

Investigating the effect of lubrication on the wear behavior of WC-12Co coating applied by HVOF method on steel substrate

Shayan Adlimoghadam¹, Hamid Khorsand^{1,*}

1- Faculty of Materials Science and Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

Abstract

Cemented carbides of the WC-Co family are one of the most popular materials for use in industry. Despite its high hardness, WC-Co has the appropriate toughness for applications where wear resistance is required. In this study, WC-12Co coating was deposited on a 304 steel substrate using the HVOF thermal spraying method. Microstructural examination of the cross-section of the applied coating and the coating surface was performed using a scanning electron microscope (SEM). Then, X-ray diffraction (XRD) analysis was performed on the deposited coating surface. Mechanical property tests including: hardness testing, surface roughness, fracture toughness, and porosity of the obtained coating surface were also performed. Also, the coatings deposited on the steel surface were subjected to pin wear tests on the disk with loads of 20 and 40 N, in dry and wet environmental conditions (using deionized water as a lubricant) and using a 52100 steel counterpart. The scratched surfaces were imaged using SEM. The test results showed that the applied coating reduced the friction coefficient, reduced weight, and had a lower scratch penetration depth than the uncoated sample. It was further determined by adding lubricant to the contact surface between the coating and the scratch, that the uncoated and coated samples experienced a lower friction coefficient and weight loss compared to their dry state. Also, the penetration depth in the sample in wet conditions was lower than in its dry state.

Keywords

Coating, 304 S.t., HVOF, Wear, WC/Co, Cementd Carbide

Article history:

Received: 14-08-2025

Accepted: 03-11-2025

Corresponding author:

*hkhorsand@kntu.ac.ir

بررسی اثر روانکاری بر رفتار سایشی پوشش WC-12Co اعمالی با روش HVOF بر روی زیر لایه فولادی

شایان عدلی مقدم^۱، حمید خرسند^{۱*}

۱- دانشکده مهندسی علم مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

تاریخ دریافت:

۱۴۰۴/۰۵/۲۳

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۴/۰۸/۱۲

چکیده

کاربدهای سماتنه خانواده WC-Co یکی از محبوب‌ترین مواد برای استفاده در صنعت هستند. WC-Co علیرغم داشتن سختی بالا، دارای چقرمگی مناسب جهت کاربری‌هایی که در آن‌ها مقاومت به سایش نیاز است، استفاده شوند. در این مطالعه پوشش WC-12Co با استفاده از روش پاشش حرارتی HVOF بر روی زیر لایه فولاد ۳۰۴ نشانده شد. بررسی ریز ساختاری از سطح مقطع پوشش اعمالی و سطح پوشش با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) انجام شد. سپس از پوشش‌نشانده شده بر روی سطح آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD) انجام شد. آزمون‌های خواص مکانیکی شامل: سختی‌سنجی، زبری سطح، چقرمگی شکست، تخلخل‌سنجی سطح پوشش بدست‌آمده انجام شد. همچنین از پوشش‌های نشانده شده بر روی سطح فولادی، آزمون سایش پین روی دیسک با اعمال بارهای ۲۰ و ۴۰ N، در شرایط محیطی خشک و تر (استفاده از آب دی یونیزه به‌عنوان روانکار) و با استفاده از پین خراش‌دهنده فولادی ۵۲۱۰۰ استفاده شد. تصویربرداری سطوح تحت خراش قرار گرفته با استفاده از SEM انجام شد. نتایج حاصل از آزمون نشان داد، پوشش اعمالی باعث کاهش ضریب اصطکاک، کاهش وزن و دارای عمق نفوذ خراش‌دهنده کمتر نسبت به نمونه بدون پوشش است. در ادامه با افزودن روانکار در سطح تماس بین پوشش و خراش‌دهنده مشخص شد، نمونه‌های بدون پوشش و پوشش‌دار نسبت به حالت خشک خود، ضریب اصطکاک، کاهش وزن کمتری را تجربه کردند. همچنین عمق نفوذ در نمونه در شرایط تر نسبت به حالت خشک خود، مقدار کمتر نشان داد.

پوشش‌دهی، فولاد ۳۰۴، HVOF، سایش، WC/Co، کاربرد سماتنه

واژگان کلیدی

۱- مقدمه

سایش به‌طور قابل توجهی بر عملکرد فرآیندهای تولید، ایمنی، قابلیت اطمینان و اقتصاد تأثیر می‌گذارد زیرا مصرف انرژی را افزایش می‌دهد. این امر طول عمر ابزارها و سایر اجزای ماشین را کاهش می‌دهد و بطور جدی بر کیفیت محصول تأثیر می‌گذارد. سایش زمانی اتفاق می‌افتد که محیط‌های میانی و اطراف به‌طور طبیعی با قطعات عملکردی در نتیجه مواد از سطح جدا شوند. رسوب‌دهی پوشش بهترین ابزار برای اصلاح سطح برای افزایش مقاومت در برابر سایش است. این فناوری به‌طور گسترده در کاربردهای مختلف صنعتی مدرن، از جمله پره‌های توربین، سیلندرهای هوانوردی، هوافضا، شیرآلات، پالایشگاه‌های نفت، غلتک‌ها در کارخانه‌های کاغذ و غیره کاربرد دارد [۱]. تکنیک‌های مختلفی برای رسوب‌دهی مواد سخت وجود دارد که در آن‌ها تکنیک‌های پوشش‌دهی به‌طور گسترده در صنایع مورد استفاده قرار می‌گیرند. پوشش‌های پوشش‌دهی شامل اسپری شعله‌ای، پوشش‌دهی با سوخت اکسیژن با سرعت بالا (HVOF)، اسپری پلاسما و تفنگ انفجاری می‌شود [۲].

فرآیند پوشش‌دهی HVOF ریزساختار متراکم و یکنواختی ارائه می‌دهند. از این فرآیند برای رسوب‌دهی مواد فلزی یا غیرفلزی روی زیرلایه در حالت مذاب استفاده می‌شود [۳]. پوشش‌های HVOF مقاومت بالایی در برابر شرایط سخت مانند رطوبت، نفوذ ذرات ساینده و فرسایشی ارائه می‌دهند [۴]. کامپوزیت پودری فلزات و هارد متال‌ها به راحتی می‌توانند به عنوان تکنیک‌های رسوب‌گذاری استفاده شوند [۵]. کامپوزیت‌های پودری فلزات پایه تنگستن، کبالت-نیکل و کروم اغلب با تکنیک پوشش‌دهی HVOF استفاده می‌شوند [۶]. پوشش‌دهی HVOF باعث کاهش کربن‌زدایی و تخلخل می‌شود که منجر به کاهش دمای پاشش و سرعت اسپری بالاتر می‌شود و در نتیجه چقرمگی، مقاومت در برابر سایش و استحکام اتصال عالی حاصل می‌شود [۷]. خواص سایشی، مکانیکی و ریزساختاری تحت تأثیر اندازه دانه پودر اولیه، تنش پسماند و درصد بایندر قرار می‌گیرند. اندازه دانه کوچک پودر به دلیل کاهش تخلخل، مقاومت سایشی و سختی را افزایش می‌دهد [۸، ۹]. پوشش‌های بر پایه تنگستن، نیکل و کروم برای بهبود مقاومت به سایش و سایر خواص مکانیکی استفاده می‌شوند [۱۰، ۱۱]. بایندرهای کبالت و نیکل معمولاً با پودر مواد اولیه استفاده می‌شوند، اما کبالت به دلیل استحکام پیوند بالاتر، به‌طور گسترده با WC استفاده می‌شود. علاوه بر این، بایندرهای نیکل نسبت به بایندرهای کبالت در برابر خوردگی مقاوم‌تر هستند [۱۲، ۱۳]. در مطالعات پیشین بررسی رفتار سایشی پوشش WC-12Co در

تغییر تعدادی از پارامترها بررسی شده است [۱۴-۱۶]. در پژوهش حاضر به مقایسه رفتار سایشی پوشش WC-12Co اعمالی با روش HVOF بر روی فولاد ۳۰۴ در حالت خشک و روانکاری شده پرداخته خواهد شد.

۲- تجربی

۲-۱- مواد پوشش و عملیات پاشش حرارتی

ابتدا نمونه‌های فولادی پس از تهیه، طبق استاندارد ASTM G 99 با استفاده از وایرکات به ابعاد $3 \text{ cm} \times 4 \text{ mm}$ برش داده شدند. سپس نمونه‌ها جهت انجام فرایند پاشش حرارتی HVOF با استفاده از سنبله‌های ۱۰۰، ۲۲۰، ۴۰۰، ۶۰۰، ۸۰۰، ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ و همچنین با استفاده از عملیات پولیش صیقل‌سازی شدند. سپس سطح زیر لایه با استون جهت از تمیز کردن آلودگی و چربی‌زدایی انجام شد. سپس جهت ایجاد زبری بر روی سطح جهت ایجاد استحکام چسبندگی پوشش و زیر لایه از ذرات SiC با مش ۱۶ میکرون عملیات ماسه‌پاشی انجام شد.

