

## فرآیندهای نوین در مهندسی مواد

ma.iaumajlesi.ac.ir

تولید و مشخصه‌یابی پوشش کامپوزیتی WC-۱۰Co-۴Cr-xGr اعمال شده به روش پاشش حرارتی

### مقاله پژوهشی

محمد رزازی بروجنی<sup>۱\*</sup> ایات مؤید لفته النداوی<sup>۲</sup>، فرهاد عظیمی<sup>۳</sup> فر

۱- استادیار، گروه مهندسی مواد، واحد لنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران.

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، رشته مهندسی مواد، گروه مهندسی مواد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران، ایران.

۳- استادیار، گروه مهندسی پزشکی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)، اصفهان، ایران.

mohamad.razazi@yahoo.com\*

### چکیده

بهبود مقاومت سطحی قطعات صنعتی در برابر عوامل مخرب همچون سایش و خوردگی، یکی از چالش‌های مهم در مهندسی سطح محسوب می‌شود. یکی از مهم‌ترین روش‌های افزایش مقاومت سطحی، اعمال پوشش WC-۱۰Co-۴Cr می‌باشد؛ اما این پوشش با وجود مقاومت به خوردگی عالی که دارد، رفتار تریبولوژیکی مناسبی نسبت به دیگر پوشش‌های پایه کاربید تنگستن ندارد. به همین منظور در این پژوهش با افزودن گرافیت در دو مقدار ۷ و ۱۴ درصد وزنی به پودر WC-۱۰Co-۴Cr و اعمال پوشش‌ها به روش پاشش حرارتی بر روی زیرلایه فولادی به مقایسه رفتار تریبولوژیکی آن‌ها پرداخته شد. بررسی‌ها به کمک تصاویر SEM، آزمون XRD، زبری سنجی، سختی سنجی انجام گرفت. برای ارزیابی رفتار مقاومت سایشی پوشش‌ها و زیرلایه نیز از آزمون پین بر دیسک استفاده شد. نتایج نشان داد که گرافیت با وجود کاهش نسبی سختی و افزایش زبری پوشش پایه کاربید تنگستن با توجه به خاصیت روانکاری فوق‌العاده‌ای که دارد منجر به ارتقای قابل توجه رفتار تریبولوژیکی زیرلایه و پوشش کاربید تنگستن می‌گردد. در بین پوشش‌ها نیز پوشش دارای ۷ درصد گرافیت بهترین مقاومت سایشی را با توجه به هم‌زمانی سختی مناسب، تخلخل کم و ضریب اصطکاک پایین دارا بود. مکانیزم سایشی پوشش‌ها نیز به کمک تصاویر SEM و آنالیز EDS مورد بررسی قرار گرفت. مشخص شد که مکانیزم غالب دو پوشش حاوی گرافیت ورقه‌ای و پوشش WC-۱۰Co-۴Cr چسبان بود و مهم‌ترین دلیل افزایش خواص تریبولوژیکی پوشش‌ها در حضور گرافیت تشکیل لایه‌ای محافظ از این ذرات تقویتی در مسیر سایشی و اطراف پین بود.

### اطلاعات مقاله

دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۲۹

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۲۳

### کلید واژگان:

سایش

پوشش

تخلخل

لایه محافظ

گرافیت

## Production and Characterization of WC-۱۰Co-۴Cr-xGr Composite Coating Produced by Thermal Spraying Method

Mohammad Razazi Boroujeni<sup>۱\*</sup>, Ayat Muayad Lafta Al Nidawi<sup>۲</sup>, Farhad Azimifar<sup>۳</sup>

۱- Assistant Professor, Department of Materials Engineering, Lenjan Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran - MSc student, Department of

۲- Materials Engineering and Metallurgy, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

۳- Assistant Professor, Department of Biomedical Engineering, Islamic Azad University, Isfahan branch, Isfahan, Iran.

\* mohamad.razazi@yahoo.com

### Article Information

Original Research Paper

Doi:

### Keywords:

Wear

Coating

Porosity

Protective Layer

Graphite

### Abstract

Improving the surface resistance of industrial parts against destructive phenomena such as wear and corrosion is one of the most important challenges in surface engineering. One of the most widely used methods is applying composite coatings such as WC-۱۰Co-۴Cr. But this coating, despite its excellent corrosion resistance, does not have a good tribological behavior compared to other tungsten carbide base coatings. For this purpose, in this research, by adding graphite in two amounts of ۷% and ۱۴% by weight to WC-۱۰Co-۴Cr powder and applying coatings by thermal spraying on the steel substrate, their tribological behavior was compared. Investigations were carried out with the help of SEM, XRD, roughness and hardness measurement. Pin-on-disk test was also used to evaluate the wear resistance behavior of coatings and substrate. The results showed that despite the relative decrease in hardness and increase in the roughness of the tungsten carbide base coating, graphite leads to a significant improvement in the tribological behavior of the substrate and the tungsten carbide coating. Among the coatings, the coating with ۷% graphite had the best wear resistance due to the combination of suitable hardness, low porosity and low friction coefficient. The wear mechanism of the coatings was also investigated with the help of SEM images and EDS analysis. It was found that the dominant mechanism of coatings containing graphite, delamination and WC-۱۰Co-۴Cr coating was adhesive. The most important reason for increasing the tribological properties of coatings in the presence of graphite was the formation of a protective layer of these reinforcing particles in the wear path and around the pin.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

Mohammad Razazi Boroujeni, Ayat Muayad Lafta Al Nidawi, Farhad Azimifar, Production and Characterization of WC-۱۰Co-۴Cr-xGr Composite Coating Produced by Thermal Spraying Method, New Process in Material Engineering, ۲۰۲۴, ۱۸(۱), ۲۵-۳۷.

## ۱- مقدمه

سایش با مکانیزم‌های مختلف توانایی تخریب سطوح قطعات مهندسی در مقادیر و شدت‌های مختلف را هنگام مواجهه دو سطح درگیر دارد. به همین منظور از پوشش‌های سطحی مختلفی با هدف کاهش تخریب ناشی از سایش استفاده می‌شود که پوشش‌های کاربید تنگستن-کبالت از پرکاربردترین مواد پوششی به دلیل دارا بودن خواص تریبولوژیکی برتر جایگاه ویژه‌ای در بین مهندسی دارد.

همه ساله سایش منجر به بروز ضررهای اقتصادی زیادی در صنایع مختلف همچون دریایی، خودرو و کشاورزی می‌گردد. یکی از راه‌حل‌ها برای جلوگیری یا کاهش این پدیده مخرب استفاده از پوشش‌های سطحی همچون کاربید تنگستن کبالت به روش پاشش حرارتی است. تا به حال مطالعات فراوانی روی بهبود خواص سطحی پوشش‌های کاربید تنگستن-کبالت انجام شده است که می‌توان به دو دسته کلی تقسیم‌بندی کرد: دسته اول تحقیقاتی است که بر مبنای پارامترهای فرایندی همچون نرخ اکسیژن مصرفی در پاشش و فاصله زیرلایه تا تفنگ پاشش انجام شده است. دسته دوم مطالعاتی است که روی مواد مصرفی بر مبنای کاربید تنگستن که به صورت پودر و سیم مصرف شده و ترکیب شیمیایی پوشش اعمالی را تشکیل می‌دهند، صورت گرفته است [۱].

