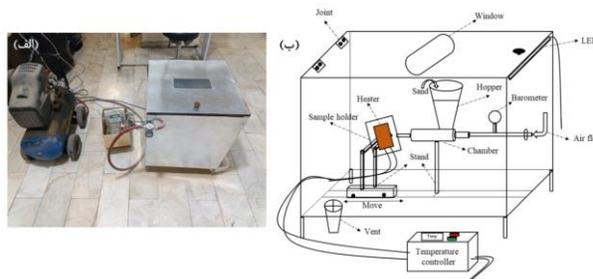
• WC (تنگستن کاربید) (JCPDS 89-2729)

- شاخص صفحات: (۰۰۱)، (۱۰۰)، (۱۰۱)، (۱۱۰)، (۱۱۱)،

(۲۰۰)، (۲۰۱)، (۲۱۰)، (۲۱۱)

- زوایای پیک حدوداً ۳۱/۵°، ۳۵/۷°، ۴۰/۳°، ۴۸/۳°،

۵۸/۳°، ۶۵/۷°، ۷۲/۲°، ۷۵/۲°، ۷۷/۲° (بر اساس JCPDS)



شکل ۱. (الف) تصویر مجموعه مورد استفاده برای آزمون فرسایش دما بالا نمونه‌های پاشش حرارتی شده، (ب) شماتیک اجزای محفظه آزمون فرسایش دما بالا

جدول ۵. پارامترهای آزمون فرسایش دما بالا

۱/۴	فشار (bar)
۳۰	سرعت ذرات (m/s)
۴۰۰، ۲۰۰، ۲۵	دمای انجام آزمون (°C)
۹۰	زاویه برخورد (°)
۱۲۰	زمان آزمون (s)
۱۰	فاصله نازل تا نمونه (mm)
ذرات SiO ₂ با اندازه‌های مختلف (۲۰۰-۳۱۵ μm)	نوع ذرات ساینده

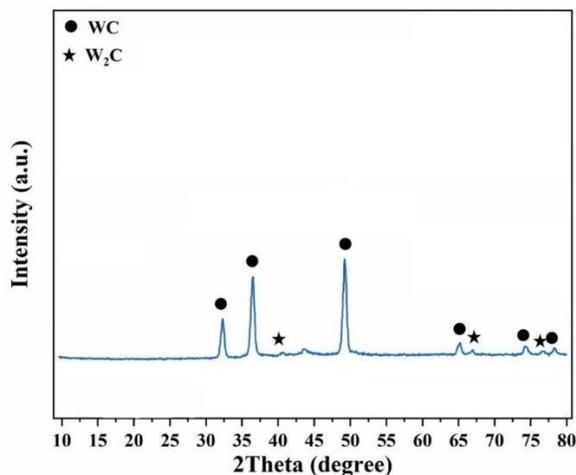
آزمون میکروسختی

سختی یکی از مهمترین فاکتورهای قابل بررسی در فرآیندهای مهندسی سطح است. سنجیدن سختی پوشش‌های پاشش حرارتی شده طبق استاندارد ASTM-E384 انجام شد [۱۵]. نمونه‌های پاشش شده پس از برش، در رزین اپوکسی مانت شدند. سپس با استفاده از سنباده در مش‌های مختلف و پولیش آماده شدند. در نهایت آزمون میکروسختی ویکرز با دستگاه Buehler MicroMet 1 انجام شد.

تخلخل و زبری

• ϵ تنش پسماند (کرنش میکروسکوپی)

برای اعمال این روش، ابتدا پهنای نیمه ارتفاع هر پیک XRD پس از حذف پهنای ابزار (Instrumental Broadening) اندازه گیری و به رادیان تبدیل شد. سپس مقادیر $\beta \cos$ در مقابل $4 \sin \theta$ برای پیک‌های مختلف رسم و با استفاده از روش رگرسیون خطی، شیب و عرض از مبدأ خط بدست آمد. عرض از مبدأ با مقدار $k\lambda/D$ برابر بوده و از آن اندازه بلور استخراج شد و شیب خط، تنش پسماند نمونه را تعیین نمود. مقادیر اندازه بلورک و تنش پسماند به ترتیب برابر 37 nm و 0.1% است.



شکل ۲. الگوی پراش اشعه ایکس پوشش‌های WC-12Co رسوب نشانی شده به روش HVOF بر روی زیرلایه فولادی.

۳-۲- میکروساختار پوشش‌ها و تحلیل FESEM/EDS-MAP

تحلیل تصویر FESEM، نقشه‌نگاری عنصری (EDS Map) و آنالیز عنصری EDS برای این پوشش WC-12Co، اطلاعات خیلی خوبی در مورد ریزساختار، توزیع عناصر، فازها، و رفتار سطحی می‌دهد. در ادامه، با بررسی شکل ۳ و ۴، نکات زیر مشهود است:

۱- نقشه‌نگاری عنصری (EDS Elemental Mapping)

W (تنگستن): در WC-12Co پراکنده و واضح است

• W_2C (تنگستن ساب‌کاربید) (JCPDS 35-0775)

- شاخص صفحات: (100) , (101) , (110) , (111) , (200)

- زوایای پیک حدوداً $39/5^\circ$, $42/5^\circ$, $49/5^\circ$, $61/5^\circ$ (بر اساس JCPDS)

در اثر دمای بالا و ذوب جزئی WC در طی پاشش HVOF، ممکنه فاز W_2C تشکیل شود. پهنای پیک در الگوی پراش پرتو ایکس (XRD) برای پوشش WC-12Co می‌تواند به چندین عامل بستگی داشته باشد [۱۸]. تفسیر پهنای پیک به درک ریزساختار و خواص فیزیکی نمونه کمک می‌کند. پهنای پیک همچنین می‌تواند تحت تأثیر تنش‌های پسماند در نمونه باشد. تنش‌های پسماند می‌توانند باعث پهن شدن پیک شوند. این پدیده به دلیل تغییر در فاصله بین صفحات بلوری است که در اثر تنش ایجاد می‌شود [۱۹].

برای تعیین همزمان اندازه بلور (Crystallite Size) و تنش پسماند (Microstrain) در نمونه‌ها، از روش ویلیامسون-هال (Williamson-Hall) استفاده شد. این روش بر اساس تحلیل پهنای نیمه ارتفاع (FWHM) پیک‌های پراش اشعه ایکس صورت می‌گیرد و فرض می‌کند که پهنای پیک‌های پراش ناشی از دو عامل اصلی است:

۱. تأثیر اندازه بلور محدود که موجب پهن شدن پیک

به دلیل کوچک بودن حوزه‌های بلوری می‌شود

۲. تنش پسماند یا کرنش داخلی که باعث تغییر فواصل

صفحات اتمی و به تبع آن پهن شدن پیک‌ها می‌شود

فرمول اصلی روش ویلیامسون-هال به صورت زیر است:

$$\beta \cos \theta = k\lambda/D + 4\epsilon \sin \theta$$

که در آن:

• β پهنای نیمه ارتفاع اصلاح شده پیک (FWHM)