پودرهای کروی WC-12Co زینتر و آگلومره شده با اندازه ذرات $15-45 \mu\text{m}+$ که توسط شرکت بهبود صنعت مهان تامین شدند، استفاده شد. فرایند پوشش‌دهی با استفاده از تفنگ پاشش XPOJET-5000 ساخت کشور هند بر روی فولاد آستنیتی ۳۰۴ انجام شد. در فرایند پاشش حرارتی از نفت سفید (کروسن) به عنوان سوخت و از گاز نیتروژن به عنوان گاز حامل استفاده شد. پودر توسط گازهای حامل به نازل وارد می‌شود، جایی که با جت فشار بالای تشکیل شده توسط گازهای اکسی استیلن ترکیب می‌شود. قبل از فرایند پاشش پودرهای پوشش‌دهنده به مدت ۵۰ دقیقه در یک کوره مافل تا دمای ۱۵۰ درجه سانتیگراد گرم می‌شوند تا عناصر فرار و رطوبت از بین بروند [۱۶]. مشخصات فرایند پوشش‌دهی در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱. پارامترهای فرایند پوشش‌دهی HVOF.

Table 1. HVOF coating process parameters.

Parameter	Value
Oxygen Flow	1086 L/min
Kerosene flow rate	32 L/hour
Carrier Gas Flow Rate	24 L/min
Spray Distance	35 cm
Spray Velocity	1200 m/s

۲-۲- دستگاه و تجهیزات استفاده شده و روش کار

پس از عملیات پوشش‌دهی، مجدداً نمونه‌ها با استفاده از سنبله‌های ۱۰۰، ۲۰۰، ۴۰۰، ۸۰۰، ۱۰۰۰، ۲۰۰۰ صیقل داده شده و با استفاده

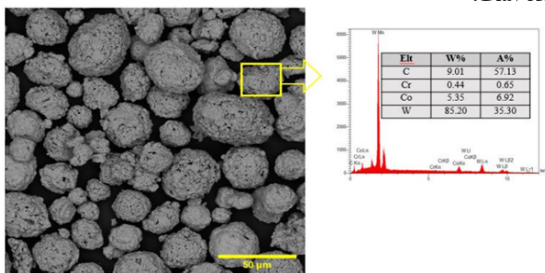
جدول ۲. پارامترهای تست سایش لغزشی.

Parameter	Condition
Apply Load	20, 40 N
Counter Part	52100
Enviroment	Dry, Wet (DI water)
Distance	500 m
Temprature	Room
Round	140 r/min

۳- بحث و نتیجه گیری

۳-۱- ریز ساختار و آنالیز فازی پودر اولیه و پوشش نهایی

تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) همراه با آنالیز طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDS) جهت تعیین خلوص پودر اولیه مورد استفاده در فرایند لایه نشانی در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. تصویر SEM و آنالیز EDS از پودرهای مورد استفاده در فرایند لایه نشانی.

Figure 1. SEM image and EDS analysis of the powders used in the deposition process.

تصاویر SEM نشان می‌دهند که ذرات پودر کروی هستند و به یکدیگر چسبیده و با بایندر فلزی پوشانده شده‌اند. پودرها به دلیل شکل کروی خود، جریان پذیری را در طول رسوب پوشش افزایش می‌دهند. دانه‌های پودر دارای ریزحفره‌های سطحی زیادی بودند که می‌تواند بر ویژگی‌های نهایی پوشش حاصله تاثیر گذار باشد. همچنین نتایج حاصل از آنالیز XRD پودرهای استفاده شده در شکل ۲ نشان داده شده است. همانطور که مشخص است، WC به عنوان پیک اصلی و Co به عنوان پیک فرعی مشخص شده‌اند. شکل ۳ مورفولوژی سطح و سطح مقطع پوشش اعمالی WC-Co12 را نشان می‌دهد.

همانطور که در شکل ۳ الف نشان داده شده است، مورفولوژی سطح پوشش WC-12Co را نشان می‌دهد که تخلخل کم را نشان می‌دهد. دانه‌های پودر WC به طور یکنواخت در بایندر Co توزیع شده‌اند و میکروسختی در محدوده بالاتر از ۱۱۰۰ HV را

از خمیر الماسه تا حد آینه‌ای صیقلی شدند. پس از عملیات صیقل‌سازی بررسی‌های ریز ساختاری با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (TESCAN VEGA 3) انجام شد. ترکیب فازی بدست آمده در پوشش با استفاده از پراش سنج اشعه ایکس (PANalytical Xpert Pro MPD) با استفاده از هدف مس، در ولتاژ کاری ۴۰ KV و جریان ۳۰ mA و زاویه اسکن ۲۰-۸۰ درجه انجام شد. مقدار ریزسختی سطح پوشش با استفاده از دستگاه ریزسختی سنج (پویش صنعت MV 400) بر اساس استاندارد ASTM E 384 تحت بار ۵۰۰ گرم به مدت ۳۰ ثانیه در ۵ نقطه اندازه‌گیری شد و مقدار نهایی با استفاده از میانگین مقادیر بدست آمده تعیین شد. برای تعیین میزان تخلخل از نرم افزار ImageJ استفاده از تصاویر SEM سطح پوشش انجام شد. زبری سطح با استفاده از دستگاه زبری سنج Mitutoyo- SJ 410 استفاده شد. آزمون چقرمگی شکست با استفاده از دستگاه سختی سنج شرکت کوپا پژوهش مدل UV 1 از سطح مقطع پوشش اعمالی انجام شد. آزمون چقرمگی شکست با استفاده از آزمون فرورونده ویکرز در سطح مقطع پوشش اعمالی انجام شد. این نوع آزمون در مواد با سختی بالا و ترد انجام پذیر است [۱۷]. محاسبه میزان چقرمگی شکست با استفاده از معادله ۱ انجام شد [۱۸].

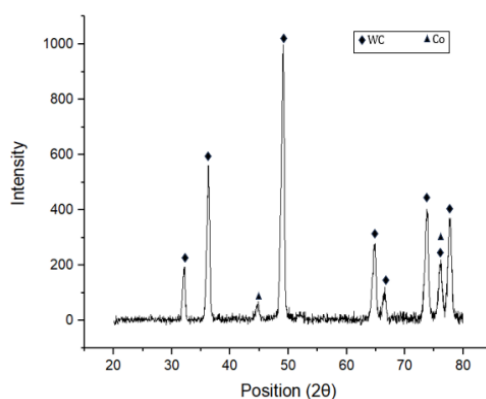
$$K_{Ic} = 0.79 \left(\frac{P}{a} \right)^{3/2} \log(4.5 \frac{a}{c}) \leq 4/5 \quad (1)$$

در معادله ۱، K_{Ic} مقدار چقرمگی شکست (MPa \sqrt{m})، P مقدار بار اعمالی (mN)، c میزان ترک ایجاد شده از مرکز نقطه اثر و $2a$ قطر فرورونده می‌باشد.

آزمایش سایش با استفاده از دستگاه (شرکت دانش بنیان تجهیز صنعت نصر WTC 02) طبق استاندارد ASTM G 99-95 انجام شد. آزمایش سایش بصورت پین روی صفحه با استفاده از پین خراش دهنده فولادی ۵۲۱۰۰ با قطر ۶ میلی‌متر و با سختی ۵۵ راکول سی انجام شد. بارهای اعمالی بر روی نمونه ۲۰ و ۴۰ نیوتون است. همچنین آزمون در دو محیط خشک و تر با استفاده از آب دی‌یونیزه انجام شد. در طی آزمون سایش ضریب اصطکاک بطور مداوم توسط نرم افزار Lab View محاسبه شد. میزان کاهش وزن در آزمون سایش با استفاده از ترازوی الکترونیکی DELMER با دقت ۰/۰۰۰۱ انجام شد. میزان عمق نفوذ ساییده در نمونه تحت خراش با استفاده از دستگاه زبری سنج Mitutoyo- SJ 210 انجام شد. همچنین مناطق تحت سایش قرار گرفته از طریق آنالیز SEM و EDS بررسی شد. پارامترهای ایجاد شده در آزمون سایش پین روی دیسک در جدول ۲ نشان داده شده است.

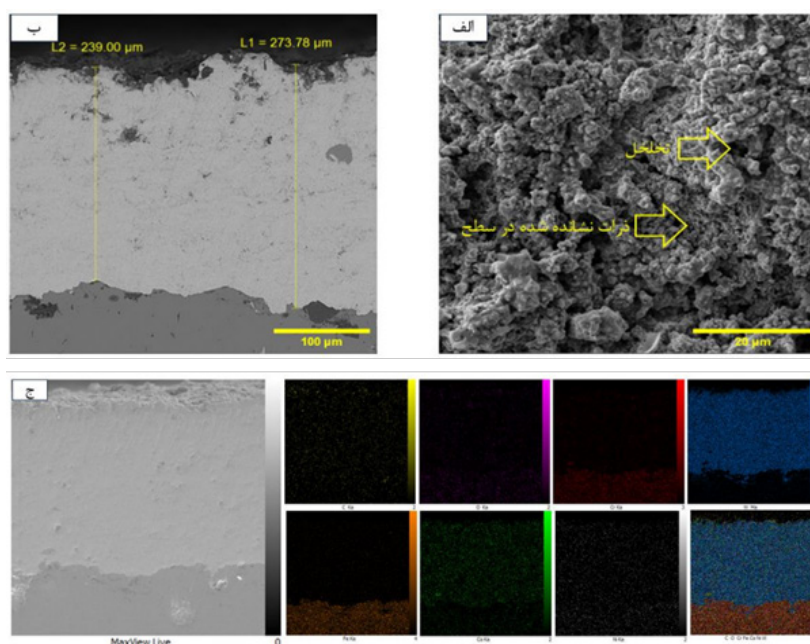
نقش مهمی در تعیین میزان چسبندگی لایه‌های نشسته و در نتیجه استحکام نهایی پوشش به زیرلایه دارد. همچنین همانطور که از سطح مقطع و نحوه اتصال پوشش به زیرلایه مشخص است، ذرات WC در طول رسوب پوشش در بایندر کبالت ذوب شده، پخش می‌شوند. به دلیل نقطه ذوب پایین‌تر، کبالت ابتدا ذوب می‌شود و WC با نقطه ذوب بالاتر در کبالت ذوب شده پخش می‌شود که به دلیل آن اندازه دانه ذرات W کاهش می‌یابد و در نتیجه ریزساختار متراکم تشکیل می‌شود [۹]. مکانیزم اصلی ایجاد این چسبندگی، اتصال مکانیکی ناشی از فرورفتگی سطح و قفل شدن مکانیکی سطح و پوشش، به ویژه پس از فرآیند سندبلاست است و پیوند