مطالعات انجام شده در دسته دوم مشخص کرده است که مقاومت به خوردگی پوشش‌های WC-Co نیاز به بهبود دارند که منجر به معرفی پوشش WC-Co-Cr شده است و رفتار خوردگی بسیار مناسبی از خود نشان داده‌اند اما رفتار تریبولوژیکی تا حدودی دچار افت می‌شود [۲]. از همین رو نیاز به بهبود رفتار تریبولوژیکی پوشش‌های WC-10Co-4Cr امری ضروری به حساب می‌آید چرا که اگر بتوان به پوششی با خاصیت تریبولوژیکی بهتر دست یافت، می‌توان با در نظر داشتن مقاومت به خوردگی عالی این پوشش‌ها به پوششی با کارایی بسیار بالاتر دست یافت. برای این منظور استفاده از

روانکار با خاصیت روانکاری مناسبی که دارد یا مواد با سختی بالاتر در مخلوط پودری WC-10Co-4Cr و سپس پاشش حرارتی می‌تواند چالش جذابی برای مطالعه در حوزه این نوع از پوشش‌های بر پایه کاربید تنگستن باشد که اخیراً روی این موضوع مطالعاتی صورت گرفته است.

از جمله کومار و همکاران<sup>[۳]</sup> در سال ۲۰۲۳ تأثیر افزودن ذرات گرافن را روی پوشش WC-10Co-4Cr تولید شده بر روی زیرلایه فولادی IS-۲۰۶۲ مورد بررسی قرار دادند. ذرات تقویتی به‌عنوان روانکار جامد بین سطوح تماس قرار گرفته و نرخ سایش را کاهش داد. همچنین این تأثیر، موجب کاهش ضریب اصطکاک نیز شده است.

سوماسوندرام و همکاران<sup>[۴]</sup> با افزودن ذرات اکسید گرافن در مخلوط پودرهای WC-10Co-4Cr، نحوه اثرگذاری این ذرات را روی پوشش‌های کامپوزیتی تولیدی روی آلومینیم ۶۰۶۱ بررسی کردند. نتایج این گروه حاکی از بهبود رفتار تریبولوژیکی با توجه به اثر روانکاری مناسب اکسیدهای گرافن مورد کاربرد بود.

در پژوهشی مایتی و همکاران<sup>[۵]</sup> مشاهده کردند با افزودن پودر WC به پوشش‌های WC-9Co-5Cr تخلخل پوشش افزایش یافته و این تخلخل‌ها یا حفرات پوشش به‌عنوان مناطق معیوب عمل کرده و سایش و فرسایش از این نقاط به‌آسانی آغاز شده و در ادامه شدت می‌گیرد.

از آنجایی که تا به حال نحوه استفاده از پودر روانکار گرافیت همراه با پودرهای اولیه این پوشش‌ها مورد مطالعه قرار نگرفته است، در این پژوهش سعی می‌گردد که برای اولین بار این ماده (پودر گرافیت) را در دو مقدار مختلف (۷ و ۱۴ درصد وزنی) به پودر اولیه صنعتی WC-Co-Cr افزوده و نحوه عملکرد سایشی این پوشش‌ها مورد ارزیابی قرار گیرد.

جدول (۱): پارامترهای پوشش دهی.

پارامتر	مقدار اندازه‌گیری شده
سرعت گاز خروجی	1900 m/s
سرعت ذرات پودر	600 m/s الی 700
دمای شعله	حد اکثر 3000 c
نرخ انجماد	10 <sup>-2</sup> -10 <sup>-4</sup> c/s
نرخ تغذیه پودر	75 g/min
فاصله پاشش	250 mm

## ۲- مواد و روش تحقیق

### ۲-۱- زیرلایه

در این پژوهش فولاد زنگ نزن ۳۰۴ با توجه به کاربرد گسترده آن به عنوان زیرلایه انتخاب شد. نمونه‌های ساخته شده از این جنس فولاد دیسکی شکل با قطر ۵۰ میلی‌متر و ضخامت ۱ سانتی‌متر بود. قبل از انجام فرایند پاشش، نمونه‌ها مورد فرایند شن پاشی با استفاده از پودر کاربید سیلیسیم (SiC) قرار گرفته و سطح آنها خشن سازی شد.

### ۲-۲- فرایند پوشش دهی

پودرهای مصرفی برای پاشش از شرکت استنز بیر خریداری شد که شامل WC-10Co-4Cr و گرافیت (۹۹/۹۹ درصد خلوص) بود. پودرها بدون انجام فرایند شستشو و بلافاصله پس از باز شدن ظرف مخصوص حاوی ذرات و پس از توزین استفاده شد. نسبت پودرها به ترتیب (نسبت گرافیت برحسب درصد وزنی می‌باشد) WC-10Co-4Cr، WC-10Co-4Cr+14%/Gr و 4Cr+7%/Gr انتخاب شد. استفاده از روانکار یا به‌طور کلی ماده تقویت کننده اگر از حدی بیشتر باشد، آگلومره شدن، کاهش یا افزایش بیش از حد سختی و حتی یکی از خواص سطحی مانند خوردگی و سایش را خواهد داشت. لذا ارزیابی تغییرات این خواص بر مبنای تغییر غلظت ذرات می‌تواند یک موضوع مهم باشد. معمولاً برای ماده کامپوزیتی تا مقدار ۱۵ الی ۲۰ درصد هم با توجه به میزان اثرگذاری مورد بررسی قرار می‌گیرد. البته مقدار آن بر اساس نوع فرایند پوشش دهی و پارامترهایی همچون میزان مخلوط شدن ذرات، به هم پیوستن ذرات در پوشش و تأثیرات آنها در حین آزمون سایش یا خوردگی انتخاب می‌شود. پس از آماده‌سازی نمونه‌ها از دستگاه پاشش حرارتی HVOF مدل Met-jet شرکت متالیزیشن که دارای سوخت مایع بود برای اعمال پوشش‌ها استفاده شد. پارامترهای پوشش در این پژوهش به شرح زیر انتخاب شد:

## ۲-۳- مشخصه‌یابی پوشش‌ها

برای ارزیابی فازهای موجود در پوشش‌ها از آزمون پراش اشعه ایکس به کمک دستگاه Philips-expert استفاده شد. دستگاه میکروسکوپ الکترونی مدل فیلیپس برای بررسی‌های میکروسکوپی مورفولوژی پودرهای مصرفی، نوع ذرات رسوب یافته و همچنین نحوه کنار هم قرار گرفتن لایه‌ها بکار گرفته شد. تخلخل سنجی نمونه‌ها با کمک تصاویر تهیه شده از سطح مقطع آن‌ها و همچنین نرم‌افزار آنالیز تصویر Image J صورت گرفت. استاندارد مورد استفاده برای اندازه‌گیری تخلخل استاندارد ASTM E2109 بود. زبری سنجی و سختی سنجی به ترتیب با استفاده از دستگاه زبری سنج mititoyo و ریزسختی سنج koopa انجام شد. برای ارزیابی نحوه رفتار تریبولوژیکی پوشش‌ها از آزمون سایش پین بر دیسک مطابق استاندارد ASTM-G99 استفاده شد. مسافت آزمون ۵۰۰ متر بود و هر ۵۰ متر دیسک (نمونه) با ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۰۱ میلی‌گرم وزن می‌شد. در نهایت نیز برای مشخص شدن مکانیزم سایشی از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و آنالیز ترکیب شیمیایی طیف نگار پرتو انرژی (EDS) کمک گرفته شد.