به رادیان است

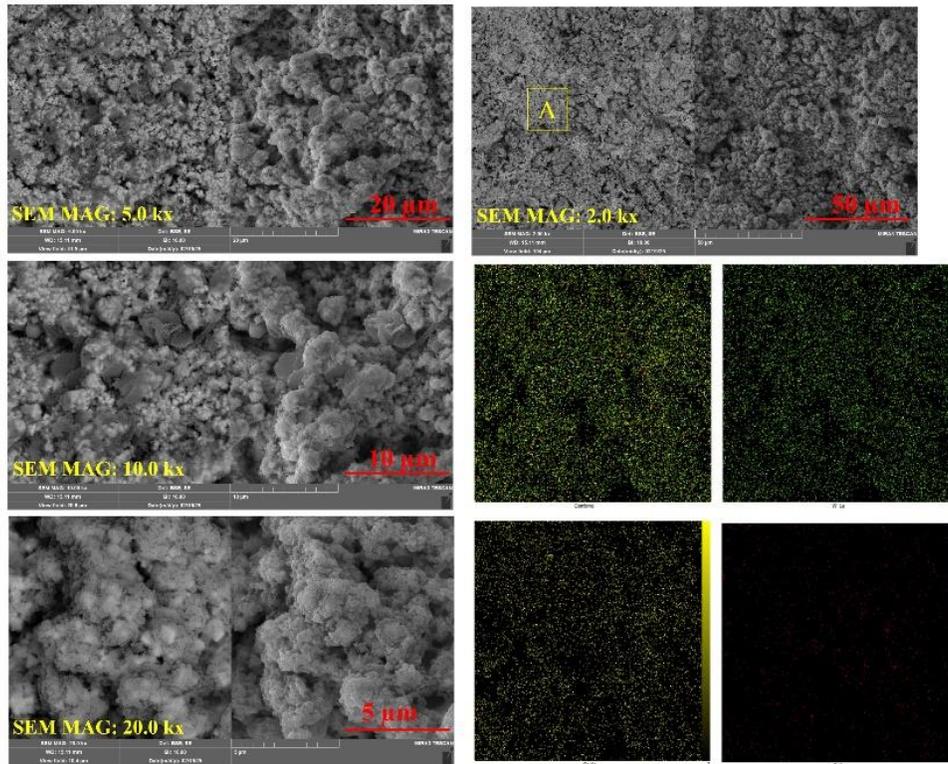
• θ زاویه براگ (Bragg angle)

• k ضریب شکل بلوری (معمولاً 0.9)

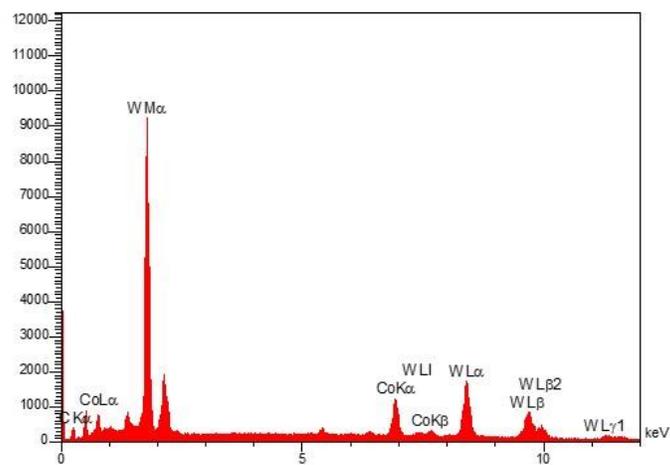
• λ طول موج اشعه ایکس

• D اندازه بلورک

- ۲- از دید میکروگرافی FESEM
- WC-12Co
 - ریزساختار همگن، توزیع یکنواخت ذرات WC
 - باند Co خوب و بدون ترک یا فاز ثانویه
- Co (کبالت): در WC-12Co پراکندگی یکنواخت و منطقی
- C (کربن): حضور این عنصر نیز مشهود است.



شکل ۳. تصویر FESEM، نقشه‌نگاری عنصری (EDS Map) برای پوشش WC-12Co.



شکل ۴. تصویر آنالیز عنصری EDS برای پوشش WC-12Co.

آنالیز FESEM-EDS-MAP مقطع عرضی (cross section) پوشش WC-12Co که با استفاده از روش HVOF بر روی زیرلایه فولادی پوشش‌دهی شده است، به شرح زیر است (شکل ۵ و ۶)

– ریزساختار: FESEM نشان می‌دهد که پوشش دارای ساختار دانه‌ای متراکم است. دانه‌های WC به صورت توده‌های متراکم و به هم پیوسته ظاهر می‌شوند. ممکن است ترک‌ها یا خلل‌هایی در پوشش وجود داشته باشد. ضخامت پوشش حدود ۲۲۵ میکرومتر است.

– ترکیب شیمیایی: EDS نشان می‌دهد که پوشش از WC و Co تشکیل شده است. ممکن است مقادیر متوسطی از فازهای ثانویه مانند W_2C وجود داشته باشد.

– توزیع عنصری: MAP نشان می‌دهد که عناصر به صورت نسبتاً یکنواخت توزیع شده‌اند.

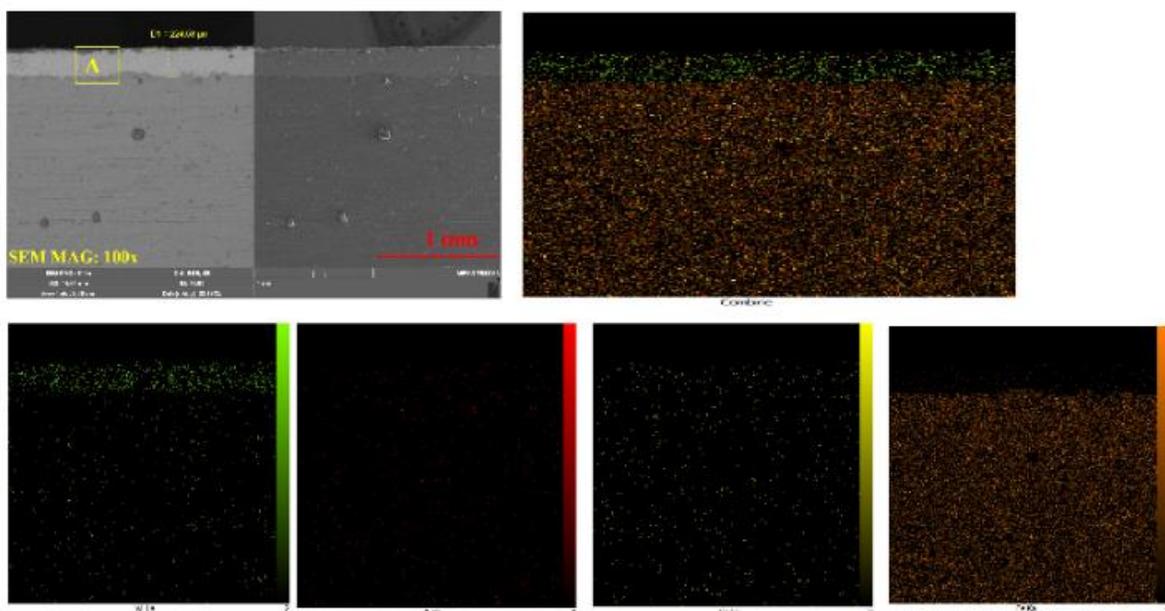
ریزساختار FESEM نشان می‌دهد که پوشش‌ها دارای ساختار دانه‌ای هستند. دانه‌های WC به صورت توده‌های متراکم و به هم پیوسته ظاهر می‌شوند [۲۰، ۲۱]. EDS نشان می‌دهد که پوشش WC-12Co از WC و Co تشکیل شده است. ممکن است مقادیر کمی از فازهای ثانویه مانند W_2C نیز وجود داشته باشد که ناشی از تجزیه WC در دمای بالای فرآیند HVOF است. در مورد نمونه WC-12Co:

۱. پوشش WC-12Co دارای ساختار دانه‌ای متراکم است که نشان‌دهنده چسبندگی خوب به زیرلایه است.

