

فرآیندهای نوین در مهندسی مواد

ma.iaumajlesi.ac.ir

بررسی تأثیر پارامترهای پوشش‌دهی فرآیند HVOF بر روی کیفیت و خواص سایشی پوشش کاربرد تنگستن ایجاد شده روی فولاد ۴۱۳۰

جواد انصاری^۱، امیرحسین مغنیان^{۲*}، مرتضی ثقفی یزدی^۳

مقاله پژوهشی

۱- کارشناسی ارشد مهندسی مواد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

۲- استادیار گروه مهندسی مواد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

۳- استادیار گروه مهندسی مواد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

* moghanian@eng.ikiu.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۲۵	در این مطالعه، ریزساختار پوشش‌های کاربرد تنگستن ایجاد شده به روش فرآیند سوخت اکسیژنی با سرعت بالا (HVOF) بر روی فولاد ۴۱۳۰ در شدت‌های پاشش متفاوت در محدوده ۶/۵ تا ۷/۲ Bar و مقدار پودر مصرفی ۶۰ تا ۸۰ gr/min مورد بررسی قرار گرفت. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نشان داد که با انتخاب پارامترهای مناسب فرآیند پوشش‌دهی، می‌توان میزان تخلخل‌های ایجاد شده و توزیع یکنواخت‌تر آن‌ها را در کل سطح پوشش، تعیین کرد. نتایج حاصل از پراش پرتو ایکس (XRD)، حضور کاربیدهای WC و W ₆ C _{2.54} در نمونه‌های پوشش داده شده را تأیید کرد. با افزایش مقدار پودر تزریقی از ۶۰ به ۸۰ gr/min به دلیل عدم زمان لازم برای ذوب کامل ذرات کاربرد تنگستن و در نتیجه عدم توزیع یکنواخت ذرات پوشش بر روی زیرلایه، سختی پوشش‌ها به دلیل ایجاد میزان تخلخل‌های بیشتر کاهش پیدا می‌کند. نتایج حاصل از آزمون سایش نشان داد که پوشش‌های اعمالی در تمامی شرایط نسبت به نمونه کنترل، مقاومت به سایش بالاتری از خود نشان می‌دهند. با مشخصه‌یابی و مطالعه‌ی تمامی نتایج، این نکته حاصل می‌گردد که سرعت پاشش در فرآیند HVOF، تأثیر گذارتر از مقدار پودرهای مصرفی است. نتایج نشان داد که مکانیزم سایش پوشش W ₂ ، ترکیبی از مکانیزم سایش دو جسمی و سه جسمی، سایش خستگی و سایش چسبان می‌باشد، این در حالی است که مکانیزم غالب، سایش خراشان دو جسمی است. نهایتاً پوشش ایجاد شده توسط فرآیند HVOF با شدت پاشش ۷/۲ Bar و مقدار پودر مصرفی ۷۲ g/min (W ₂) به عنوان نمونه بهینه در بین تمامی پوشش‌ها، از نظر بهترین مقاومت به سایش معرفی می‌گردد.
کلید واژگان:	
کاربید تنگستن	
پوشش‌دهی	
روش HVOF	
میکروسختی	
سایش	

Investigation of the Effects of HVOF Process Parameters on the Quality and Wear Properties of the Coating Tungsten Carbide on 4130 Steel

Javad Ansari¹, Amir Hossein Moghanian^{2*}, Morteza Saghafi Yazdi³

1- MSc in Material Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

2- Assistant Professor, Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

3- Assistant Professor, Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

* moghanian@eng.ikiu.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

DOR:

20.1001.1.24233226.1401.16.2.2.1

Keywords:

Tungsten Carbide

Coating

HVOF Process

Micro Hardness

Wear

Abstract

Previous studies have shown that thermal spraying methods on steels have extensive applications in various industries to increase high-quality wear-resistance coatings. One of these coatings, which is important in diverse industries and has been studied, is tungsten carbide. One of the methods of coating is the high-velocity oxygen fuel (HVOF) process. Scanning electron microscopy (SEM) was used to examine the microstructure of the coatings and also by examining SEM images from the lateral surface of the coated sample, the thickness and quality of the coating were examined. Additionally, X-ray diffraction (XRD) was used to determine the formed phases before and after the coating process and the results of the presence of WC and W₆C_{2.54} carbides were confirmed. The wear test results showed that coated samples demonstrated higher wear resistance than the sample without coating (control). Meanwhile, the sample with spraying pressure of 7.2 Bar and a feeding powder rate of 72 g/min (W₂) exhibited the best wear resistance among other coatings due to the more uniform distribution of tungsten carbide (WC) and less porosity. As a result, it was obtained that the spraying pressure in the process of HVOF process was more effective than the feeding rate of coating powders and a sample with the spray pressure of 7.2 Bar and powders feeding rate of 72 g/min (W₂) was introduced as the optimal sample among all coatings with the highest abrasion wear resistance.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

Javad Ansari, Amir Hossein Moghanian, Morteza Saghafi Yazdi, Investigation of the Effects of HVOF Process Parameters on the Quality and Wear Properties of the Coating Tungsten Carbide on 4130 Steel, New Process in Material Engineering, 2022, 16(2), 13-26.