تضمین می‌کنند. در فرآیند پاشش HVOF، دانه‌ها انرژی جنبشی بالایی داشتند. در نتیجه، دانه‌های رسوب داده شده پس از برخورد با زیرلایه به‌طور قابل توجهی تغییر شکل دادند. کبالت مذاب در طول فرآیند رسوب‌گذاری، شکاف‌ها و منافذ را پر کرد. بنابراین، پوشش WC-12Co در پاشش HVOF نیمه ذوب شد [۱۹] ولی همچنان در تصویر ذرات ذوب نشده نیز وجود دارد. در شکل ۳ ب که نشان داده شده است، میانگین ضخامت پوشش اعمالی حدوداً $250 \mu\text{m}$ است. همانطور که مشخص است، پیوند خوبی بین پوشش و زیرلایه وجود دارد. دمای فصل مشترک ذره در لحظه برخورد با سطح زیرلایه، که به‌عنوان دمای تماس شناخته می‌شود،



شکل ۲. نتایج آنالیز XRD پودر اولیه.

Figure 2. XRD analysis results of the feedstock powder.



شکل ۳. تصویر ریز ساختاری حاصل از پوشش WC-12Co. الف) تصویر SEM از سطح پوشش اعمالی ب) تصویر SEM از سطح مقطع پوشش اعمالی ج) آنالیز MAP از سطح مقطع پوشش اعمالی.

Figure 3. Microstructural image of WC-12Co coating. A) SEM image of the applied coating surface B) SEM image of the applied coating cross-section C) MAP analysis of the applied coating cross-section.

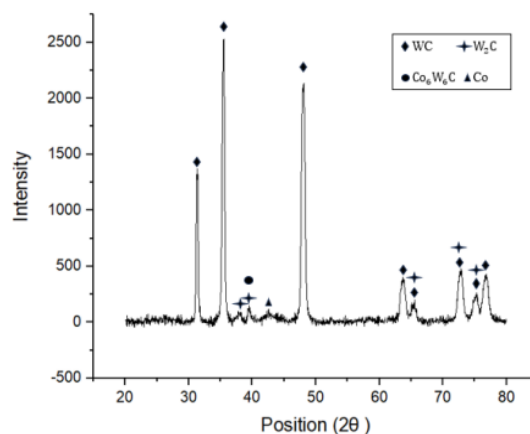
در فرآیند پاشش حرارتی، کربن زدایی پودرهای کاربرد فلزی اتفاق می‌افتد. بایندر کبالت در پودرهای WC-Co به سرعت ذوب می‌شود و در دماهای بالا، WC حل می‌شود. سپس اکسیژن موجود در شعله می‌تواند به سرعت با کربن موجود در محلول واکنش داده و گازهای CO یا CO₂ تشکیل دهد که از سیستم خارج می‌شوند. WC با تخلیه کربن تجزیه می‌شود. تجزیه و اکسیداسیون WC-Co در طول پاشش معمولاً باعث تولید فازهای نامطلوب و پیچیده‌ای مانند W₂C، W، فازهای آمورف و سایر ترکیبات می‌شود. کربن زدایی به صورت سینتیکی انجام می‌شود؛ یعنی وابسته به دما و زمان است. میزان تجزیه را می‌توان با کاهش دمای شعله و افزایش سرعت آن به حداقل رساند. در کل، این پدیده را می‌توان این گونه توصیف کرد که کربن آزاد موجود در پودرها می‌تواند به طور بالقوه در طول پاشش حرارتی باعث تخریب و آسیب به پوشش شود. به جای تجزیه ذرات WC-Co در دماهای بالا، فازهای شکننده و نامطلوبی مانند W₂C یا فازهای اتا (η) ممکن است تشکیل شوند. در بررسی که استوارت و همکارانش در سال ۲۰۰۰ [۲۳] انجام دادند، نشان داده شد، وقوع فاز W₂C در هنگام سرد شدن سریع ذرات جدا شده از تفنگ پاشش، به دلیل حل شدن کاربرد تنگستن در ماتریس کبالت رخ می‌دهد. در مجموع سختی پوشش‌ها به شدت به میزان فاز W₂C موجود در پوشش وابسته است، زیرا این فاز سخت‌تر از فاز WC است. در نهایت می‌توان نتیجه گرفت که هرچه درجه تجزیه WC بالاتر باشد، سختی پوشش بیشتر خواهد بود و بالعکس، حفظ فازهای WC و Co منجر به سختی پایین‌تر می‌شود. همچنین وجود فاز Co₆W₆C در پوشش WC-Co12 مشاهده شد. فاز Co_xW_xC یک فاز پیچیده است که در آن کبالت، تنگستن و کربن با نسبت‌های مختلف ترکیب شده‌اند. وجود این فاز معمولاً نشان‌دهنده کاهش کربن (دکربوریزاسیون) در پودر اصلی WC-Co است. این فاز می‌تواند به دلیل ناخالصی‌ها در مواد اولیه یا شرایط نامناسب در طول فرآیند تولید پودر WC-Co، مانند دمای بالا، اتمسفر نامناسب یا زمان طولانی، ایجاد شود. معمولاً این فاز که به نام فاز η شناخته می‌شود، همراه با فازهای Co_xW_xC (معمولاً 3، 6=x) در پوشش‌های رسوب داده شده مشاهده می‌شود که ناشی از حرارت بسیار بالای محفظه تفنگ پاشش است [۲۴].

۳-۲- خواص مکانیکی

ریز سختی، تخلخل، زبری سطح و چقرمگی شکست پوشش در جدول ۴ نشان داده شده است.

متالورژیکی سهم کمتری در این فرآیند دارد [۲۰]. همچنین، دمای حاکم بر ذرات تأثیر بسزایی بر شکل‌گیری ریزساختار نهایی پوشش اعمال می‌کند. ایجاد دمای بالا در تفنگ پاشش و همچنین سرعت نزدیک ما فوق صوت در روش HP/HVOF باعث برخورد سریع ذرات پوشش به زیر لایه می‌شود که در نتیجه باعث افزایش تراکم و حداقل تخلخل پوشش می‌شود. در شکل ۳ (ج) همانطور که از آنالیز مپ بدست آمده از سطح مقطع پوشش مشخص است، میزان توزیع عناصر مختلف را نشان داده است. وجود عناصر نیکل و کروم در پوشش اعمالی را می‌توان در نتیجه پیوند متالورژیکی بین پوشش و زیرلایه نسبت داد [۲۱]. وجود عنصر اکسیژن در لایه پوشش، می‌تواند تاییدی بر تشکیل اکسیدها در طول عملیات پاشش حرارتی HVOF باشد [۲۲].

تصویر آنالیز XRD پوشش اعمالی در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴. نتایج آنالیز XRD سطح پوشش اعمالی.

Figure 4. XRD analysis results of the applied coating surface.

همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده است، الگوهای پیک XRD پوشش اعمالی مانند نمونه پودر اولیه، با مقدار بالاتر شدت پیک فاز WC سخت پیروی می‌کند که نشان‌دهنده فراوانی به مراتب بیشتر آن می‌باشد. همچنین پیک‌های مشاهده شده مربوط به C₂W، بیانگر وقوع کربن زدایی در حین فرآیند رسوب گذاری هستند. در طول پاشش حرارتی پودرهای WC-Co کربن زدایی رخ می‌دهد و فازهای فاقد کربن تولید می‌شود. مراحل کربن زدایی در جدول ۳ نشان داده شده است [۲].

جدول ۳. مراحل کربن زدایی پودر WC.

Table 3. WC powder decarbonization steps.

Equations
$2WC \rightarrow W_2C + C$
$W_2C \rightarrow 2W + C$
$2C + O_2 \rightarrow 2CO(\text{gas})$

است. پوشش WC-12Co بدلیل چسبندگی مناسب بایندر به ذرات کاربیدی WC دارای تراکم بالا و سختی بالا منجر می‌شود. در هنگام فرایند پاشش ذرات WC در حالت جامد و Co در حالت مایع هستند، در اینصورت بایندر کبالت پیوند قوی بین پوشش و زیر لایه ایجاد می‌کند. همچنین مقادیر بدست‌آمده از تخلخل و زبری سطح معمولاً به پارامترهای فرایند بستگی دارد. مقادیر بدست‌آمده از پوشش حاصله را می‌توان به سرعت بالای فرایند HVOF در هنگام پاشش ذرات که باعث تراکم بالای پوشش و کاهش پستی و بلندی‌های سطح می‌شود، نسبت داد.