## ۳- نتایج و بحث

### ۳-۱- بررسی پودرهای مصرفی

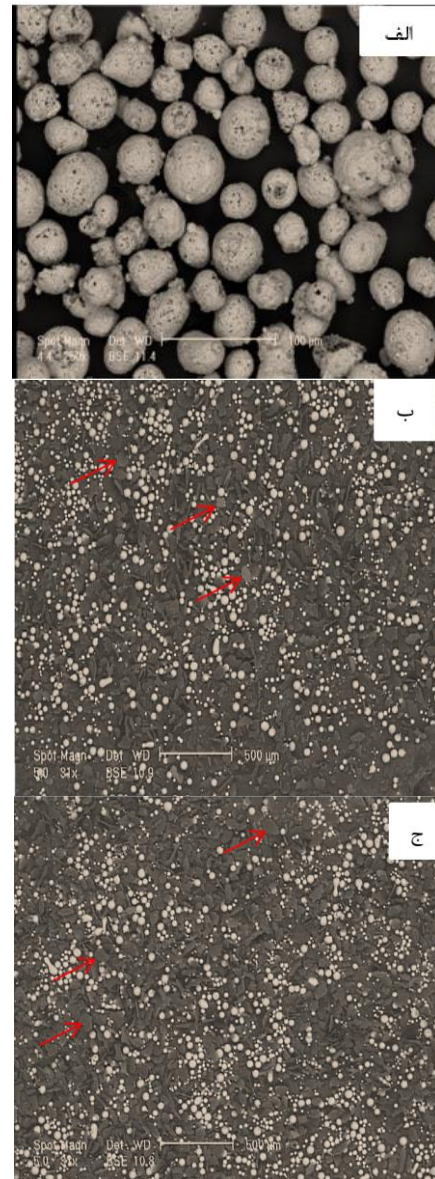
در بررسی تأثیر اندازه ذرات در رابطه با نوع سوخت در سیستم HVOF نشان داده شده است از آنجا که فرآیند HVOF یک روش پاشش حرارتی با سرعت بالاست و زمان سکون پودر در

متخلخل بودن پودرها باعث خواهد شد تا حرارت به قسمت‌های مرکزی پودر نیز برسد و فرایند پاشش با کیفیت بهتری انجام گیرد. تصاویر پودرهای مصرفی کامپوزیتی حاوی گرافیت در مقادیر ۷ درصد و ۱۴ درصد وزنی گرافیت در شکل ۱-ب و ۱-ج نشان داده شده است. موفولوژی گرافیت تقریباً ورقه‌ای می‌باشد که در شکل ۱-ب و ۱-ج با پیکان‌های قرمز رنگ مشخص شده‌اند؛ اما ذرات کروی مربوط به پودر پایه کاربید تنگستنی همچنان کروی است. موضوع دیگر مقادیر زیادی از گرافیت که در تصویر مشاهده می‌شود که مربوط به نسبت وزنی تعیین شده در پژوهش است چرا که گرافیت با توجه به سبک بودن حجم بیشتری از مخلوط پودری را تشکیل خواهد شد.

### ۳-۲- ارزیابی مورفولوژیکی و فازی پوشش‌ها

تصاویر میکروسکوپ الکترونی سطح پوشش‌ها در شکل ۲ ارائه شده است. به طور کلی در حین فرایند پاشش ماده مورد استفاده که در اینجا پودرهای آلیاژ کاربید تنگستن-کبالت-کروم (+گرافیت) می‌باشد، به کمک حرارت بالای اعمالی، ذوب شده، سپس این مواد خمیری شکل یا مذاب با سرعت زیاد بر روی سطح برخورد کرده و نشست انجام می‌شود. این مواد رسوب یافته یا همان اسپلت‌ها به صورت لایه‌ای روی هم قرار می‌گیرند و پوشش اعمالی شکل می‌گیرد. این نواحی در هر سه تصویر موجود در شکل ۲ به پیکان‌های سفید رنگ مشخص شده‌اند. اغلب در فرایند پاشش به خصوص HVOF، پودرها با توجه به سایز میکرونی (یا نانویی) که دارند ممکن است در قسمت‌هایی از نازل قرار گیرند که در تماس کامل با شعله پرسرعت قرار نگیرند یا اینکه پودرها با توجه به دمای شعله، در برخی نقاط دچار تف‌جوشی شوند و تمامی قسمت‌های پودر به حالت خمیری شکل یا ذوب کامل در نیایند. به همین دلیل احتمال دارد نواحی ذوب نشده (پیکان زرد رنگ) یا نیمه ذوب (پیکان‌های قرمز رنگ) روی سطوح پوشش‌ها ایجاد شود.

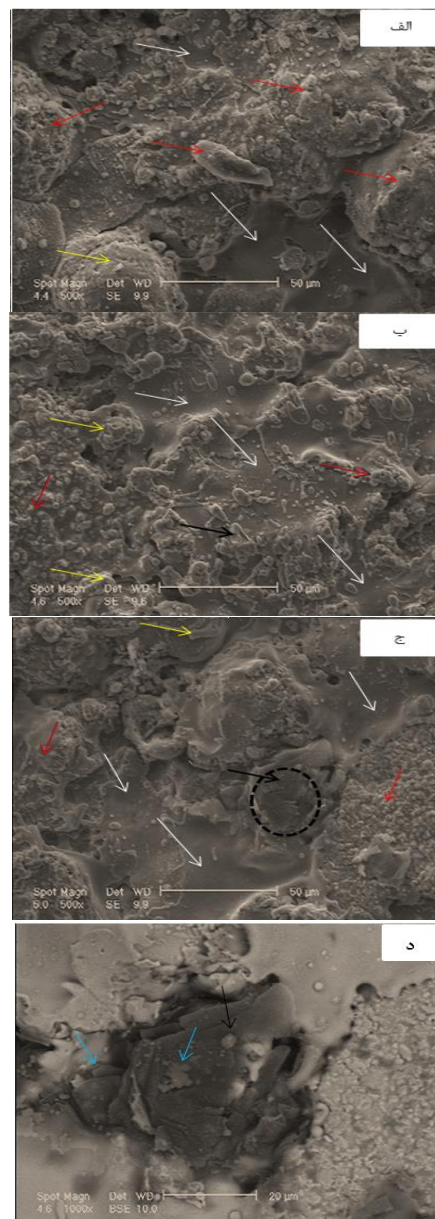
محفظه احتراق آن کوتاه می‌باشد (۲-۱ میلی ثانیه) معمولاً از پودر دارای اندازه ریزتر مثلاً در گستره  $15-45 \mu\text{m}$  استفاده می‌شود [۶-۷]. در مورد پوشش WC-10Co-4Cr همان‌طور که در شکل ۱-الف مشاهده می‌شود ذرات کاملاً کروی می‌باشند و اندازه ذرات آن ۱۳ الی ۴۲ میکرون می‌باشد که نشان می‌دهد برای فرایند HVOF مناسب است.



شکل (۱): تصاویر SEM از پودرهای (الف) WC-10Co-4Cr، (ب) WC-10Co-4Cr+7%Gr و (ج) WC-10Co-4Cr+14%Gr.

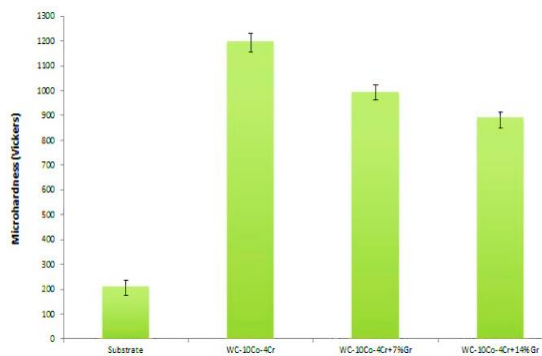
کامل، به‌طور واضح مشخص می‌باشند. لازم به ذکر است حضور گرافیت در میان پودرهای آلیاژی پایه کاربید تنگستنی باعث ایجاد فضاهای خالی بیشتر و مقدار پودر آلیاژی کمتر در مقایسه با پودرهای تغذیه خالص می‌شود. وجود فضاهای خالی بیشتر و همچنین حضور گرافیت با هدایت حرارتی بالا منجر به ذوب بیشتر پودر آلیاژی می‌شود به همین دلیل ذرات ذوب نشده یا نیمه ذوب شده در شکل ۲-الف بیشتر از دو تصویر دیگر شکل ۲ دیده می‌شود.