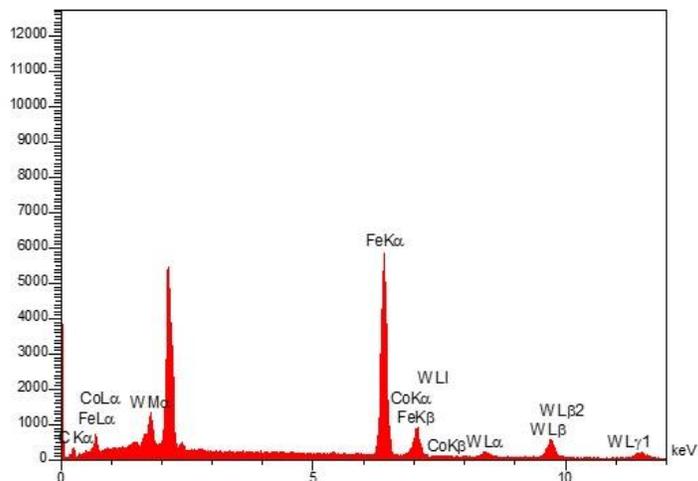
۲. ترکیب شیمیایی پوشش از WC و Co تشکیل شده است با احتمال وجود فازهای ثانویه.

۳. توزیع عنصری عناصر به صورت یکنواخت توزیع شده‌اند که نشان‌دهنده یکپارچگی پوشش است.

۳-۳- ضخامت پوشش



شکل ۵. تصویر FESEM سطح مقطع عرضی، نقشه‌نگاری عنصری (EDS Map) برای پوشش WC-12Co.



شکل ۶. آنالیز عنصری EDS برای سطح مقطع عرضی پوشش WC-12Co.

(کمتر از ۰/۱٪). این ویژگی به دلیل وجود نسبت بهینه میان ذرات تنگستن کاربید (WC) و فاز چسباننده کبالت (Co) است که منجر به توزیع یکنواخت ذرات و پر شدن حفره‌های میکروسکوپی می‌شود. در نتیجه، ساختار پوشش حالت متراکم و پایدار با تخلخل اندک پیدا می‌کند که برای افزایش مقاومت به خوردگی و سایش اهمیت ویژه‌ای دارد.

۳-۵- ارزیابی میکروسختی پوشش‌ها

رابطه‌ی میکروساختار با میکروسختی (Vickers HV) در پوشش‌های WC-12Co، موضوع کلیدی برای تحلیل عملکرد آنهاست [۲۰] و اینکه چرا WC-12Co سختی بالایی رو نشان داده، قابل تبیین علمی دارد. میزان سختی از سطح به عمق در شکل ۷ نشان داده شده است. دلایل سختی بالای WC-12Co به دلایل زیر است:

- نسبت بهینه‌ی WC به Co: سختی ناشی از حضور WC بوده و چقرمگی ناشی از Co که موجب اتصال خوب با زمینه شده و در نتیجه، مقاومت بالا در برابر فرورفتگی میکرو ایجاد می‌شود.

۳-۴- تخلخل و زبری سطح پوشش‌ها

زبری سطح (Surface Roughness) و تخلخل (Porosity) دو پارامتر کلیدی در تعیین عملکرد پوشش‌های WC-12Co هستند، به‌ویژه در برابر خوردگی، فرسایش، و چسبندگی پارامترهای کلیدی هستند. زبری سطح (Ra یا Rz) به عوامل زیر بستگی دارد [۲۲]:

- درصد Co (نرم‌تر بودن = سطح صاف‌تر)
- اندازه ذرات WC
- دمای پاشش و انجماد قطرات

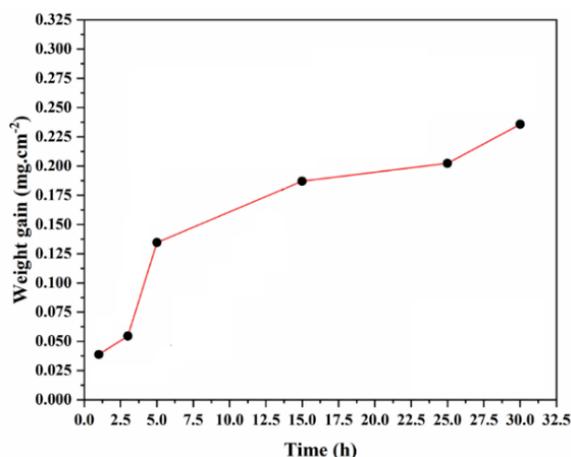
در پوشش WC-12Co زبری سطح در محدوده‌ای متوسط و کنترل‌شده (۲/۵ میکرومتر) قرار دارد. حضور عنصر Co به اندازه کافی موجب پر شدن فضاهای خالی سطحی می‌شود، اما مقدار آن به حدی زیاد نیست که به تسطیح کامل سطح بیانجامد. این وضعیت باعث ایجاد تعادل مطلوبی در میزان زبری سطح می‌گردد که می‌تواند از منظر عملکرد پوشش مزایای قابل توجهی به همراه داشته باشد.

تخلخل مهم‌ترین عامل در مقاومت به خوردگی داغ است چرا که مسیرهای نفوذی برای گازها/نمک‌ها ایجاد می‌کند. در پوشش WC-12Co میزان تخلخل در سطح پایین قرار دارد

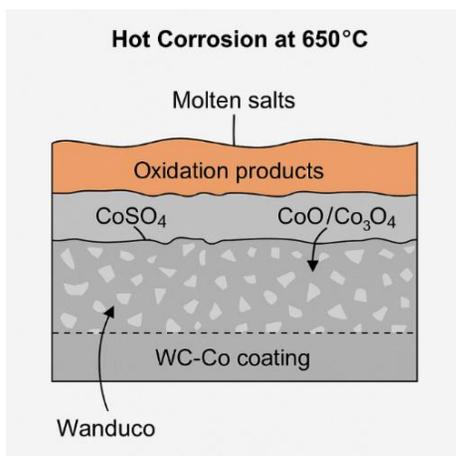
همچنین میزان افزایش وزن در بازه های زمانی مختلف نیز در شکل ۸ آمده است. شماتیک و مکانیزم جلوگیری از خوردگی داغ در نمونه WC-12Co در شکل ۹ نشان داده شده است.

به طور خلاصه WC-12Co به دلایل زیر مقاومت برتر در خوردگی داغ بهتری دارد [۲۳].