چقرمگی شکست پوشش‌های WC-Co معمولاً بیشتر از پوشش‌های WC است. بطور کلی میزان میکروسختی و چقرمگی شکست به ویژگی ریز ساختاری، مانند اندازه و توزیع کاربیدها، میزان فازهای سخت پوشش، میزان تخلخل و خواص فاز بایندر می‌باشد [۲۸].

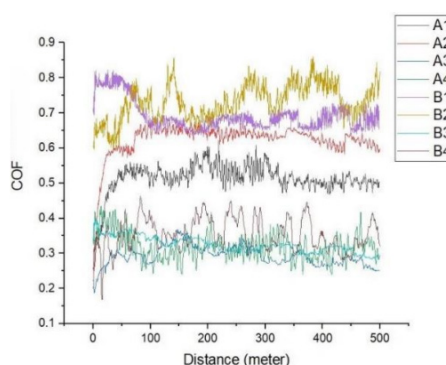
۳-۳- آزمون سایش لغزشی و ضریب اصطکاک

شکل ۵ منحنی ضریب اصطکاک نمونه پوشش دار و بدون پوشش در حالت‌های خشک و تر نشان داده شده است. علاوه بر این برای درک بهتر مقادیر میانگین در حالت‌های خشک و تر به در جدول ۶ نشان داده شده است. البته باید این نکته را متذکر شد، برای درک

جدول ۵. کد گذاری نمونه‌های تحت سایش با توجه به تغییر پارامترهای سایش.

Table5. Coding of worn samples according to changing wear parameters.

Code	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4
Sample	Coat	Coat	Coat	Coat	Bare	Bare	Bare	Bare
Load	20	40	20	40	20	40	20	40
Environment	Dry	Wet	Wet	Dry	Dry	Wet	Wet	Dry



شکل ۵. منحنی ضریب اصطکاک در نمونه‌های تحت سایش قرار گرفته.

Figure5. Friction coefficient curve in worn samples.

جدول ۶. منحنی ضریب اصطکاک در نمونه‌های تحت سایش قرار گرفته.

Table6. Friction coefficient curve in worn samples.

Sample	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4
Avg. COF	0.51	0.62	0.29	0.32	0.70	0.73	0.33	0.35

جدول ۴. خواص مکانیکی پوشش WC-12Co.

Table4. Mechanical properties of WC-12Co coating.

Mechanical Properties	Value
MPa√m)Fracture toughness	4.58
Roughness (Ra, μm)	4.75
Porosity (%)	1.9
(HV)Microhardness	1207

برای بدست آوردن مقدار نهایی ریز سختی پوشش WC-12Co، از ۵ نقطه بدست‌آمده مقدار ریز سختی، میانگین گرفته شد. ریزسختی پوشش WC-12Co به دلیل تشکیل فاز سخت W_2C و اندازه دانه کوچک ذرات WC در ماتریس WC-Co و همچنین ریزسختی متراکم به‌طور قابل توجهی بالا است. ریزسختی پوشش‌های پایه WC نیز توسط بسیاری از محققان بالاتر از HV ۱۰۰۰ گزارش شده است [۲۷-۲۵]. باید به این نکته توجه کرد که میزان میکروسختی در نمونه بدون پوشش HV ۲۸۰ تعیین شد که در مقایسه با با نمونه پوشش‌دار بطور قابل توجهی کمتر

اعمالی، ساینده فولادی بیشتر در فاز بایندر پوشش‌ها فرو می‌رود که موجب افزایش COF و درگیری بیشتر در سطح تماس بین پین و نمونه می‌شود [۳۱]. این درگیری در سطوح پوشش‌دار بیشتر از نمونه بدون پوشش است و در نتیجه منجر به افزایش میانگین COF در هر دو نوع پوشش می‌گردد. در ادامه حرکت ساینده و فرایند اصطکاک، ذرات ساینده باعث ایجاد حفره‌های خراش‌مانند روی سطح می‌شوند. گرمای اصطکاکی حاصل در طول سایش، موجب افزایش دمای موضعی شده و در نتیجه اکسیدهای مختلفی مانند Co و W تشکیل می‌شوند. این لایه اکسید تریبو، که دارای مقاومت برشی پایینی است، مسئول کاهش COF در مراحل بعدی سایش است [۱۷].

در فرایند سایش در حالت تر پوشش WC-12Co سطح در معرض سایش دچار خوردگی شده و به تدریج محصولات اکسیداسیون نظیر W_3O تشکیل می‌شوند. این اکسیدهای تشکیل شده دارای خواص روان کاری مناسبی هستند که می‌توانند به کاهش بیشتر COF پوشش در طول فرآیند سایش لغزشی کمک کنند. علاوه بر این، حضور مایع نیز اثر روان کاری خاصی دارد که در بهبود عملکرد سایش مؤثر است [۳۲]. در کل می‌توان به این نتیجه دست یافت، COF همه نمونه‌ها در محیط سیال آب دی‌یونیزه کمتر از شرایط خشک است. البته، در یک پژوهش شیپوی و همکارانش بررسی کردند، که هرچه سیال مورد استفاده خاصیت خوردگی بیشتری داشته باشد، میزان حل شدن فاز کبالت در بایندر افزایش می‌یابد. این امر منجر به ناهمواری بیشتر سطح پوشش پس از خیس شدن می‌شود. در نتیجه، ذرات پسماند حاصل از سایش در طول فرآیند سایش لغزشی مرطوب به مقدار بیشتری تولید می‌شوند [۳۳].

۳-۳-۱- بررسی ریز ساختاری از نواحی تحت سایش

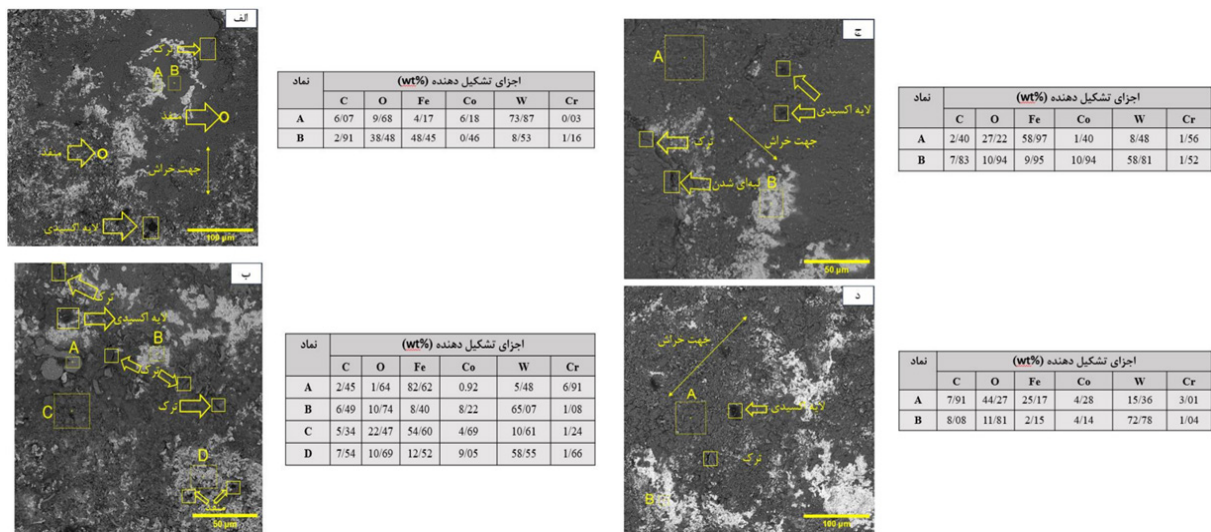
پس از اعمال آزمون سایش، سطح تحت تخریب با استفاده از SEM تصویربرداری شد. بررسی سطح تخریب نمونه پوشش‌دار و بدون پوشش در شکل ۶ و ۷ نشان داده شده است.

تصاویر SEM از سطح ساییده شده به شناسایی مکانیسم‌های مختلف سایش که در حین حرکت لغزشی رخ می‌دهند، کمک می‌کند. در مورد پوشش‌های WC-12Co، نشان‌های مشابهی از جمله تغییر شکل و وجود ریزحفره‌ها مشاهده شد. تغییر شکل و پاشش مواد احتمالاً به دلیل فشارهای تماسی بالا و نیروهای سایشی در طول آزمون رخ داده است که منجر به پرتاب ذرات ریز از پوشش شده‌اند. زبر شدن قطعات HVOF ناشی از عمل سایشی است. با این حال، برهمکنش مکانیکی با قطعه خراش‌دهنده باعث زبر شدن قطعات می‌شود. جریان مواد در نتیجه برهمکنش

و تحلیل آسان‌تر رفتار سایشی نمونه‌ها با توجه به تغییر پارامترهای بار و محیط انجام آزمون سایش، نمونه‌های تحت سایش با توجه به تغییر پارامترهای فوق، کد گذاری نمونه‌ها انجام شد که در جدول ۵ نشان داده شده است.