الگوی پراش اشعه ایکس پوشش‌ها در شکل ۳ نشان داده شده است. برای تمامی پوشش‌ها فازهای کبالت و کروم به طور جداگانه مشاهده نمی‌شود. حذف کبالت به دلیل تأخیر مقادیر بیشتر از این عنصر در حین پوشش‌دهی و همچنین حضور در فاز  $Co_3W_2C$  یا انجماد به صورت غیر کریستالی می‌باشد؛ اما در مورد فاز کروم، با توجه به فعال بودن کروم و اکسیداسیون ترجیحی این فلز به طور حتم اکسیدها یا کمپلکس‌هایی از این فلز شامل اکسید کروم در دما و اکسیژن موجود تشکیل خواهد شد که در الگوها این موضوع دیده می‌شود. همچنین ممکن است در حین پوشش‌دهی این عنصر به کاربید کروم تغییر فاز دهد. از طرفی گرافیت هم که به طور جداگانه در پوشش‌ها وجود دارد که همسو با تصاویر SEM تهیه شده از پوشش‌های گرافیت‌دار (شکل ۲-ب و ج) بود. در واقع گرافیت در دمای فرایند، کمتر به حالت ذوب و نیمه ذوب و یا دچار واکنش با عناصر موجود در ترکیب کاربید تنگستنی شده است. فاز  $W_2C$  که به‌عنوان فاز مخرب شناخته می‌شود هم در الگوی پراش هر سه نمونه دیده می‌شود و مهم‌ترین دلیل آن، دگرپوره شدن ذره‌های کاربید تنگستن (WC) در طول پوشش‌دهی می‌باشد.



شکل (۲): تصاویر میکروسکوپ الکترونی از پوشش‌های (الف) WC-10Co-4Cr (ب) WC-10Co-4Cr+7%Gr (ج) WC-10Co-4Cr+14%Gr (د) WC-10Co-4Cr+14%Gr در بزرگنمایی بالاتر. قسمت نهایی مربوط به گرافیت‌هایی است که اکثراً ذوب نشده‌اند و به صورت ورقه‌ای در تصاویر ۲-ب و ۲-ج دیده می‌شوند (پیکان‌های مشکی رنگ). برای اطمینان از چگونگی قرارگیری ذرات گرافیت در پوشش‌های حاوی گرافیت تصاویر BSE تهیه شد. تصاویر BSE حاصل از نمونه WC-10Co-4Cr+14%Gr در بزرگنمایی بالاتر در شکل ۲-د مشاهده می‌شود که ذرات گرافیت در آن بدون ذوب شدن

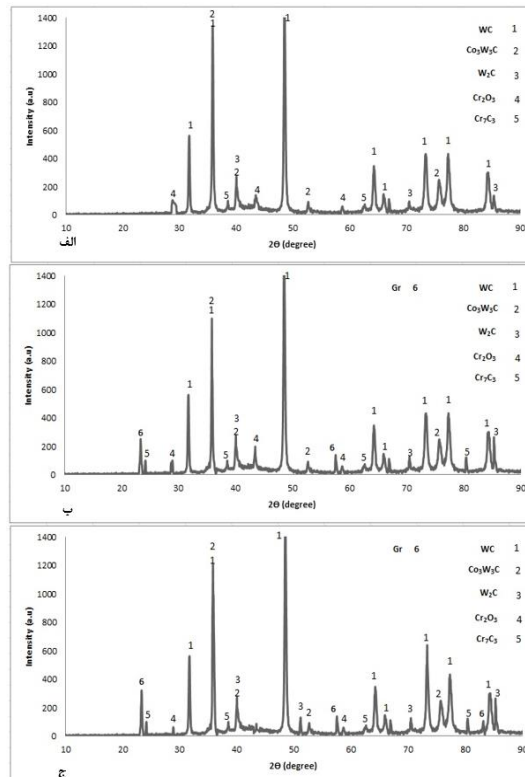
می‌شود. در واقع می‌توان گفت از آنجایی که گرافیت واکنش زیادی با پودرهای کاربید تنگستن در فرایند پاشش نمی‌دهد و بیشتر به صورت تخت و پهن در سطح پوشش قرار گرفته است در هنگام مقابله با نیروی فرورونده سختی‌سنج، مقاومت کمتری دارد که به معنای سختی کمتر خواهد بود.



شکل (۴): نتایج میکروسختی نمونه‌ها.

### ۳-۴- ارزیابی تخلخل پوشش‌ها

نحوه قرارگیری و مقدار حفرات و تخلخل‌های پوشش پاشش حرارتی از اهمیت خاصی برخوردار است؛ زیرا تخلخل زیاد می‌تواند از پیوستگی پوشش در برابر نیروهای سایشی بکاهد. اگر تخلخل و مورفولوژی آن‌ها به نحوی باشد که از گسترش ترک ناشی از خستگی سطحی در اثر نیروهای سایشی جلوگیری کند، می‌تواند پارامتری مؤثر قلمداد گردد؛ اما به‌طور کلی نمی‌توان تخلخل را به‌تنهایی برای بهبود سایش در نظر گرفت چرا که عواملی همچون سختی و خواص اصطکاکی نیز بسیار حائز اهمیت می‌باشد [۹]. برای اندازه‌گیری تخلخل پوشش‌ها از سطح مقطع نمونه‌ها تصاویر SEM تهیه شد و سپس به کمک آنالیز تصویر Image J تخلخل نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. نتایج اندازه‌گیری تخلخل‌های پوشش در شکل ۵ گزارش شده است. تخلخل نمونه دارای ۷ درصد گرافیت از نمونه بدون گرافیت کمتر است که به دلیل ذوب بیشتر و بهتر پودرها در حضور گرافیت با ظرفیت حرارتی بالا می‌باشد. بر همین اساس انتظار می‌رفت مقدار تخلخل با افزایش درصد گرافیت در پودر مصرفی بیشتر

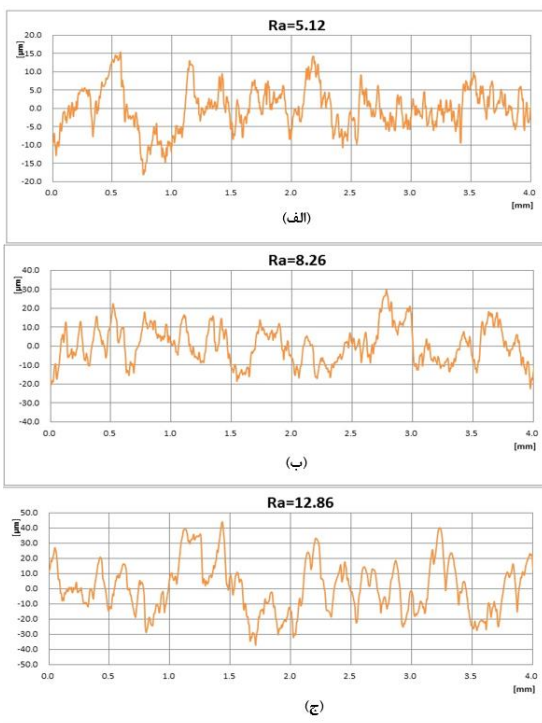


شکل (۳): الگوی پراش مربوط به پوشش‌های: الف) WC-۱۰Co-۴Cr، ب) WC-۱۰Co-۴Cr+۷٪Gr و ج) WC-۱۰Co-۴Cr+۱۴٪Gr.