- ریزساختار متراکم
- درصد بهینه Co
- سختی بالا
- کمترین واکنش پذیری با نمکها



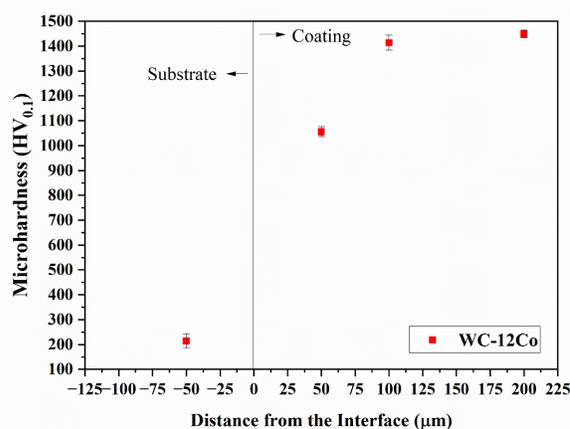
شکل ۸. آزمون خوردگی داغ برای نمونه های WC-12Co در دمای ۶۵۰°C در حضور نمکهای سولفات سدیم و اکسید وانادیوم.



شکل ۹. مکانیزم جلوگیری از خوردگی داغ برای پوشش WC-12Co.

• تراکم بالا و تخلخل کم: سختی به شدت به تخلخل وابسته است؛ چون حفره ها باعث تمرکز تنش و کاهش سختی می شوند که نمونه WC-12Co تخلخل کمتر از ۱-۲٪ را داشته و حداکثر انتقال نیرو در آزمون سختی را ارائه می دهد.

• ریزساختار همگن: سختی سطحی در مقیاس میکرو باید یکنواخت باشد. WC-12Co پخش ذرات همگنی را دارد.

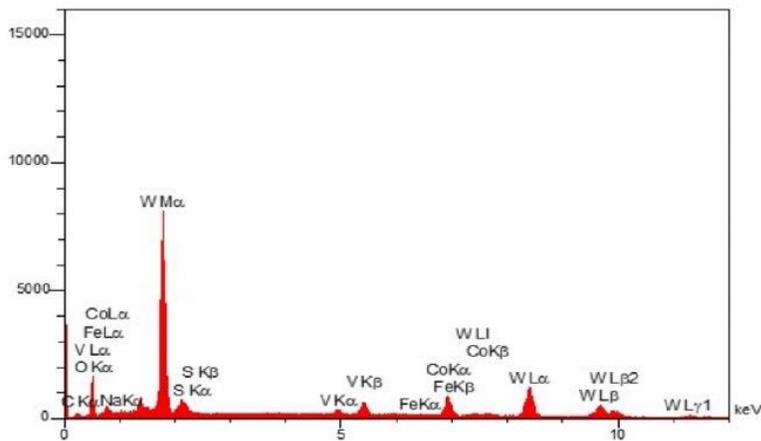
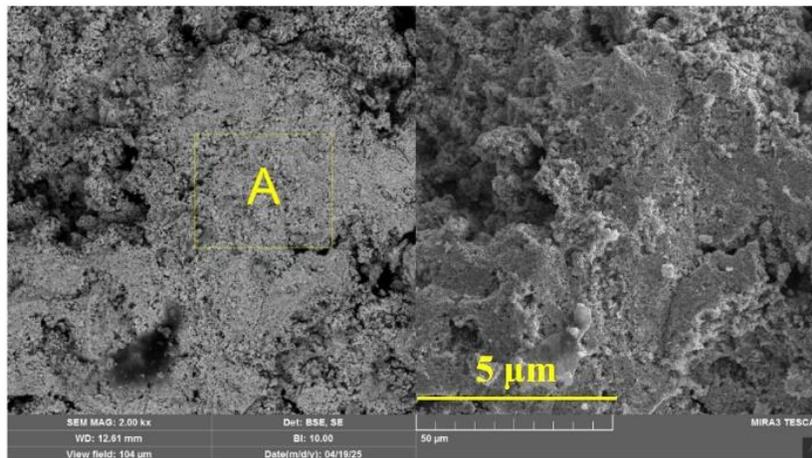


شکل ۷. میکروسختی پوشش WC-12Co در فواصل مختلف از سطح پوشش.

۳-۶- رفتار خوردگی داغ نمونه ها

رفتار مقاومت به خوردگی داغ عالی نمونه WC-12Co در دمای ۶۵۰ °C و در معرض نمکهای سولفات سدیم و اکسید وانادیوم به چندین دلیل است.

پوشش WC-12Co به دلیل ساختار متراکم و چسبندگی قوی بین ذرات WC و فاز کبالت (Co)، عملکرد بسیار مطلوبی در محیط های تهاجمی دارد. حضور کبالت به مقدار کافی باعث می شود که این فاز نقش خنثی ساز جزئی در برابر حمله یون های نمکی را ایفا کند. در نتیجه، نفوذ نمک به درون پوشش به حداقل می رسد و پوشش رفتاری بسیار پایدار و مقاوم در برابر خوردگی و تخریب از خود نشان می دهد.



شکل ۱۱. آنالیز عنصری نمونه WC-10Co در دمای ۶۵۰ °C در محیط سولفات سدیم و اکسید وانادیوم.

- نسبت بهینه فاز سخت (WC) به فاز زمینه (Co) : این نسبت متوسط و متعادل بوده و بهترین ترکیب از سختی، چقرمگی و مقاومت در برابر اکسیداسیون و خوردگی داغ می‌باشد.
- ریزساختار حاصل از HVOF: روش HVOF پوشش‌هایی با تراکم بالا، تخلخل پایین و پیوند خوب با زیرلایه ایجاد می‌کند.

به طور خلاصه پوشش WC-12Co به دلیل:

- نسبت بهینه فاز سخت و زمینه
- مقاومت بهتر به اکسیداسیون و خوردگی داغ
- خواص مکانیکی متعادل (سختی + چقرمگی)
- ریزساختار متراکم با تخلخل کم

تصاویر سطحی FESEM پس از تیمار در $\text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{V}_2\text{O}_5$ در 650°C ، نبود لایه‌های خوردگی ضخیم و ترک‌های گسترده و نیز حفظ یکنواختی مورفولوژی سطح را نشان داد. همراهی این مشاهدات با جرم‌افزایی کم مقدار/کم‌شیب، با نبود نفوذ قابل توجه به عمق پوشش در مدت آزمون سازگار است؛ لذا پاسخ مشاهده‌شده عمدتاً به رفتار خود پوشش نسبت داده می‌شود

۳-۷- رفتار فرسایش دما بالا نمونه‌ها

مطابق با شکل ۱۲ نرخ فرسایش در دماهای محیط، ۲۰۰ و 300°C در مورد نمونه WC-12Co مقادیر بسیار پایینی است که دلایل آن عبارتند از:

با بررسی تصویر FESEM از نمونه WC-12Co پس از آزمون فرسایش دما بالا در دمای ۲۵ °C با بزرگ‌نمایی ۲۰،۰۰۰ برابر، تحلیل زیر ارائه می‌شود (شکل ۱۳ و ۱۴).