در همه نمونه‌ها، در ابتدا (۰ تا حدود ۵۰ متر)، افزایش شدیدی در ضریب اصطکاک (COF) دیده می‌شود که مربوط به مرحله‌ی درگیری اولیه و تماس سطحی است. همچنین افزایش شدید COF در مرحله ابتدایی را می‌توان این‌گونه توجیه کرد: در ابتدای سایش لغزشی، COF با گذشت زمان به شدت افزایش می‌یابد. این به دلیل وجود یک جسم ریز محدب بر روی سطح تماس بین پوشش و خراش‌دهنده است که منجر به ایجاد یک سطح تماس کوچک می‌شود. با سایش مداوم، سطح تماس پوشش و خراش‌دهنده به تدریج افزایش می‌یابد، بار افزایش یافته مسطح شده و COF کاهش می‌یابد و سپس سایش لغزشی وارد حالت پایدار می‌شود. البته این نکته را باید متذکر شد که مرتبط کردن مقادیر COF با میزان از دست‌رفت مواد دشوار است، اما در برخی منابع ذکر شده است که COF پایین‌تر به معنای مقاومت بیشتر در برابر سایش است [۲۹].

فولاد پایه ماهیتی نرم دارد، ولی سطوح پوشش داده شده سختی بیشتری دارند که مقاومت به سایش بالاتری به آن‌ها می‌دهد. هنگامی که فولاد پایه در معرض سایش قرار می‌گیرد، ممکن است تحت اعوجاج پلاستیک یا جدایش قرار گیرد که به‌طور بالقوه منجر به گیرکردن بین سطوح لغزشی می‌شود. این پدیده به نوبه خود باعث افزایش نرخ کاهش وزن در فولاد پایه می‌شود. در هر دو بار ۲۰ نیوتن و ۴۰ نیوتن، فولاد پایه بالاترین COF را نشان می‌دهد که احتمالاً عامل افت جرم بالا است. وجود ذرات معلق ایجاد شده از طریق تغییر شکل پلاستیک و استخراج مواد، در واقع با COF بالاتر در فولاد پایه تثبیت می‌شود. در سطح پوشش داده شده، به دلیل پراکندگی ذرات WC در مجاورت محل لایه بالایی، ممکن است یکنواختی کاهش یابد و در ادامه مسیر سایش منجر به COF بالاتری شود. با این حال، این افزایش در COF به دلیل حمایت قابل توجه ذرات سخت WC، به کاهش وزن تبدیل نمی‌شود [۳۰]. در بار اعمالی بالاتر، به دلیل افزایش فشار و سطح تماس بین پین و نمونه تحت آزمون، نیروی اصطکاکی افزایش می‌یابد. افزایش اولیه COF را می‌توان به ناهمواری‌های سطحی و افزایش تنش تماسی موضعی ناشی از تماس ذرات ساینده با این ناصافی‌ها نسبت داد [۳۱]. با افزایش فاصله لغزش، مساحت واقعی تماس سطحی بیشتر شده و در نتیجه تنش تماسی کاهش می‌یابد. با این حال، یکی دیگر از عوامل مؤثر این است که با افزایش نیروی



شکل ۶. تصویر SEM از سطح تخریب پوشش WC-12Co. الف) بار ۲۰ N در شرایط خشک ج) بار ۲۰ N در شرایط تر د) بار ۴۰ N در شرایط تر. Figure 6. SEM image of the worn surface of WC-12Co coating. a) 20 N load in dry condition b) 40 N load in dry condition c) 20 N load in wet condition d) 40 N load in wet condition.

مکانیکی بین پوشش و قطعه خراش دهنده مشاهده شده است که باعث جریان یافتن و توزیع مجدد مواد روی سطح می شود [۳۰]. در بار ۲۰ نیوتن، در پوشش WC-12Co (شکل الف)، وجود منافذ و ترک نیز مشاهده می شود. حرکت برشی باعث کنده شدگی ماده از سطح پوشش می گردد [۱]. ذرات سخت WC همراه با سایش و لایه لایه شدن سطح پوشش به دلیل خستگی سطح حذف شده اند. با افزایش بار، عرض مسیر سایش نیز افزایش یافته و شدت حذف مواد، همانطور که از تصاویر SEM مشاهده می شود، بیشتر شده است. سطح فرسوده در بار ۲۰ نیوتن نسبتاً صاف و برای بار ۴۰ نیوتن ناهموار مشاهده شده است. همان طور که در قسمت (ب) نشان داده شده، با افزایش بار، تعداد بیشتری حفره و ریز ترک بر سطح ایجاد شده اند که این امر منجر به افزایش میزان سایش نسبت به حالت بار ۲۰ نیوتن شده است [۱۴]. پیشرفت ریز ترک های زیر سطحی همراه با بیرون کشیدن مداوم ذرات WC منجر به پوسته پوسته شدن در طول مسیر سایش شده است. همچنین، حفره های قابل مشاهده ای روی سطح فرسوده پوشش HVOF به دلیل بیرون کشیدن مداوم ذرات WC ظاهر شده اند [۳۴]. ترک های ایجاد شده در دانه های کاربرد تنگستن و حذف ذرات ناپایدار کاربرد تنگستن منجر به تکه تکه شدن دانه ها شده است. همچنین باید اشاره کرد که در بارهای بالاتر، تغییر شکل پلاستیک، سایش سه جزئی به واسطه مکانیزم های سایش، حفره های پوسته ای، ترک های خستگی و شکست ذرات به دلیل خستگی سطحی، از جمله مکانیسم های اصلی سایش هستند. علاوه بر این، داده های EDS نشان می دهند که انتقال مواد از

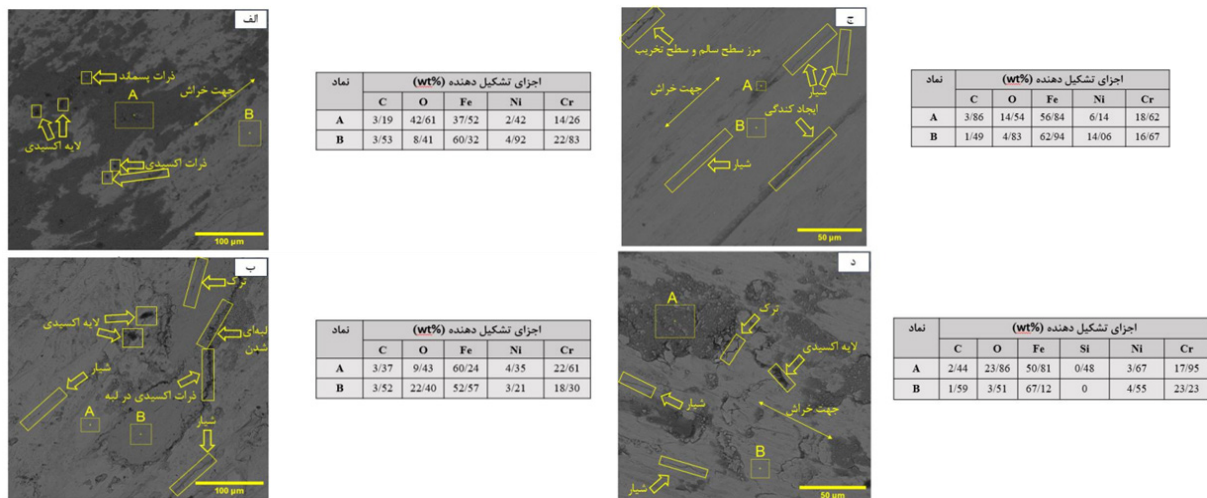
خراش دهنده فولادی به مسیر سایش از طریق نفوذ انجام شده است. درصد نسبتاً بالای اکسیژن در صفحات تحت سایش نیز نشان دهنده وقوع اکسیداسیون در طول لغزش است. البته به طور کلی، این پدیده در بارهای بالاتر به دلیل فشار تماس بالاتر بین نمونه و خراش دهنده، مشهودتر است [۱۴]. مکانیزم سایش در این حالت از نوع سایش خراشان است. در آزمون پوشش WC-12Co در شرایط تر (بخش ج)، که با استفاده از آب دی یونیزه و تحت بار ۲۰ نیوتن انجام شد، پین در تماس مستقیم با سطح نمونه دیسکی قرار گرفت و موجب سایش سطحی پوشش گردید. با این حال، باید توجه داشت که استفاده از روانکار آب دی یونیزه، لایه ای بین سطح تماس بین خراش دهنده و سطح پوشش نمونه ایجاد می کند که باعث کاهش شدت سایش در مقایسه با شرایط مشابه در حالت خشک می شود. در طول فرآیند سایش لغزشی مرطوب، پس از خیس شدن، روانکار ابتدا به بایندر کبالت حمله کرده و در نتیجه آن، ذرات سخت WC از سطح جدا می شوند. این جدا شدن ذرات WC باعث ایجاد حفره هایی در سطح شده و تمرکز تنش در این حفره ها، منجر به آغاز ترک و گسترش آن تحت تأثیر تنش های چرخشی متناوب می شود. در نهایت، این فرآیند به لایه لایه شدن پوشش می انجامد. به طور همزمان، یک لایه غیرفعال بر روی سطح پوشش تشکیل می شود. این لایه غیرفعال دارای خاصیت روانکاری مناسب بوده و می تواند به طور مؤثری سایش لغزشی مرطوب را کاهش دهد. همچنین، محصولات غیرفعال سازی نقش مؤثری در این کاهش سایش ایفا می کنند. در فرآیند سایش لغزشی مرطوب، محصولات غیرفعال سازی به طور

سایش خراشان است؛ زیرا پوشش در برخی نقاط به‌طور کامل از سطح جدا شده و به زیرلایه رسیده است. همچنین با توجه به درصد بالای اکسیژن، می‌توان نتیجه گرفت که سایش اکسیداسیون نیز به‌عنوان مکانیزم دیگر در این ناحیه نقش دارد.