### ۳-۳- سختی سنجی پوشش‌ها

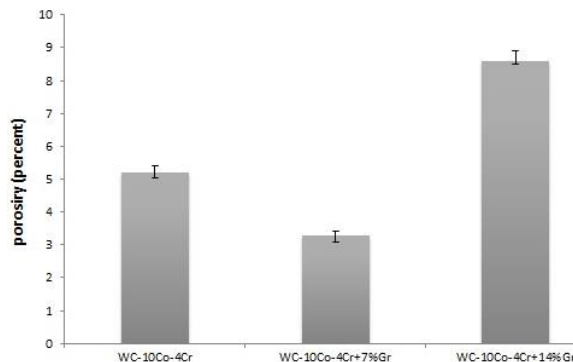
سختی پوشش‌ها و زیرلایه فولادی از ۶ نقطه مختلف سطح هر کدام اندازه‌گیری شد و میانگین آن به‌عنوان سختی نهایی تعیین شد که نتایج به صورت نمودار در شکل ۴ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود اعمال هر سه پوشش باعث افزایش حدود ۴ الی ۶ برابری سختی سطحی فولاد بکار رفته به‌عنوان زیرلایه می‌باشد که بیانگر اثربخشی بالای این پوشش‌ها در کاربردهای نیازمند سختی بالا است. سختی پوشش بر اساس فازهای موجود در آن تغییر می‌کند [۸]. در مورد پوشش‌های پایه کاربید تنگستنی، فاز WC به‌عنوان مهم‌ترین عامل در افزایش سختی شناخته می‌شود. در این جا نیز هر سه پوشش دارای این فاز سخت هستند که در الگوهای پراش (شکل ۳) به‌عنوان فاز اصلی دیده شد. همچنین به‌طور دقیق‌تر می‌توان گفت با اضافه شدن گرافیت سختی کل پوشش کاهش می‌یابد که با توجه به نرمی گرافیت توجیه

ذرات پودرهای مورد استفاده، زبری سطح نهایی افزایش خواهد یافت [۱۰]. در این جا پودرهای حاوی گرافیت اندازه ذرات به مراتب بزرگ‌تری داشتند که باعث افزایش زبری آن‌ها نسبت به پوشش WC-10Co-4Cr بیشتر شده است.



شکل (۶): نمودار زبری سنجی از سطح پوشش‌های: الف) WC-10Co-4Cr، ب) WC-10Co-4Cr+7%Gr و ج) WC-10Co-4Cr+14%Gr.

کاهش یابد؛ اما این اتفاق رخ نداده است. دلیل این روند از آنجا نشأت می‌گیرد که دمای ذوب بالای گرافیت و عدم ذوب گرافیت باعث خرد شدن این ذرات در اثر برخورد با سطح زیرلایه و لایه‌های بعدی پوشش می‌شود و قرار گرفتن این ذرات خرد شده در میان اسپلت‌ها منجر به افزایش تخلخل می‌شود. یکی از دلایل مهم تخلخل در پوشش‌های پاشش حرارتی حضور ذرات با مورفولوژی غیر اسپلت می‌باشد که با قرارگیری در ساختار از فشرده شدن پوشش جلوگیری می‌کند و تخلخل ایجاد می‌کند. دقیقاً به همین دلیل است که در پودرهای مصرفی در فرایند پاشش حرارتی مورفولوژی و سایز آنها از اهمیت زیادی برخوردار است.



شکل (۵): نتایج تخلخل سنجی نمونه‌ها.

### ۳-۵- زبری سنجی پوشش‌ها

نتایج زبری سنجی در شکل ۶ به صورت پروفایل سطحی ارائه شده است. در این تحقیق زبری سطح زیرلایه‌ها قبل از پوشش دهی یکسان بود. از طرفی مهم‌ترین پارامتر اثرگذار در زبری، مورفولوژی و نحوه نشست ذرات ذوب و نیمه ذوب شده است. از آنجایی که گرافیت کمتر ذوب می‌شود و بیشتر به حالت تکه‌های خرد شده و لبه‌دار در سطح رسوب یافته است، با افزایش مقدار گرافیت، زبری سطح پوشش‌ها بیشتر شده است. در شکل ۲-د (تصویری از گرافیت موجود در شکل ۲-ج با بزرگنمایی بالاتر در حالت BSE) این تکه‌های خرد شده و لبه‌دار گرافیت با پیکان‌های آبی رنگ مشخص شده‌اند. نکته دیگر در مورد اندازه ذرات است چرا که با بیشتر شدن اندازه

### ۳-۶- بررسی ضرایب اصطکاک

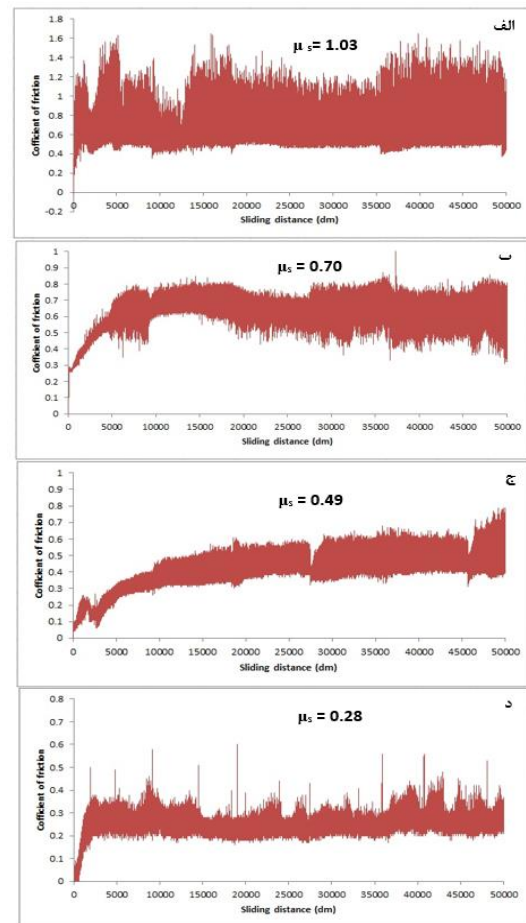
تغییرات ضریب اصطکاک سطح پوشش‌ها در شکل ۷ نشان داده شده است. در هر شکل مقادیر متوسط به دست آمده برای هر نمونه نیز نوشته شده است. ترکیب شیمیایی و فازی سطوح در آزمون سایش تأثیر بسزایی دارد. تفاوت اصلی هر سه پوشش وجود گرافیت می‌باشد که کاملاً در نمودارها دیده می‌شود. در واقع در هنگام آزمون سایش گرافیت نیروی لازم برای پیشروی پین سایشی را کاهش می‌دهد و این به معنای کاهش ضریب اصطکاک خواهد بود. حال در پوشش دارای مقادیر بیشتر ماده روانکار گرافیت، این کار بهتر صورت می‌گیرد که باعث شده است ضریب اصطکاک پوشش دارای

تماس دو جسم سخت کمتر شود و یا به عبارت بهتر درگیری کمتری رخ دهد به همین دلیل است که گرافیت به‌عنوان یکی از بهترین روانکارهای جامد شناخته می‌شود. در مورد پوشش بدون گرافیت هم وجود کاربید و فاز کاربیدی این نقش یعنی کاهش نیروی تماسی لازم برای جلو رفتن بین سایشی ایفا می‌کنند اما اثرگذاری آن به اندازه فاز گرافیت نبوده است. شاید بتوان گفت تأثیر گرافیت بر ضریب اصطکاک قابل پیش‌بینی باشد و نیازی به اندازه‌گیری آن نباشد، ولی خیلی از مواقع تجمع ذرات تقویت‌کننده باعث تغییر خواص مهمی همچون سختی و ضریب اصطکاک می‌شود از طرفی برای بیان دلایل کاهش یا افزایش مقاومت به سایش ارزیابی رفتار تریبولوژیکی و اصطکاکی امری ضروری به حساب می‌آید چراکه روانکار ذاتاً با کاهش ضریب اصطکاک است که باعث افزایش مقاومت به سایش می‌گردد.