۱. مورفولوژی سطح: سطح پوشش دارای ساختار دانه‌ای متراکم و یکنواخت است، مشابه آنچه در دمای ۴۰۰ درجه مشاهده شد، اما به نظر می‌رسد آسیب‌های سطحی کمتر باشد. ذرات کاربید تنگستن (WC) به خوبی در ماتریس کبالت (۱۲٪ Co) توزیع شده‌اند و نواحی ناهمگن کمتری دیده می‌شود.

۲. تخلخل و ترک‌ها: تخلخل بسیار کم است، که نشان‌دهنده پایداری خوب ساختار در دمای پایین‌تر است. دمای ۲۵ درجه احتمالاً تنش‌های حرارتی کمتری ایجاد کرده که منجر به حفظ یکپارچگی پوشش شده است. ترک‌های ریز یا جدایش سطحی به ندرت قابل مشاهده است، که با چسبندگی خوب ماتریس همخوانی دارد.

۳. آسیب فرسایشی: آسیب فرسایشی (مانند بریدگی یا گودشدگی) در این دما به طور قابل توجهی کمتر از دمای ۴۰۰ درجه است. این نشان می‌دهد که در دمای پایین، ماتریس کبالت و ذرات WC مقاومت بهتری در برابر ذرات ساینده دارند. سطح تقریباً دست نخورده‌تر به نظر می‌رسد، که می‌تواند به دلیل کاهش نرم شدن ماتریس در دمای پایین باشد.

۴. توزیع ذرات WC: توزیع ذرات WC یکنواخت و برجسته است، که نشان‌دهنده حفظ ساختار اولیه پوشش در دمای ۲۵ درجه است.

در مقایسه با دمای ۴۰۰ درجه (شکل ۱۵ و ۱۶):

- مورفولوژی و تخلخل: در دمای ۴۰۰ درجه، تخلخل و آسیب فرسایشی بیشتری مشاهده شد، که احتمالاً به دلیل نرم شدن ماتریس کبالت و تنش‌های حرارتی بیشتر است. در دمای ۲۵ درجه، ساختار متراکم‌تر و پایداری باقی مانده است.

- آسیب فرسایشی: در ۴۰۰ درجه، بریدگی‌ها و گودشدگی‌ها بیشتر بود، در حالی که در ۲۵ درجه، سطح تقریباً

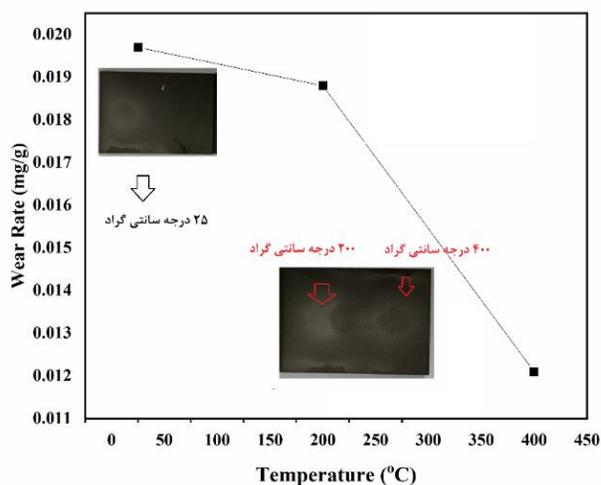
در شرایط فرسایش و خوردگی دمای بالا عملکرد مناسبی دارد [۲۳].

عوامل کلیدی تأثیرگذار در فرسایش دما بالا عبارتند از:

۱. سختی ریزساختار: هرچه سختی بیشتر باشد، مقاومت به جدا شدن ذرات بیشتر می‌شود.
۲. چسبندگی بین WC و Co: اگر ضعیف باشد، ضربه ذره فرسایشی باعث کنده شدن WC می‌شود.
۳. اکسیداسیون Co در دمای بالا: احتمال اکسید شدن زمینه Co وجود دارد، که باعث ضعف چسبندگی داخلی و ترک‌زایی می‌شود.
۴. تخلخل: محل تمرکز تنش ناشی از برخورد ذرات، عامل شکست موضعی خواهد بود.

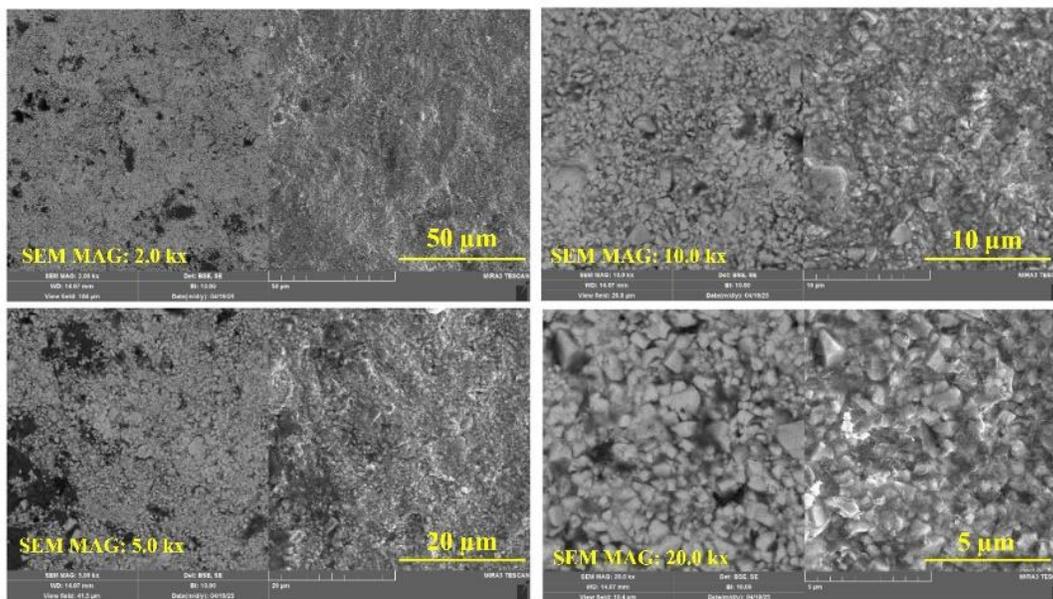
تفاوت رفتار معمول در آزمون فرسایش دما بالا در دماهای بالا به شرح ذیل است:

- در دمای ۲۰۰ °C: رفتار بیشتر مکانیکی بیشتر اهمیت پیدا می‌کند که وابسته به سختی و اتصال است.
- در ۴۰۰ °C: اثر حرارتی و شیمیایی شدیدتر شده و مقاومت به اکسیداسیون اهمیت زیادی پیدا می‌کند.