در ادامه سطح تخریب نمونه بدون پوشش در شکل ۷ نشان داده شده است. در تصاویر SEM، همان‌طور که مشاهده می‌شود، شیارهای بلندی دیده می‌شوند که نشان‌دهنده نواحی فرسوده‌تر سطح هستند [۲۲]. نشان‌های متمایز سایش شامل لب‌پریدگی، بقایای مواد تغییر شکل یافته، شکست نرم و وجود حفره‌ها و منافذ روی سطوح فرسوده فولاد ۳۰۴ مشاهده می‌شود. این ویژگی‌ها عمدتاً به ماهیت نسبتاً نرم‌تر و شکل‌پذیرتر این ماده هنگام قرارگرفتن در معرض عمل سایشی و فشارهای تماسی بالا در طول آزمایش نسبت داده می‌شوند. لب‌پریدگی سایشی ممکن است ناشی از نیروهای خراش‌دهنده و سایشی اعمال شده توسط مواد سخت‌تر باشد که منجر به جدا شدن قطعات کوچک می‌شود. بقایای مواد تغییر شکل یافته احتمالاً از طریق تغییر شکل پلاستیک ماده تحت بار اعمال شده ایجاد شده‌اند. شکست نرم به‌صورت تغییر شکل پلاستیک موضعی، معمولاً به شکل شیارها یا فرورفتگی‌ها، مشاهده شده است. علاوه بر این، وجود حفره‌ها و منافذ ذاتی در ماده، با عمل به‌عنوان مکانیزمی برای تمرکز تنش و حذف مواد، سایش را تشدید می‌کند. در مجموع، این علائم نشان می‌دهند که سایش خراشان، میکروبرش و تغییر شکل پلاستیک، مکانیزم‌های غالب سایش در فولاد بدون پوشش ۳۰۴ در طول آزمایش پین روی دیسک هستند [۳۰]. در بخش (الف)، همان‌طور که مشاهده

مداوم تشکیل و حذف می‌شوند. به‌طور کلی، مکانیزم‌های سایش لغزشی مرطوب پوشش‌ها شامل سایش خراشان، سایش خوردگی و سایش خستگی است. نتایج EDS از حفره‌های پوسته‌ای که با بقایای اکسیده پر شده‌اند، میزان اکسیژن بالاتری را نشان می‌دهد. از آنجا که آزمایش‌های سایش لغزشی مرطوب در محیط اتمسفری انجام شده‌اند، وجود اکسیژن نشان‌دهنده تشکیل محصولات اکسیداسیون روی سطح ساییده شده پوشش است [۳۵]. با توجه به آنالیز عنصری EDS در بخش A، درصدهای قابل‌توجه اکسیژن و آهن در سطح تخریب‌شده نشان می‌دهد که فرآیند سایش تا زیرلایه فولاد ۳۰۴ نفوذ کرده و منجر به تشکیل اکسید در این ناحیه شده است. همچنین، آنالیز EDS مربوط به بخش B در سطح تخریب‌شده، ترکیبی را نشان می‌دهد که مربوط به ساختار اصلی پوشش است.

در نمونه پوشش WC-12Co در حالت‌تر و تحت بار ۴۰ نیوتن (بخش د)، همانند بخش ج، مقادیر پایین عناصر W و Co در آنالیز EDS بیانگر آن است که پوشش در این ناحیه دچار سایش شدیدتری نسبت به حالت بار ۲۰ نیوتن شده است. علاوه بر این، درصد بالای اکسیژن نیز نشان‌دهنده آن است که پس از خراشیده شدن کامل پوشش و نمایان شدن زیرلایه، سطح تحت اکسیداسیون قرار گرفته است. در آنالیز EDS مربوط به بخش B، که از ناحیه تحت سایش برداشت شده است، مقدار بسیار زیاد عنصر تنگستن مشاهده می‌شود که بیانگر باقی‌ماندن ذرات WC در ساختار پوشش است. همچنین، حضور کربن و کبالت در کنار تنگستن، این موضوع را تأیید می‌کند که این ناحیه همچنان مربوط به پوشش اولیه می‌باشد. مکانیزم اصلی خراش در این منطقه،



شکل ۷. تصویر SEM از سطح سایش نمونه بدون پوشش. (الف) بار ۲۰ N در شرایط خشک (ب) بار ۴۰ N در شرایط خشک (ج) بار ۲۰ N در شرایط خشک (د) بار ۴۰ N در شرایط تر.

Figure 7. SEM image of the worn surface of the Bare sample. a) 20 N load in dry condition b) 40 N load in dry condition c) 20 N load in wet condition d) 40 N load in wet condition.

می‌شود، دو ناحیه آنالیز شده با EDS با نمادهای A و B مشخص شده‌اند. در ناحیه A، میزان بالای اکسیژن نشان‌دهنده تشکیل محصولات اکسیدی است که ناشی از دمای موضعی بالا در اثر اصطکاک بین دو جسم در شرایط سایش خشک می‌باشد. حضور آهن و کروم همراه با اکسیژن می‌تواند بیانگر تشکیل اکسیدهای آهن-کروم مانند Fe_3O_4 و Cr_2O_3 باشد. این ترکیبات معمولاً به‌عنوان فیلم‌های اکسیدی شکنده روی سطح تشکیل می‌شوند. این فیلم‌ها ممکن است نقش محافظتی موقت ایفا کنند اما به‌سرعت در اثر سایش از سطح جدا شده و خود به‌عنوان ذرات ساینده ثانویه عمل می‌کنند. همچنین، وجود درصد کربن می‌تواند نشان‌دهنده انتقال کربن از پین ساینده به نمونه تحت آزمون باشد. در ناحیه B، درصد اکسیژن نسبتاً پایین‌تر نسبت به ناحیه A بیانگر این است که در این ناحیه اکسیداسیون سطحی محدودتر بوده و تخریب سطح کمتر اتفاق افتاده است. همچنین، با توجه به نزدیکی درصد مقادیر کروم، آهن و نیکل به ترکیب اسمی فولاد ۳۰۴، این ناحیه می‌تواند نمایانگر مناطقی با حداقل آسیب سطحی در آزمون باشد. هرچند درصد نسبتاً بالای کروم نسبت به نمونه حد معمول خود را می‌توان به پدیده غنی‌شدگی سطحی کروم نسبت داد. در فرآیند سایش خشک، کروم تمایل بالایی به مهاجرت به سطح و تشکیل فیلم‌های اکسیدی محافظ دارد. در نواحی که میزان اکسیداسیون پایین‌تر بوده یا تخریب سطحی کمتر رخ داده است، کروم به‌صورت آزاد در سطح باقی‌مانده و موجب افزایش نسبی درصد آن در آنالیز EDS می‌شود. همچنین، حذف نسبی عناصر دیگر مانند آهن در اثر اکسیداسیون یا سایش موضعی نیز می‌تواند به افزایش نسبت کروم کمک کند [۳۶]. در شکل (ب) همان‌طور که مشاهده می‌شود، ترک‌های سطحی نشان‌دهنده تمرکز تنش شدید در طول تماس لغزشی هستند. باید توجه داشت که افزایش بار باعث ایجاد تنش‌های برشی بیشتر در سطح شده و احتمال تشکیل ترک‌های ناشی از خراش را افزایش می‌دهد. شکل‌گیری لایه‌های نازک جدا شده از سطح، نمایانگر سایش خراشان شدید و ترکیبی از سایش چسبان و اکسید است. در ناحیه A، محتوای کم اکسیژن و مقدار بالای آهن نشان می‌دهد که این ناحیه کمتر تحت تأثیر سایش قرار گرفته و ترکیب آن نزدیک به آلیاژ پایه است. مقدار بالاتر کروم نسبت به حد معمول به دلیل مهاجرت سطحی کروم در دمای بالای ناشی از سایش خشک است. در ناحیه B، میزان بالای اکسیژن نشان‌دهنده تشکیل لایه اکسیدی غنی از Fe و Cr است. کاهش آهن نسبت به ناحیه A تأیید می‌کند که Fe تا حدی اکسیده شده یا به‌دلیل سایش از سطح حذف شده است. به‌طور کلی، در بار بالاتر تخریب