### ۳-۷- بررسی مقاومت سایشی

پس از انجام آزمون سایش و اندازه‌گیری‌های مربوطه، نمودار کاهش وزن زیرلایه و پوشش رسم شد (شکل ۸). همان‌طور که مشخص است کمترین مقاومت به سایش مربوط به زیرلایه می‌باشد و با اعمال پوشش‌ها میزان کاهش وزن زیرلایه به میزان قابل توجهی کمتر شده است. به‌طور کلی عوامل مختلفی بر روی مقاومت سایشی اثرگذارند که مهم‌ترین آن‌ها عبارت‌اند از سختی، ضریب اصطکاک، تخلخل و چسبندگی. مهم‌ترین عامل افزایش مقاومت سطحی فولاد پس از پوشش‌دهی دو پارامتر سختی و ضریب اصطکاک می‌باشد که توانسته‌اند در کنار هم این ویژگی مهم زیرلایه را ارتقا دهند. چسبندگی تمامی پوشش‌ها با توجه به نوع پیوندی که با زیرلایه دارند، تقریباً یکسان خواهد بود چرا که در فرایند پاشش هیچ‌گونه امتزاجی بین ماده پوشش و زیرلایه رخ نمی‌دهد و صرفاً پودرهای ذوب، نیمه ذوب یا ذوب نشده به صورت مکانیکی در نقاط مختلف با زیرلایه اتصال خواهند داشت. در بین پوشش‌ها، پوشش حاصل از پودر ۷ درصد

۱۴ درصد وزنی گرافیت از هر دو پوشش دیگر کمتر شود. همچنین هر سه نمونه ضریب اصطکاک به مراتب کمتری نسبت به زیرلایه فولادی داشته‌اند که به دلیل وجود فاز WC به‌عنوان فاز اصلی در پوشش‌ها نسبت به زیرلایه بوده است.

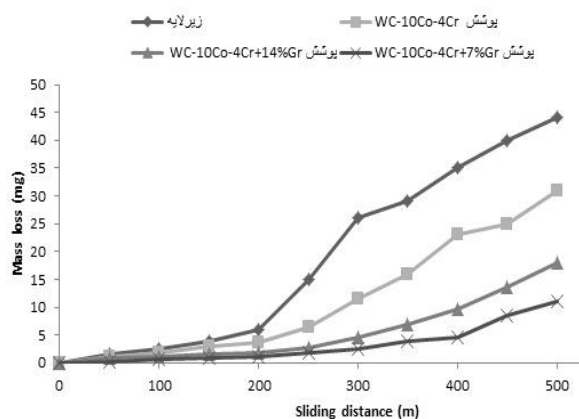


شکل (۷): تغییرات ضریب اصطکاک در حین آزمون سایش برای نمونه‌های الف) زیرلایه، ب) پوشش WC-۱۰Co-۴Cr، ج) پوشش WC-۱۰Co-۴Cr+۷٪Gr و د) پوشش WC-۱۰Co-۴Cr+۱۴٪Gr.

در واقع می‌توان گفت برای هر دو پوشش دارای گرافیت، اتفاقی که در حین سایش رخ می‌دهد این است که ذرات گرافیت به‌خوبی می‌توانند در مسیر بین ساینده قرار گیرند و لغزش بین را تسریع ببخشند و بنابراین نیروی وارده برای جلو رفتن کاهش یابد که ضریب اصطکاک کمتری را نتیجه می‌دهد. از طرف دیگر چسبیدن ذرات گرافیت به بین با توجه به نیروی بین سایشی، باعث خواهد شد تا در ادامه مسیر سطح



پوشش حاوی گرافیت توانسته‌اند رفتار سایشی بهتری داشته باشند. در عین حال با توجه به روانکاری بهتر و مکانیزم روانکاری گرافیت، از آنجایی که تخلخل و سختی دو عامل مهم دیگر در رفتار سایشی پوشش‌ها محسوب می‌شوند، باوجود افزایش مقدار گرافیت پوشش از ۷ درصد به ۱۴ درصد مقاومت به سایش پوشش افزایش نیافت و فقط در نمونه با ۷ درصد گرافیت همه عوامل با حالت بهینه یا بهتری رسیدند.



شکل (۸): نمودار تغییرات کاهش وزن نمونه‌ها در حین آزمون سایش.

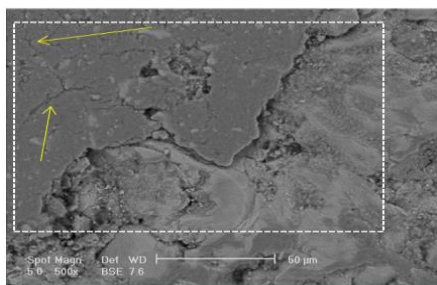
### ۳-۸- بررسی مکانیزم‌های سایشی

برای تحلیل مکانیزم‌های سایشی مخرب پس از انجام آزمون سایش، تصاویر SEM و آنالیز EDS از سطح نمونه‌ها تهیه شد. تصویر میکروسکوپ الکترونی همراه با نتایج آنالیز EDS گرفته شده از زیرلایه در شکل ۹ ارائه شده است. در این تصویر کندگی‌های بسیار شدیدی دیده می‌شود که بیانگر مقاومت به سایش ضعیف زیرلایه می‌باشد. با توجه به پوسته‌پوسته شدن سطح، مکانیزم اصلی، ورقه‌ای می‌باشد. از طرفی تکه‌های بسیار ریز تخریب شده در نقاطی از تصویر (پیکان سفید رنگ) نشان می‌دهد که با توجه به سختی پایین زیرلایه در مقایسه با پین سایشی، هم‌زمان با کنده شدن با توجه به فشار بالا این تکه‌های تخریب شده دوباره ریزتر شده‌اند و می‌توانند به‌عنوان جسم ساینده جدید عمل کنند [۱۲]. نتایج آنالیز EDS از ذرات مشخص شده نشان می‌دهد که مقداری

وزنی گرافیت، بیشترین مقاومت در برابر سایش را از خود ارائه کرده است. این پوشش با وجود دارا بودن سختی کمتر نسبت به پوشش WC-10Co-4Cr و ضریب اصطکاک بیشتر نسبت به پوشش WC-10Co-4Cr+14%/Gr بهترین رفتار سایشی را داشته است. در این جا پارامتر مهم‌تر تخلخل پوشش بوده است که کمترین مقدار را پوشش با مقاومت به سایش برتر (پوشش WC-10Co-4Cr+7%/Gr) داشته است. به بیان بهتر می‌توان گفت این پوشش حالت بهینه‌ای از هر سه پارامتر سختی، تخلخل و ضریب اصطکاک را دارا بوده است. در مورد اثر تخلخل باید گفت هنگامی که پوشش تحت نیروهای سایشی قرار می‌گیرد ترک‌هایی در نقاط معیوب و مستعد تمرکز تنش در زیر سطح و روی سطح ایجاد می‌شود. حال هنگامی که این ترک‌ها به تخلخل‌ها می‌رسند توانایی تکه‌تکه شدن را خواهند داشت و به نوعی تخلخل بالاتر به جدایش ذرات سایشی کمک می‌کند. در نهایت این موضوع منجر به کاهش وزن بیشتر و مقاومت سایشی کمتر نمونه با تخلخل بالاتر شده است.