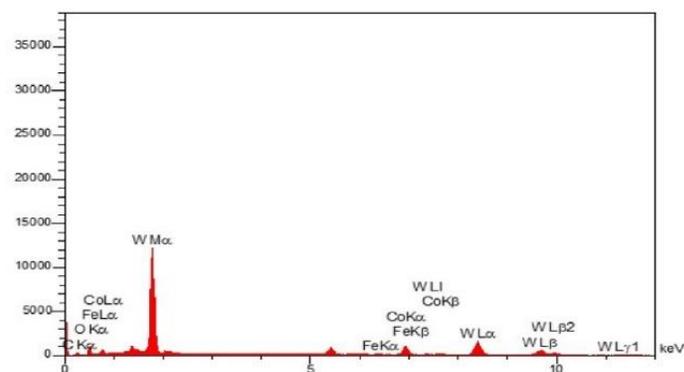
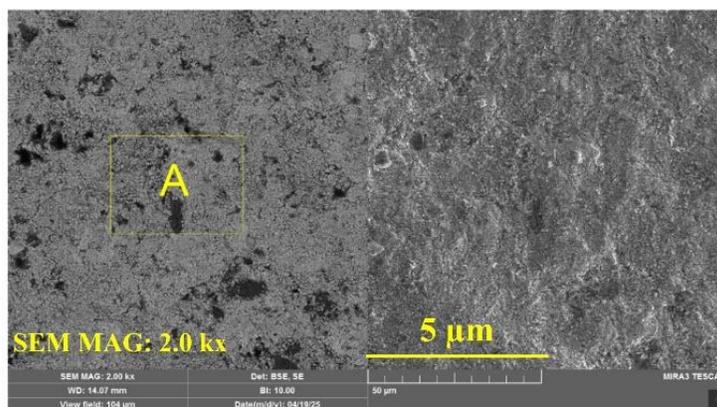


شکل ۱۲. نرخ فرسایش پوشش‌های WC-12Co در دمای ۲۰۰، ۲۵ و ۴۰۰ °C.

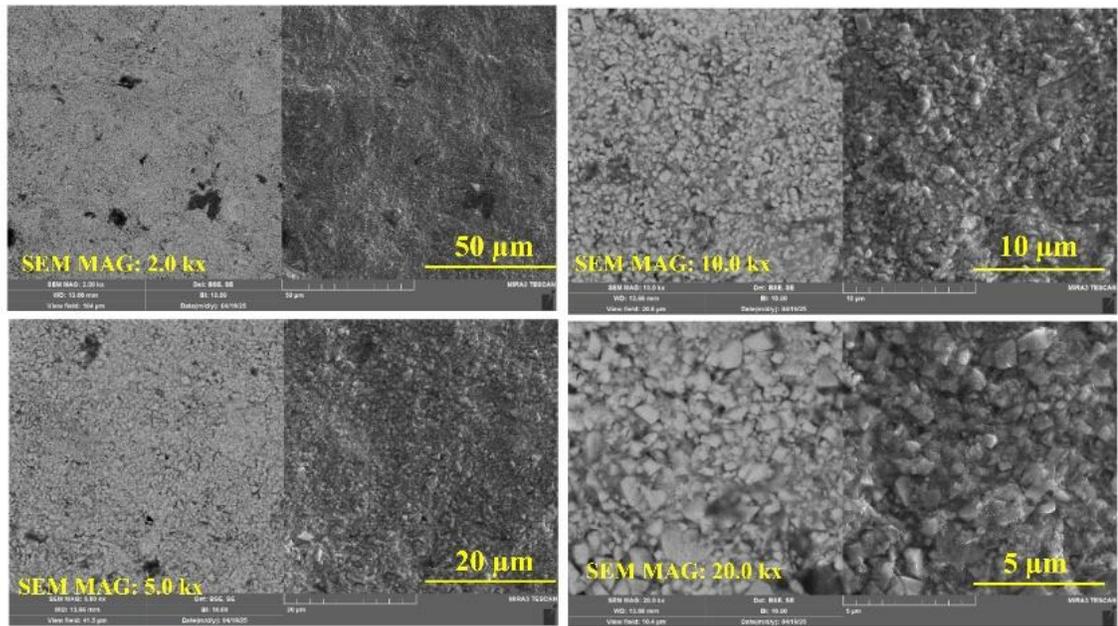
دست نخورده تر است، که نشان دهنده مقاومت بالاتر در دمایی - ترکها: در ۴۰۰ درجه، احتمال بروز ترکهای ریز بیشتر بود، پایین تر است. اما در ۲۵ درجه این پدیده کمتر دیده می شود.



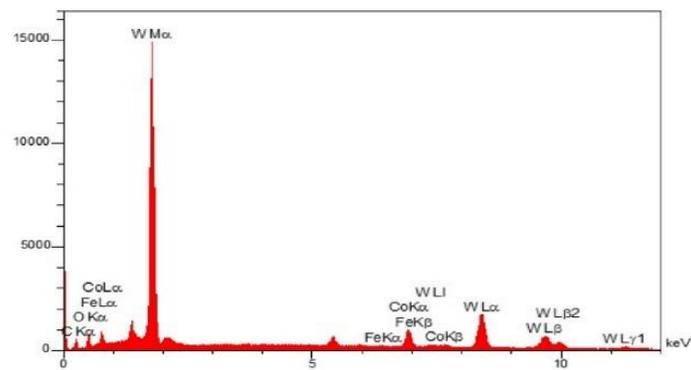
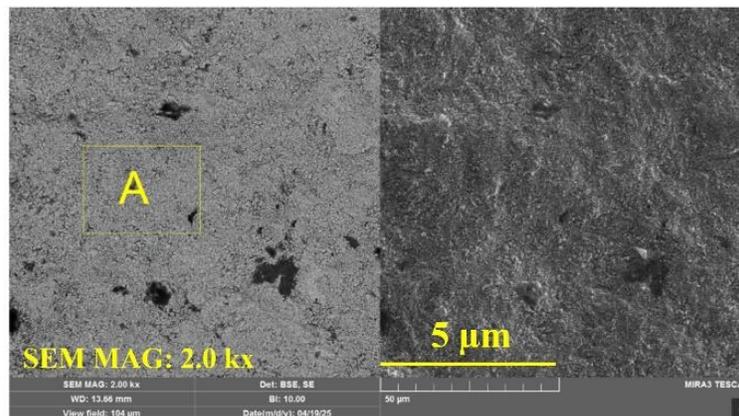
شکل ۱۳. تصاویر FESEM از آزمون فرسایش نمونه WC-12Co در دمایی ۲۵ °C.



شکل ۱۴. آنالیز عنصری از آزمون فرسایش نمونه WC-12Co در دمایی ۲۵ °C.



شکل ۱۵. تصاویر FESEM از آزمون فرسایش نمونه WC-12Co در دمای ۲۰۰ درجه سانتی گراد.



شکل ۱۶. آنالیز عنصری از آزمون فرسایش نمونه WC-12Co در دمای ۲۰۰ °C.

می‌شود که می‌تواند موجب کاهش چسبندگی داخلی و تسهیل جداشدن ذرات شود.