مکانیکی نقش برجسته‌تری داشته و باعث تشکیل ترک و لایه‌لایه شدن شده است. در بخش (ج) شیارهای یکنواخت و خطی که در امتداد مسیر سایش شکل گرفته‌اند، نشان‌دهنده سایش خراشان هستند. این اثر ناشی از تماس ذرات سخت فولاد ۵۲۱۰۰ با سطح نرم‌تر فولاد ۳۰۴ است. شیارها به‌صورت منظم، عمیق و موازی با مسیر حرکت خراش‌دهنده ظاهر شده‌اند. وجود این شیارها در محیط مرطوب نشان می‌دهد که روانکاری آب دی‌یونیزه نتوانسته تماس خراش‌دهنده و نمونه را به‌طور کامل حذف کند. در آنالیز EDS، ناحیه A نمایانگر بخشی از سطح است که در تماس مکرر با ساینده قرار گرفته و دچار اکسیداسیون شده است. میزان نسبتاً زیاد اکسیژن نشان‌دهنده تشکیل اکسیدهای فلزی در اثر واکنش سطح با اکسیژن محلول در آب است. ناحیه B سطحی است که کمتر تحت سایش قرار گرفته و هنوز زمان کافی برای اکسید شدن نداشته است. در کل می‌توان گفت اکسیداسیون سطحی در برخی نواحی اتفاق افتاده اما شدت آن به اندازه آزمون خشک نیست. با وجود کاهش دمای سطحی و روانکاری نسبی، تماس فلز به فلز همچنان وجود دارد که باعث کندگی و خراش شده است. در بخش (د) خطوط سایشی مشاهده می‌شوند که نشان از حرکت لغزشی پین ساینده بر سطح نمونه دارد. شدت این شیارها نسبت به آزمایش‌های با نیروی پایین‌تر بیشتر است که نشان‌دهنده افزایش نرخ انتقال تنش مکانیکی در سطح است. یکی از نکات مهم این است که در آزمایش‌های با بار بالا، حتی در شرایط تر، تشکیل ترک با اثر سایشی قابل توجه است که در بخش (د) نشان داده شده است. در آنالیز EDS بدست آمده از سطح تخریب در ناحیه A، میزان اکسیژن نشان‌دهنده تشکیل لایه‌های اکسیدی ضخیم مانند اکسید آهن و اکسید کروم است. این لایه‌ها شکننده بوده و در اثر سایش می‌شکنند و جدا می‌شوند. حضور سیلیسیم ممکن است ناشی از آلودگی محیطی یا تأثیر انتقال از خراش‌دهنده باشد. در ناحیه B، مقدار اکسیژن بسیار کمتر از ناحیه A است که حاکی از سطح نسبتاً کمتر ساییده شده و همچنین درصد زیاد آهن و کروم نزدیک به ترکیب اصلی فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ است. نبود سیلیسیم و درصد پایین‌تر کربن نسبت به ناحیه A احتمالاً بیانگر سطحی است که تازه در معرض تماس قرار گرفته و محصولات اکسیدی از آن حذف شده‌اند. مکانیزم سایش در این نمونه، سایش خراشان و سایش اکسیداسیون و همچنین حضور شیارهای متعدد در اثر تماس ذرات سخت فولاد ۵۲۱۰۰ با سطح نمونه است. همچنین با افزایش بار، فشار تماس بالا رفته و این مکانیزم تشدید می‌شود.

در شرایط بار مساوی، نرخ کاهش وزن را در نمونه WC-12Co حدوداً ۴ برابر و در نمونه بدون پوشش تقریباً ۱۰ برابر کاهش یافته است. در پوشش WC-12Co به دلیل نقطه ذوب پایین کبالت، این ماده به سرعت ذوب شده و ذرات کاربرد تنگستن در کبالت ذوب شده پخش می‌شوند که منجر به کاهش اندازه ذرات کاربرد و افزایش چگالی ذرات کاربرد در WC-12Co می‌شود که در نتیجه باعث افزایش چگالی پوشش نهایی شده و بدنبال آن سختی بالاتر و کاهش وزن کمی را تجربه می‌کند [۱۶].

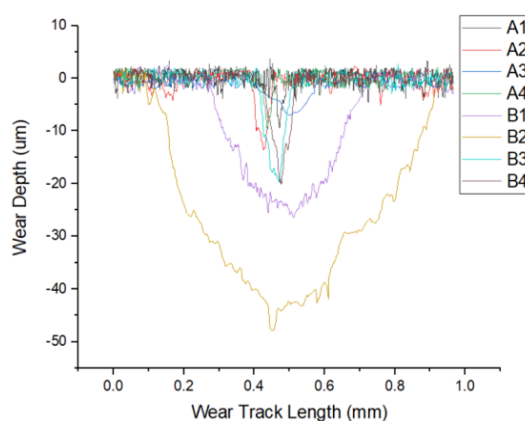
۳-۳-۳- بررسی عمق نفوذ سایش

بررسی عمق نفوذ سایش یکی از روش‌های مهم برای ارزیابی مقاومت سایشی مواد محسوب می‌شود. عمق نفوذ نشان‌دهنده میزان فرو رفتگی خراش‌دهنده در نمونه است. انجام این آزمون با استفاده از دستگاه زبری‌سنج صورت می‌گیرد. در این آزمون، پروب دستگاه زبری‌سنج بر روی منطقه تحت سایش نمونه قرار داده می‌شود و هر چقدر مقدار عمق نفوذ (بر حسب μm) منفی‌تر باشد، نشان‌دهنده مقدار عمق نفوذ بیشتر خراش‌دهنده در نمونه است. شکل ۸ میزان عمق نفوذ در نمونه‌های تحت خراش را نشان داده است. برای درک راحت‌تر مقادیر عمق نفوذ، بیشترین مقدار عمق نفوذ در جدول ۸ نشان داده شده است.

جدول ۷. میزان کاهش وزن نمونه‌ها.

Table 7. The amount of weight loss of the samples.

Sample	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4
Weight Loss	0.0008	0.0013	0.0002	0.0007	0.0092	0.0375	0.0008	0.0045



شکل ۸. میزان عمق نفوذ نمونه‌ها ناشی از سایش لغزشی شرایط خشک و تر.

Figure 8. Depth of penetration of samples due to sliding wear in dry and wet conditions.

جدول ۸. بیشترین مقدار عمق نفوذ در نمونه‌های تحت سایش در شرایط خشک و تر.

Table 8. . Maximum penetration depth in samples subjected to abrasion in dry and wet conditions.

Sample	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4
(μm)Wear Depth	0.0008	0.0013	0.0002	0.0007	0.0092	0.0375	0.0008	0.0045

۶- میزان کاهش وزن نمونه‌ها پس از انجام آزمون سایش، نشان داده شد، نمونه‌های پوشش‌دار نسبت به نمونه‌های بدون پوشش کاهش وزن به شدت کمتری را از خود نشان دادند. بطوریکه این اختلاف کاهش وزن در شرایط مشابه در برخی موارد به ۱۱ برابر در شرایط مشابه رسید. در شرایط روانکاری میزان کاهش وزن در همه نمونه‌ها و علی‌الخصوص نمونه خام به شدت کاهش یافت، ولی همچنان باز هم نسبت به نمونه پوشش‌دار دارای اختلاف زیادی بود.

۷- بررسی میزان عمق نفوذ خراش دهنده در همه نمونه با استفاده از دستگاه پروفیلومتر اندازه‌گیری شد، که مشخص شد در هر دو بار نمونه پوشش‌دار نسبت به نمونه خام عمق نفوذ کمتری را از خود نشان داد که نشان دهنده مقاومت بیشتر نمونه پوشش‌دار نسبت به نمونه خام می‌باشد.

همانطور که از شکل ۸ و جدول ۸ نشان داده شده است، نمونه‌ای بدون پوشش بطور چشمگیری عمق نفوذ بالاتری نسبت به نمونه‌های پوشش‌دار از خود نشان دادند که نشان دهنده مقاومت به سایش بالای نمونه پوشش‌دار نسبت به نمونه بدون پوشش می‌باشد. با افزایش مقدار بار اعمالی از ۲۰ به ۴۰ نیوتون به دلیل افزایش سطح تماس پین با نمونه‌ها، عمق نفوذ سایش نیز افزایش می‌یابد. می‌توان رابطه‌ای بین میزان عمق نفوذ و مقدار کاهش وزن در نمونه‌های تحت سایش بدست آورد بطوریکه، مقادیر به‌دست‌آمده از عمق نفوذ سایش رابطه مستقیمی با میزان کاهش وزن نمونه در طول آزمون سایش دارند؛ به این معنی که با افزایش عمق نفوذ، کاهش وزن نمونه نیز به بیشینه مقدار خود می‌رسد. استفاده از آب دی‌یونیزه به عنوان روانکار در آزمون سایش باعث کاهش چشمگیر عمق نفوذ سایش نمونه‌ها، به ویژه در نمونه‌های بدون پوشش، می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در شرایط تر نیز مانند شرایط خشک، بیشترین عمق نفوذ مربوط به نمونه‌های بدون پوشش B3 و B4 است. در هر دو بار ۲۰ و ۴۰ نیوتن، نمونه‌های پوشش‌دار عملکرد بسیار بهتر و بهینه‌تری نسبت به نمونه‌های بدون پوشش از خود نشان دادند.

۴- نتیجه‌گیری

- ۱- پوشش‌دهی کاربید سماتته WC-12Co با روش HVOF با موفقیت بر روی زیرلایه فولاد ۳۰۴ انجام شد.
- ۲- پوشش WC-12Co اسپری شده با HVOF شامل فازهای WC و Co است که سختی قابل توجهی را برای افزایش مقاومت به سایش فراهم می‌کند. ساختار پوشش در فصل مشترک اتصال، متراکم و به خوبی با زیرلایه و مشخص شد که پیوند مکانیکی نسبت به پیوند متالورژیکی سهم بیشتری را در اتصال به زیر لایه ایفا می‌کند.
- ۳- در مقایسه با نمونه خام که میکرو سختی HV ۲۸۰ نشان داد، نمونه پوشش سختی بالغ بر HV ۱۲۰۷ را دارا بود که اختلاف چشمگیری با نمونه خام داشت.
- ۴- در آزمون سایش پین روی دیسک، برای پوشش WC-12Co مشخص شد که استفاده از پوشش باعث کاهش ضریب اصطکاک نسبت به نمونه بدون پوشش شده است. همچنین استفاده از روانکار در نمونه‌های پوشش‌دار و بدون پوشش باعث کاهش ضریب اصطکاک در مقایسه با شرایط خشک شده است که می‌تواند به سبب آن باعث کاهش میزان سایش شود.
- ۵- در هر دو نمونه نشان داده شد، عمده مکانیزم سایش، سایش خراشان و در برخی مواقع مکانیزم سایش، اکسیداسیون می‌باشد.