نکته مهم دیگر که از نمودار کاهش وزن می‌توان دریافت مقاومت سایش بهتر هر دو پوشش حاوی گرافیت است. گرافیت به‌طور ذاتی دارای خاصیت تغییر فرم پلاستیک خوب می‌باشد و علاوه بر آن با اضافه شدن به سطح ویسکوزیته مساحت درگیر با پین سایشی را افزایش خواهد داد [۱۱]. هنگام اعمال نیرو توسط پین سایشی، گرافیت موجود باعث ایجاد لایه‌ای محافظ<sup>۴</sup> روی سطح می‌شود که در مقابله با نیروهای اعمالی دچار تغییر شکل پلاستیک می‌شود و از کنده شدن و کاهش جرم جلوگیری می‌کند. در ادامه با ادامه لغزش و اعمال نیرو، مقداری از این گرافیت‌ها با زمینه اصلی یعنی فاز WC احتمال کنده شدنشان وجود خواهد داشت که در واقع دبری‌های سایشی شناخته می‌شوند؛ اما این دبری‌ها می‌توانند در ادامه مسیر با قرار گرفتن دوباره در اطراف نوک پین و سطح پوشش، با خاصیت روانکاری ذاتی که دارند از کاهش وزن بیشتر جلوگیری کنند و به همین دلیل است که هر دو

در مورد پوشش‌های حاوی گرافیت، هر دوی آن‌ها دارای مکانیزم اصلی ورقه‌ای بر مبنای تغییر شکل پلاستیک، جوانه زنی ترک و اشاعه آن تا کنده شدن سطح بودند. همچنین این پوشش‌ها با توجه به تغییر شکل پلاستیک مناسبی که در اثر حضور گرافیت دارند، توانایی ایجاد یک لایه فشرده محافظ گرافیتی را داشته‌اند. پیکان‌های آبی رنگ در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ این لایه‌های تریبولایه حاوی گرافیت را نشان می‌دهند که روانکاری پوشش را بهبود بخشیده‌اند. این لایه‌ها با پهن شدن در مسیر سایش یا حتی چسبیدن به پین سایشی خاصیت لغزشی و روانکاری پوشش‌ها را در برابر پین سایشی افزایش می‌دهند و سطح را با داشتن حالت کامپوزیتی روانکار در برابر نیروهای وارده تبدیل می‌کنند. نکته دیگر که در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ قابل ذکر است، مشاهده شدن اسپلت‌های بر پایه کاربید تنگستنی است (پیکان‌های قرمز رنگ) که از ویژگی‌های اصلی پوشش‌های پاشش حرارتی می‌باشد. در مورد پوشش‌های حاوی گرافیت می‌توان گفت هر چقدر لایه محافظ روانکاری ایجاد شده، چسبنده‌تر باشد و دیرتر کنده شود مقاومت به سایش را ارتقا می‌دهد که همان‌طور که گفته شد پوشش دارای ۷ درصد گرافیت به دلیل تخلخل کمتر، در این زمینه موفق‌تر عمل کرده است.

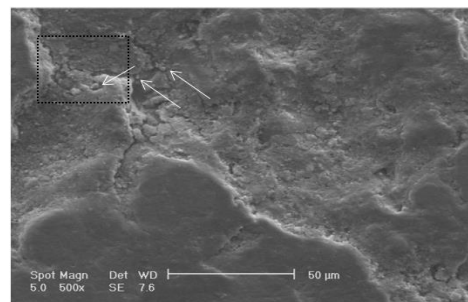


Elt.	Conc	Units	
W	38.96	wt.%	
Co	20.36	wt.%	
Fe	25.76	wt.%	
Cr	6.36	wt.%	
C	8.56	wt.%	
	100.00	wt.%	Total

شکل (۱۰): تصاویر SEM از سطح سایش همراه با نتایج آنالیز EDS مربوط به نمونه WC-۱۰Co-۴Cr.

اکسیژن نیز در سطح دیده می‌شود که به نظر می‌رسد به دلیل اکسیداسیون سطح در اثر برخوردهای شدید و سایش اکسیداسیونی می‌باشد. عنصر آهن نیز می‌تواند مربوط به زیرلایه باشد که در نتایج این آنالیز ظاهر شده است. البته ممکن است حضور آهن مربوط به پین نیز باشد، در واقع امکان ورود آهن از پین به زیرلایه وجود دارد. کروم مشاهده شده نیز با توجه به اکسیداسیون ترجیحی که در فولادها دارد روی سطح تخریب شده نیز به چشم می‌خورد.

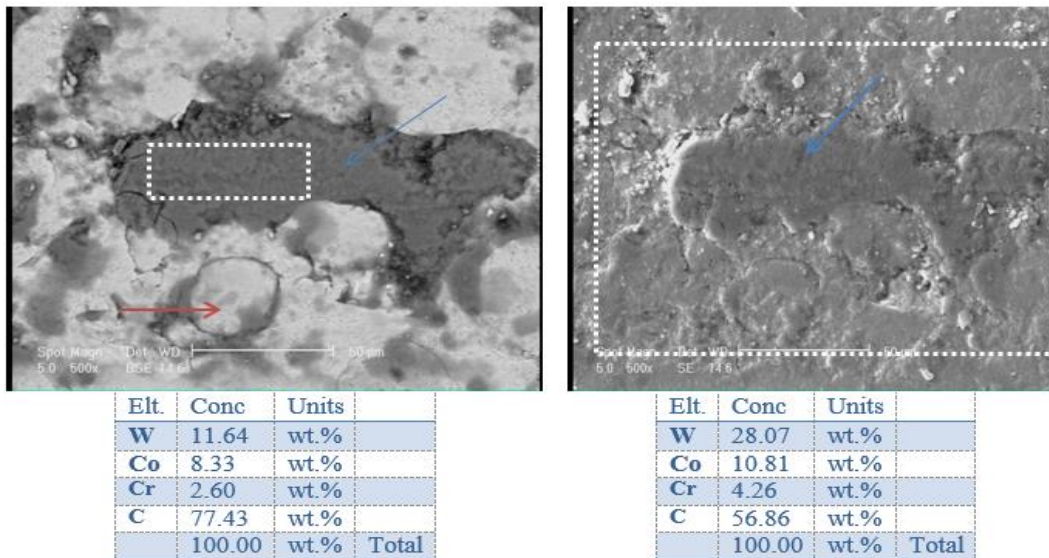
تصاویر SEM در دو حالت BSE و SE به همراه آنالیز ترکیب شیمیایی مربوط به هر کدام از پوشش‌ها در شکل‌های ۱۰ الی ۱۲ نشان داده شده است. برای پوشش WC-۱۰Co-۴Cr با توجه به وجود عنصر آهن در نتایج آنالیز EDS، مکانیزم چسبان در این پوشش، مکانیزم غالب می‌باشد. در واقع در این پوشش با توجه به سختی بالای این پوشش کمتر به حالت ورقه‌ای در آمده است و در هنگام سایش، مقداری از آهن پین سایشی بر روی سطوح قرار گرفته است. از طرفی در تصویر، تعدادی ترک (پیکان زرد رنگ) دیده می‌شود که نشان‌دهنده مکانیزم خستگی سطحی در سایش می‌باشد که با توجه به ترد بودن پوشش‌ها و سختی بالای آن قابل انتظار بود. عناصر دیگر همچون تنگستن، کربن، کروم و کبالت نیز مربوط به جنس پودر مصرفی و نهایتاً پوشش تولیدی می‌باشد.