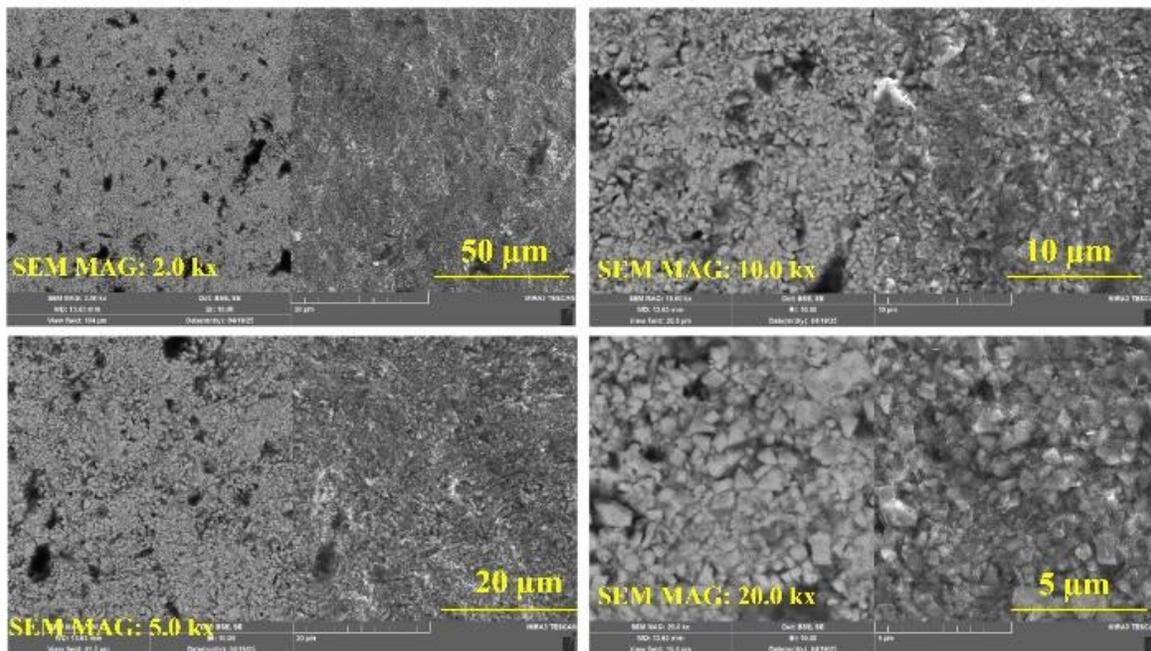
۳. تنش‌های حرارتی: سیکل‌های حرارتی و اختلاف ضریب انبساط حرارتی بین WC و Co باعث ایجاد میکروترک‌ها می‌شود که به‌عنوان نقاط آغاز جدایش عمل می‌کنند.

۴. کاهش یکپارچگی مرز WC-Co: در دماهای بالاتر، احتمال ایجاد فازهای ثانویه یا تخریب مرزها بیشتر شده و این امر مقاومت ضربه‌ای پوشش را کاهش می‌دهد.

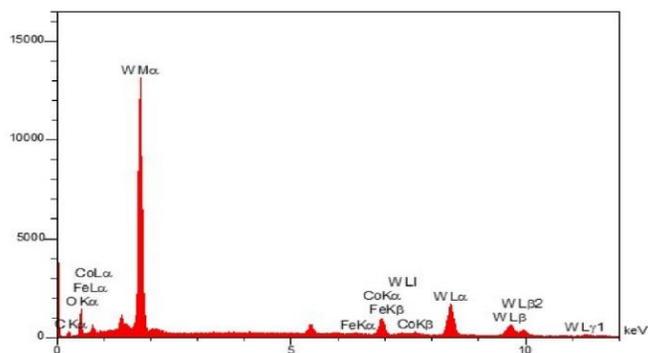
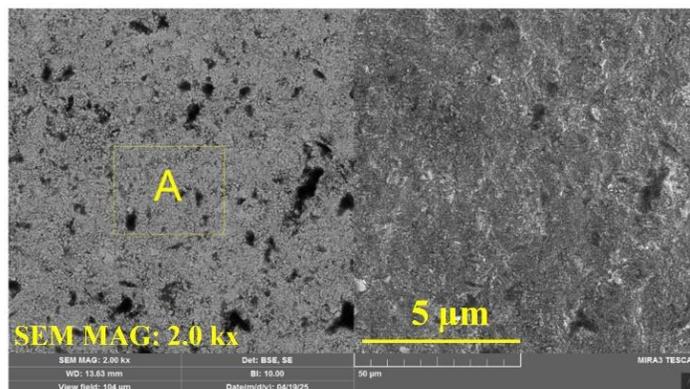
با بررسی تصاویر FESEM از نمونه WC-12Co (شکل ۱۷ و ۱۸): پس از آزمون فرسایش دما بالا در دماهای ۲۵، ۲۰۰ و ۴۰۰ °C (مطابق استاندارد ASTM G76)، تحلیل تفاوت‌ها در جدول ۶ خلاصه می‌شود. کاهش مقاومت فرسایشی پوشش WC-12Co با افزایش دما تا ۴۰۰ °C را می‌توان به چند عامل مکانیزمی نسبت داد:

۱. نرم‌شدگی ماتریس کبالت: افزایش دما باعث کاهش سختی زمینه Co شده و توانایی آن برای نگهداشت ذرات WC در برابر برخورد ذرات ساینده کاهش می‌یابد.

۲. افزایش اکسیداسیون: در دماهای بالاتر، تشکیل لایه‌های اکسیدی روی ماتریس و در اطراف ذرات WC تشدید



شکل ۱۷. تصاویر FESEM از آزمون فرسایش نمونه WC-12Co در دمای ۴۰۰ °C.



شکل ۱۸. آنالیز عنصری از آزمون فرسایش نمونه WC-12Co در دمای ۴۰۰ °C.

جدول ۶. تحلیل تصاویر FESEM در دماهای مختلف برای آزمون فرسایش دما بالا

درجه، اثرات حرارتی مشهود	همچنان متراکم		
ترک‌های ریز احتمالی، به دلیل تنش‌های حرارتی بیشتر	ترک‌های ریز بسیار محدود، پایداری خوب	تقریباً ناموجود، چسبندگی و پایداری بالا	ترک‌ها
متوسط، بریدگی‌ها و گودشدگی بیشتر،	کم، بریدگی‌ها و گودشدگی‌ها جزئی،	بسیار کم، سطح تقریباً دست‌نخورده ، حداقل	آسیب فرسایشی

ویژگی‌ها	دمای ۲۵ درجه	دمای ۲۰۰ درجه	دمای ۴۰۰ درجه
مورفولوژی سطح	دانه‌ای، بسیار یکنواخت و متراکم، حداقل ناهمگنی	دانه‌ای، یکنواخت اما با ناهمگنی جزئی بیشتر نسبت به ۲۵ درجه	دانه‌ای، یکنواخت اما با ناهمگنی بیشتر نسبت به دو دمای دیگر
تخلخل	بسیار کم، ساختار بسیار متراکم	کم، بیشتر از ۲۵ درجه اما	کم، بیشتر از ۲۵ و ۲۰۰

موجب تعادل مناسبی بین سختی بالا ($H_v > 1100$) و چقرمگی شده است که برای مقاومت فرسایشی حیاتی است. آزمون‌های خوردگی داغ در دمای 650°C و فرسایش دمای بالا در بازه ۲۵ تا 400°C نشان دادند که پوشش WC-12Co در شرایط سخت محیطی، عملکرد مناسبی از خود نشان می‌دهد. کاهش مقاومت فرسایشی با افزایش دما به نرم‌شدگی زمینه کبالت، افزایش اکسیداسیون، و بروز ترک‌های ریز نسبت داده شد. بنابراین، پوشش WC-12Co با ساختار دانه‌ای متراکم، زبری کنترل‌شده و سختی بالا، قابلیت بالایی برای افزایش دوام و پایداری عملکرد تجهیزات حساس به خوردگی و فرسایش در نیروگاه‌های حرارتی دارد. با این حال، پیشنهاد می‌شود بررسی‌های تکمیلی شامل ارزیابی نفوذ عوامل خوردنده در سطح مقطع و آزمون‌های عملکرد در شرایط عملیاتی طولانی‌مدت انجام شود تا تصویر کامل‌تری از کارایی این پوشش حاصل گردد.