۵- مراجع

- [1] T. K. Mishra, A. Kumar and S. Sinha, Experimental investigation and study of HVOF sprayed WC-12Co, WC-10Co-4Cr and Cr₃C₂-25NiCr coating on its sliding wear behaviour, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, vol. 94, p. 105404, 2021.
- [2] J. Nerz, B. Kushner and A. Rotolico, Microstructural evaluation of tungsten carbide-cobalt coatings, *Journal of Thermal Spray Technology*, vol. 1, pp. 147-152, 1992.
- [3] T. K. Mishra, A. Kumar, S. Sinha and S. Sharma, Investigation of sliding wear behaviour of HVOF carbide coating, *Materials Today: Proceedings*, vol. 5, pp. 19539-19546, 2018.
- [4] M. S. Zoei, M. H. Sadeghi and M. Salehi, Effect of grinding parameters on the wear resistance and residual stress of HVOF-deposited WC-10Co-4Cr coating, *Surface and Coatings Technology*, vol. 307, pp. 886-891, 2016.
- [5] Š. Houdková, F. Zahálka, M. Kašparová and L.-M. Berger, Comparative study of thermally sprayed coatings under different types of wear conditions for hard chromium replacement, *Tribology Letters*, vol. 43, pp. 139-154, 2011.
- [6] H. S. Sidhu, B. S. Sidhu and S. Prakash, Wear characteristics of Cr₃C₂-NiCr and WC-Co coatings deposited by LPG fueled HVOF, *Tribology International*, vol. 43, pp. 887-890, 2010.
- [7] C.-J. Li, A. Ohmori and K. Tani, Effect of WC particle size on the abrasive wear of thermally sprayed WC-Co coatings, *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 14, pp. 175-184, 1999.
- [8] A. Dent, S. DePalo and S. Sampath, Examination of the wear properties of HVOF sprayed nanostructured and conventional WC-Co cermets with different binder phase contents, *Journal of thermal spray technology*, vol. 11, pp. 551-558, 2002.
- [9] Q. Yang, T. Senda and A. Ohmori, Effect of carbide grain size on microstructure and sliding wear behavior of HVOF-sprayed WC-12% Co coatings, *Wear*, vol. 254, pp. 23-34, 2003.
- [10] S. Pourmorad Kaleybar and H. Khorsand, Investigating the microstructure and phase analysis of high entropy alloy CoCuFeMnNi made by vacuum induction furnace, *Founding Research Journal*, vol. 8, pp. 117-124, 2024.
- [11] S. Pourmorad Kaleybar and H. Khorsand, Effects of Annealing Temperature on the Microstructure and Mechanical Properties of the As-Cast Dual-Phased CoCuFeMnNi High Entropy Alloys Fabricated by Vacuum Induction Melting Method, *Journal of Materials Engineering and Performance*, pp. 1-11, 2024.
- [12] H. Chen, C. Xu, J. Qu, I. Hutchings, P. Shipway and J. Liu, Sliding wear behaviour of laser clad coatings based upon a nickel-based self-fluxing alloy co-deposited with conventional and nanostructured tungsten carbide-cobalt hardmetals, *Wear*, vol. 259, pp. 801-806, 2005.
- [13] R. J. Wood, Tribology of thermal sprayed WC-Co coatings, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, vol. 28, pp. 82-94, 2010.
- [14] A. R. Govande, B. R. Sunil and R. Dumpala, Tribological Characteristics of WC-12Co Coatings Sliding Against SiC and Si₃N₄ Counter Balls, *Silicon*, vol. 15, pp. 3671-3680, 2023.
- [15] A. R. Govande, S. Tailor, B. R. Sunil and R. Dumpala, Effect of inert environment on the sliding wear behaviour of the HVOF sprayed WC-12Co coating, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, vol. 111, p. 106109, 2023.
- [16] R. Mishra, T. K. Mishra and M. Krishna, An experimental study on abrasive wear behaviour of WC-12Co and WC-20Cr₂C₃-7Ni coatings, *Materials Today: Proceedings*, vol. 56, pp. 489-496, 2022.
- [17] N. Vashishtha, R. Khatirkar and S. Sapate, Tribological behaviour of HVOF sprayed WC-12Co, WC-10Co-4Cr and Cr₃C₂-25NiCr coatings, *Tribology international*, vol. 105, pp. 55-68, 2017.
- [18] A. Evans and T. R. Wilshaw, Quasi-static solid particle damage in brittle solids—I. Observations analysis and implications, *Acta Metallurgica*, vol. 24, pp. 939-956, 1976.
- [19] J. Yifu, K. Weicheng, S. Tianyuan, Z. Ruihong and K. Dejun, Effect of load on friction-wear behavior of HVOF-sprayed WC-12Co coatings, *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 26, pp. 3465-3473, 2017.
- [20] Y.-Y. Wang, C.-J. Li and A. Ohmori, Influence of substrate roughness on the bonding mechanisms of high velocity oxy-fuel sprayed coatings, *Thin Solid Films*, vol. 485, pp. 141-147, 2005.
- [21] A. Mazouzi, A. Rezzoug, B. Cheniti, S. E. I. Lebouachera, D. Miroud, A.-R. Boukantar, et al., Impact of wear parameters on NiCr-WC10Co4Cr and WC10Co4Cr HVOF sprayed composite coatings using response surface methodology, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 114, pp. 525-539, 2021.

- [22] R. Kumar, S. Sharma, J. P. Singh, P. Gulati, G. Singh, S. P. Dwivedi, et al., Enhancement in wear-resistance of 30MnCrB5 boron steel-substrate using HVOF thermal sprayed WC-10% Co-4% Cr coatings: a comprehensive research on microstructural, tribological, and morphological analysis, *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 27, pp. 1072-1096, 2023.
- [23] D. Stewart, P. Shipway and D. McCartney, Microstructural evolution in thermally sprayed WC-Co coatings: comparison between nanocomposite and conventional starting powders, *Acta Materialia*, vol. 48, pp. 1593-1604, 2000.
- [24] A. L. McKie, Carbon enriched thermal sprayed hard metal coatings used in PCD sintering: University of the Witwatersrand, Johannesburg (South Africa), 2012.
- [25] P. Chivavibul, M. Watanabe, S. Kuroda and K. Shinoda, Effects of carbide size and Co content on the microstructure and mechanical properties of HVOF-sprayed WC-Co coatings, *Surface and Coatings Technology*, vol. 202, pp. 509-521, 2007.
- [26] U. Selvadurai, P. Hollingsworth, I. Baumann, B. Hussong, W. Tillmann, S. Rausch, et al., Influence of the handling parameters on residual stresses of HVOF-sprayed WC-12Co coatings, *Surface and Coatings Technology*, vol. 268, pp. 30-35, 2015.
- [27] W. Tillmann, L. Hagen, D. Stangier, M. Paulus, M. Tolan, R. Sakrowski, et al., Microstructural characteristics of high-feed milled HVOF sprayed WC-Co coatings, *Surface and Coatings Technology*, vol. 374, pp. 448-459, 2019.
- [28] A. Avci, The Influence of Load and Ball on the Sliding Wear Characteristics of HVOF-Sprayed WC-12Co Composite Coating, *Coatings*, vol. 15, p. 9, 2024.
- [29] Y.-K. Zhou, J.-J. Kang, W. Yue, X.-B. Liu, Z.-Q. Fu, L.-N. Zhu, et al., Sliding wear properties of HVOF sprayed WC-10Co4Cr coatings with conventional structure and bimodal structure under different loads, *Journal of Tribology*, vol. 144, p. 014501, 2022.
- [30] H. Khan, J. S. Gill, A. Bansal and V. Singh, Slurry abrasion and dry sliding behavior of high-velocity oxy-fuel (HVOF) sprayed WC-12Co and WC-10Co-4Cr coatings on EN8 tillage material, *Journal of Thermal Spray Technology*, vol. 33, pp. 1526-1543, 2024.
- [31] J. Pirso, M. Viljus and S. Letunoviš, Friction and dry sliding wear behaviour of cermets, *Wear*, vol. 260, pp. 815-824, 2006.
- [32] W. T. MIPB and F. YE, Influences of the compositions and mechanical properties of HVOF spray ed bimodal WC-Co coating on its high temperature wear performance, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, vol. 69, pp. 158-163, 2017.
- [33] P. Shipway and L. Howell, Microscale abrasion-corrosion behaviour of WC-Co hardmetals and HVOF sprayed coatings, *Wear*, vol. 258, pp. 303-312, 2005.
- [34] D. G. Bhosale, T. R. Prabhu and W. S. Rathod, Sliding and erosion wear behaviour of thermal sprayed WC-Cr3C2-Ni coatings, *Surface and Coatings Technology*, vol. 400, p. 126192, 2020.
- [35] Y.-k. Zhou, J.-j. Kang, W. Yue, Z.-q. Fu, L.-n. Zhu and D.-s. She, Wet Sliding Wear of HVOF-Sprayed WC-10Co4Cr Coatings in Simulated Seawater Drilling Fluid, *Journal of Thermal Spray Technology*, vol. 30, pp. 2174-2186, 2021.
- [36] X. Cheng, Z. Jiang, B. Kosasih, H. Wu, S. Luo and L. Jiang, Influence of Cr-Rich oxide scale on sliding wear mechanism of ferritic stainless steel at high temperature, *Tribology Letters*, vol. 63, p. 28, 2016