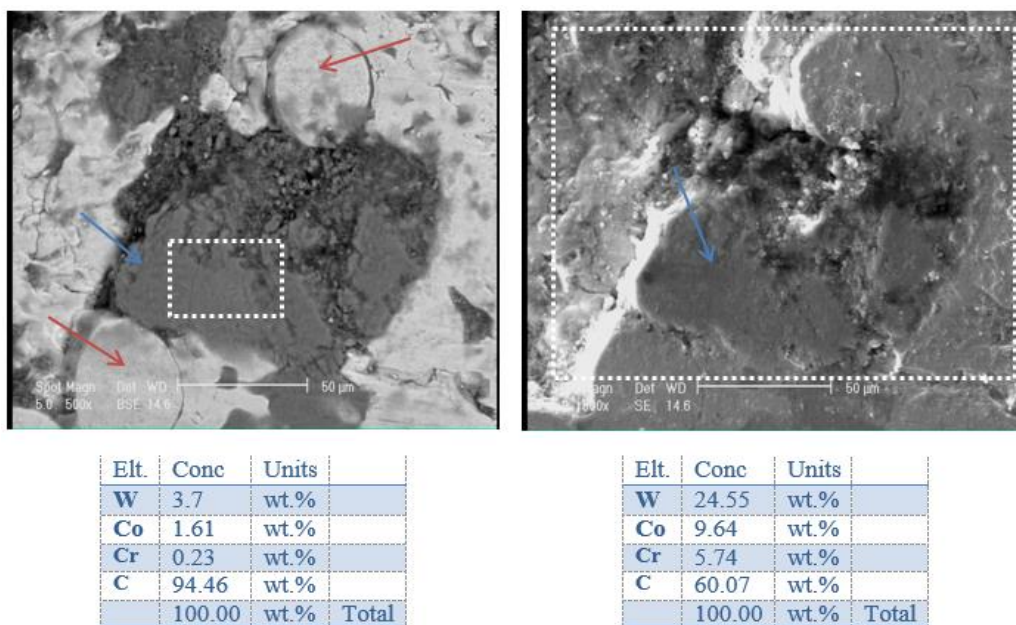
Elt.	Conc	Units	
O	7.31	wt.%	
Fe	82.33	wt.%	
Cr	10.36	wt.%	
	100.00	wt.%	Total

شکل (۹): تصویر SEM به همراه نتایج آنالیز EDS از نواحی مشخص شده مربوط به نمونه زیرلایه.





شکل (۱۱): تصاویر SEM از سطح سایش همراه با نتایج آنالیز EDS مربوط به نمونه WC-10Co-4Cr حاوی ۷ درصد گرافیت.



شکل (۱۲): تصاویر SEM از سطح سایش همراه با نتایج آنالیز EDS مربوط به نمونه WC-10Co-4Cr حاوی ۱۴ درصد گرافیت.

and Engineering, vol. ۱۰, no. ۱۱, pp. ۹۸۹, ۲۰۱۱.

[۳] V. Kumar & R. Verma, "Effect of GNP and laser-surface texturing on HVOF sprayed WC-۱۰Co-۴Cr coatings for high-wear resistance", Tribology International, vol. ۱۷۸, pp. ۱۰۸۰-۱۰۸۵, ۲۰۲۳.

[۴] S. Somasundaram, B. R. Ramesh Babu & R. Raj Jawahar, "Tribological characteristics of n-(GO/WC-۱۰Co-۴Cr) HVOF coatings under biolubricant conditions", Surface Engineering, vol. ۳۷, no. ۱, pp. ۹۱-۱۰۰, ۲۰۲۱.

[۵] A. K. Maiti, N. Mukhopadhyay & R. Raman, "Effect of adding WC powder to the feedstock of WC-Co-Cr based HVOF coating and its impact on erosion and abrasion resistance", Surface and Coatings Technology, vol. ۲۰۱, no. ۱۸, pp. ۷۷۸۱-۷۷۸۸, ۲۰۰۷.

[۶] K. Torkashvand, M. Gupta, S. Björklund, F. Marra, L. Baiamonte & S. Joshi "Influence of nozzle configuration and particle size on characteristics and sliding wear behaviour of HVOF-sprayed WC-CoCr coatings", Surface and Coatings Technology, vol. ۴۲۳, pp. ۱۲۷۵-۱۲۸۵, ۲۰۲۱.

[۷] H. L. De Villiers Lovelock, "Powder/processing/structure relationships in WC-Co thermal spray coatings: a review of the published literature", Journal of thermal spray technology, vol. ۷, pp. ۳۵۷-۳۷۳, ۱۹۹۸.

[۸] K. H. Baik, J. H. Kim & B. G. Seong, "Improvements in hardness and wear resistance of thermally sprayed WC-Co nanocomposite coatings", Materials Science and Engineering: A, vol. ۴۴۹, pp. ۸۴۶-۸۴۹, ۲۰۰۷.

[۹] J. A. Picas, Y. Xiong, M. Punset, L. Ajdelsztajn, A. Forn & J. M. Schoenung, "Microstructure and wear resistance of WC-Co by three consolidation processing techniques", International Journal of Refractory Metals and

#### ۴- نتیجه‌گیری

۱- ذرات گرافیت مورد استفاده در پودرها با توجه به نقطه ذوب بالای خود به صورت لایه‌ای در پوشش قرار گرفت و کمتر در حین فرایند پاشش ذوب شدند.

۲- مورفولوژی سطحی پوشش‌ها شامل اسپلت‌ها، ذرات نیمه ذوب و ذرات ذوب شده بود که این نوع از نشست‌ها در هر سه نوع پوشش مشاهده شد.

۳- ضریب اصطکاک با افزایش مقدار گرافیت کاهش یافت به نحوی که کمترین مقدار ضریب اصطکاک متوسط در بین نمونه‌ها برای پوشش WC-۱۰Co-۴Cr + ۱۴Gr به دست آمد.

۴- پوشش دارای ۷ درصد وزنی گرافیت با توجه به بهینه شدن مقادیر سختی، تخلخل و ضریب اصطکاک نسبت به دو پوشش دیگر بیشترین مقاومت به سایش را داشت.

۵- بررسی سطوح سایشی به کمک تصاویر میکروسکوپ الکترونی نشان داد که وجود لایه گرافیت پهن شده در مسیر سایش باعث افزایش مقاومت به سایش و کاهش ضریب اصطکاک پوشش‌های حاوی گرافیت می‌گردد.

۶- مکانیزم سایش برای پوشش بدون گرافیت از نوع چسبان بود که با افزودن گرافیت به پودر اولیه، نحوه تخریب به مکانیزم ورقه‌ای تغییر یافت.

۷- بیشترین سختی (حدود ۱۲۰۰ ویکرز) مربوط به پوشش WC-۱۰Co-۴Cr به دلیل وجود فاز اصلی WC در ساختار خود بود. این در حالی است که با افزودن گرافیت با توجه به نرمی این ذرات تقویتی افت سختی مشاهده شد.

#### ۵- مراجع

[۱] P. H. Shipway, F. D. McCartney & T. Sudprasert, "Sliding wear behaviour of conventional and nanostructured HVOF sprayed WC-Co coatings", Wear, vol. ۲۵۹, no. ۷-۱۲, pp. ۸۲۰-۸۲۷, ۲۰۰۵.

[۲] L. P. Ward, B. Hinton, D. Gerrard & K. Short, "Corrosion behaviour of modified HVOF sprayed WC based cermet coatings on stainless steel", Journal of Minerals and Materials Characterization

Hard Materials, vol. ۲۷, no. ۲, pp. ۳۴۴-۳۴۹, ۲۰۰۹.

[۱۰] P. Komarov, D. Jech, S. Tkachenko, K. Slámečka, K. Dvořák & L. Čelko, "Wetting Behavior of Wear-Resistant WC-Co-Cr Cermet Coatings Produced by HVOF: The Role of Chemical Composition and Surface Roughness", Journal of Thermal Spray Technology, vol. ۳۰, pp. ۲۸۵-۳۰۳, ۲۰۲۱.

[۱۱] M. Ghorbani, M. Mazaheri & A. Afshar, "Wear and friction characteristics of electrodeposited graphite-bronze composite coatings", Surface and Coatings Technology, vol. ۱۹۰, no. ۱, pp. ۳۲-۳۸, ۲۰۰۵.

[۱۲] M. A. El-Emam, L. Zhou, E. Yasser, L. Bai & W. Shi, "Computational methods of erosion wear in centrifugal pump: A state-of-the-art review", Archives of Computational Methods in Engineering, vol. ۲۹, no. ۶, pp. ۳۷۸۹-۳۸۱۴, ۲۰۲۲.

#### ۶- پی‌نوشت

[۱] Kumar et al

[۲] Somasundaram et al

[۳] Maiti et al

[۴] Protective Layer