۵- منابع و مراجع

- [1] P. K. Basu, "Combustion and gasification in fluidized beds," 2006.
- [2] M. Wiatros-Motyka, "NOx control for high-ash coal-fired power plants in India," *Clean Energy*, vol. 3, no. 1, pp. 24–33, 2019.
- [3] A. Corsini, A. Marchegiani, F. Rispoli, P. Venturini, and A. G. Sheard, "Predicting blade leading edge erosion in an axial induced draft fan," *Journal of engineering for gas turbines and power*, vol. 134, no. 4, 2012.
- [4] P. Roy and S. Ghosh, "Oxidation and hot corrosion behavior of thermal barrier coatings-A brief review," *High Temperature Corrosion of Materials*, vol. 99, no. 5, pp. 331–343, 2023.
- [5] Z. Ahmad, *Principles of corrosion engineering and corrosion control*. Elsevier, 2006.
- [6] A. Ghenaiet, "Predicting Erosion Damage in a Centrifugal Fan," *International*

اثرات فرسایش مشهودتر	بیشتر از ۲۵ درجه	بریدگی و گودشدگی	
یکنواخت، اما با کاهش جزئی برجستگی ذرات به دلیل نرم شدن ماتریس	یکنواخت، اما با کمی کاهش برجستگی ذرات نسبت به ۲۵ درجه	بسیار یکنواخت، ذرات برجسته و پایدار	توزیع ذرات WC
عملکرد خوب اما ضعیف‌تر از دو دمای دیگر، اثرات حرارتی مشهود	عملکرد خوب، مقاومت فرسایشی کمی کمتر از ۲۵ درجه	بهترین عملکرد، مقاومت فرسایشی بالا به دلیل دمای پایین	عملکرد کلی

۴- نتیجه گیری:

در این مطالعه، پوشش WC-12Co اعمال‌شده به روش HVOF بر روی زیرلایه فولادی، از جنبه‌های مختلف ساختاری و عملکردی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج XRD نشان‌دهنده حضور فازهای اصلی WC و W_2C بود که ناشی از واکنش‌های حرارتی در فرایند پاشش است. تحلیل‌های FESEM و نقشه‌نگاری عنصری (EDS) ریزساختار متراکم، توزیع یکنواخت ذرات WC و Co، و یکپارچگی مناسب پوشش را تأیید کردند. زبری متوسط و کنترل‌شده سطح، همراه با تخلخل کم ($< 10\%$)، به بهبود مقاومت خوردگی داغ کمک کرده و از نفوذ سریع عوامل خوردنده جلوگیری می‌کند. همچنین نسبت بهینه فاز سخت WC به زمینه Co

on stainless steel hydroturbine blades," *Journal of Thermal Spray Technology*, vol. 32, no. 4, pp. 970–983, 2023.

[17] Y. Zhao *et al.*, "Study on the microstructure and properties of WC-12Co cemented carbide fabricated by selective laser melting," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 20, pp. 3512–3521, 2022.

[18] S. Sarkar and P. P. Bandyopadhyay, "Role of carbide grit size and in-flight particle parameters on the microstructure, phases, and nanoscale properties of HVOF sprayed WC-12Co coatings," *Surface and Coatings Technology*, vol. 484, p. 130879, 2024.

[19] K. Fan *et al.*, "Influence of WC particle size on the mechanical properties and residual stress of HVOF thermally sprayed WC-10Co-4Cr coatings," *Materials*, vol. 15, no. 16, p. 5537, 2022.

[20] K.-W. Kim, A. B. Kale, Y.-H. Cho, S.-H. Park, and K.-A. Lee, "Microstructural and wear properties of WC-12Co cemented carbide fabricated by direct energy deposition," *Wear*, vol. 518, p. 204653, 2023.

[21] K.-W. Kim, G.-S. Ham, S.-H. Park, J.-W. Cho, and K.-A. Lee, "Direct energy deposition of ultrastrong WC-12Co cemented carbide: Fabrication, microstructure and compressive properties," *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, vol. 99, p. 105591, 2021.

[22] J. Wang, C. Ai, X. Yun, Z. Chen, and B. He, "Effects of 3D roughness parameters of sandblasted surface on bond strength of HVOF sprayed WC-12Co coatings," *Coatings*, vol. 12, no. 10, p. 1451, 2022.

[23] H. Jiang, X. Zhao, H. Song, and C. Li, "The effect of high-velocity air-fuel WC-12Co coatings on the wear and corrosion resistance of TC18 titanium alloy," *Coatings*, vol. 13, no. 4, p. 755, 2023.

Journal of Turbomachinery, Propulsion and Power, vol. 9, no. 2, p. 23, 2024.

[7] C. Li, "Relationships between the Microstructure and properties of thermally sprayed deposits, *Journal of Thermal Spray Technology*," 2002.

[8] S. D. Cramer *et al.*, *ASM handbook*. ASM international Materials Park, USA, 2003.

[9] V. Shibe and V. Chawla, "Erosion studies of D-gun-sprayed WC-12% Co, Cr₃C₂-25% NiCr and Al₂O₃-13% TiO₂ coatings on ASTM A36 steel," *Journal of Thermal Spray Technology*, vol. 28, no. 8, pp. 2015–2028, 2019.

[10] V. Panwar, N. K. Grover, and V. Chawla, "Wear behaviour of plasma sprayed WC- 12% Co and Al₂O₃- 13% TiO₂ coatings on ASTM A36 steel used for ID fans in coal fired power plants," *Materials Research Express*, vol. 6, no. 10, p. 1065b6, 2019.

[11] V. Saroop, D. Mudgal, S. Kumar, and S. Prakash, "Evaluation of corrosion mechanism for tungsten carbide coating exposed in actual boiler environment," *Engineering Failure Analysis*, vol. 118, p. 104905, 2020.

[12] R. Kumar, R. Kumar, and S. Kumar, "Erosion corrosion study of HVOF sprayed thermal sprayed coating on boiler tubes: a review," *IJSSMS*, vol. 1, no. 3, pp. 1–6, 2018.

[13] A. Glasser, W. Petlevich, and E. Sverdrup, "Nature and Costs of Fan Erosion in Coal-Fired Electric Power Plants (No. EPRI-CS-1596)," *Westinghouse Electric Corp., Pittsburgh, PA (USA). Research Labs*, 1980.

[14] *Standard Test Method for Conducting Erosion Tests by Solid Particle Impingement Using Gas Jets*. West Conshohocken (PA), A. I. A. G76-18, 2018.

[15] *ASTM International. ASTM E384-22: Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials*. West Conshohocken (PA): *ASTM International*;, 2022.

[16] H. Singh, M. Kumar, and R. Singh, "Microstructural and mechanical characterization of a cold-sprayed WC-12Co composite coating