۱- مقدمه

در مطالعات صنعتی، سطوح اجسام در صنایع مختلف بسیار حائز اهمیت است. از این رو فرآیند و فن آوری‌های جدید به منظور افزایش کیفیت و طول عمر سطوح قطعات، علاوه بر کاهش هزینه‌های تعمیر، منجر به بهبود و افزایش کارایی و بهره‌وری قطعات می‌گردد [۱]. بهبود خواص تریبولوژی یکی از مهم‌ترین اهداف مهندسی سطح می‌باشد، که به طور ملموسی منجر به افزایش مقاومت ماده در برابر محیط‌های سایشی می‌گردد. فرآیندهای متفاوتی برای افزایش خواص تریبولوژی مواد پیشنهاد گردیده است که یکی از بهترین روش‌ها، پوشش‌دهی با استفاده از فرآیند سوخت اکسیژنی با سرعت بالا^۱ است، که جزء فرآیندهای پوشش‌دهی با کیفیت بالا محسوب می‌شود. یکی از ویژگی‌های پوشش‌های ایجاد شده توسط فرآیند HVOF، وابستگی پوشش‌های حاصل از آن نسبت به پارامترهای فرآیند، نظیر شدت پوشش و مقدار پودر مصرفی می‌باشد که تأثیر به‌سزایی بر روی خواص فیزیکی، مکانیکی و تریبولوژی نهایی دارد [۱]. با توجه به تحقیقات پیشین مشاهده شده است که پوشش‌دهی به روش پوشش‌دهی در سال ۱۹۵۰ در زمینه‌های صنعت هوافضا، پزشکی، پتروشیمی و انواع صنایع مختلف، پیشرفت قابل ملاحظه‌ای کرده است [۲]. از مزایایی که باعث شده روش پوشش HVOF به یک روش بسیار بهینه تبدیل شود، شامل موارد زیر می‌باشد [۳]:

- ۱- اعمال حرارت به صورت یکنواخت به ذرات برای دستیابی به انرژی جنبشی مورد نیاز.
- ۲- زمان برخورد ذرات با زیرلایه به دلیل اینکه سرعت بالای ذرات، کم می‌باشد.
- ۳- سطح اکسید نمی‌شود، چون زمان تماس ذرات با زیرلایه بسیار کوتاه است.
- ۴- سرعت خروج ذره از تفنگ الکترونیکی بسیار بالاست به همین دلیل با هوای محیط جت ترکیب نمی‌شود.
- ۵- دمای حرارت‌دهی ذرات حدود ۳۰۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد.

۶- ذرات کاربید تنگستن به دلیل سرعت بالای ذرات، دی‌کربوره نمی‌شوند.

۷- واکنش‌های دی‌کربوره شدن کاربید تنگستن در شرایط اسپری حرارتی انجام می‌شود.

در پژوهشی که توسط مدرانو و همکاران^۲ [۴] در سال ۲۰۱۸ انجام شد، به بررسی ریزساختار و خواص پوشش‌های WC-Co-Cr پوشش حرارتی شده پرداخته شد، که منجر به ساختار ریزتر، همگن و متراکم‌تر می‌شود. اگر سرعت ذرات پوشش یافته کم یا مقادیر پودر مصرفی زیاد باشد، در نتیجه ذرات فرصت کافی برای ذوب شدن را ندارند و پوشش حاصل از آن ناهمگن بوده و دارای تخلخل زیاد می‌شود. با توجه به گزارشات پیشین که توسط وانگ و همکاران^۳ [۵] در سال ۲۰۲۰ انجام شد، به بررسی مقاومت به سایش پوشش‌هایی بر پایه کاربید تنگستن پرداخته شد. نتایج پژوهش نشان داد که با افزایش مقدار رسوبات بسیار ریز، سرعت سایش پوشش‌هایی بر پایه کاربید تنگستن تقریباً ۶ برابر کاهش یافته، که این امر برای پژوهشگران بسیار قابل توجه بوده است. همچنین در پژوهشی که توسط وانگ و همکاران [۶] انجام گرفت، به بررسی پارامترهای فرآیند پوشش HVOF به منظور دستیابی به پوشش کاربید تنگستن-کبالت بهینه پرداخته شد. نتایج نشان داد که تغییر پارامترهای پوشش، تأثیر کمی بر ترکیب فاز پوشش‌های WC-12Co داشت. این در حالی بود که این تغییرات، تأثیر زیادی بر عملکرد دیگر خصوصیات مانند سختی، تخلخل و مقاومت در برابر شکست پوشش‌ها داشت [۷].

پژوهش‌های پیشین نشان داده است که پوشش‌های کاربید تنگستن به دلیل مقاومت به سایش، از بهترین پوشش‌های صنعتی نیز به شمار می‌آید. در این پژوهش با استفاده از آنالیز و مشخصه‌یابی‌هایی از جمله آزمون پراش پرتو ایکس (XRD)^۴، تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و میکروسختی، پوشش‌دهی سطح فولاد ۴۱۳۰ مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داد که تغییر پارامترهای فرآیندهای HVOF بر روی خواص پوشش نهایی نظیر سختی و مقاومت به سایش، کاملاً متفاوت است. در نتیجه

جدول (۱): ترکیب شیمیایی زیرلایه فولاد ۴۱۳۰ پوشش داده شده

برحسب درصد وزنی

عنصر / فلز پایه	AISI 4130
C	۰/۳
Mn	۰/۶
P (max.)	۰/۰۰۸
S (max.)	۰/۰۰۱
Si	۰/۲۳
Cr	۰/۸
Mo	۰/۲۵

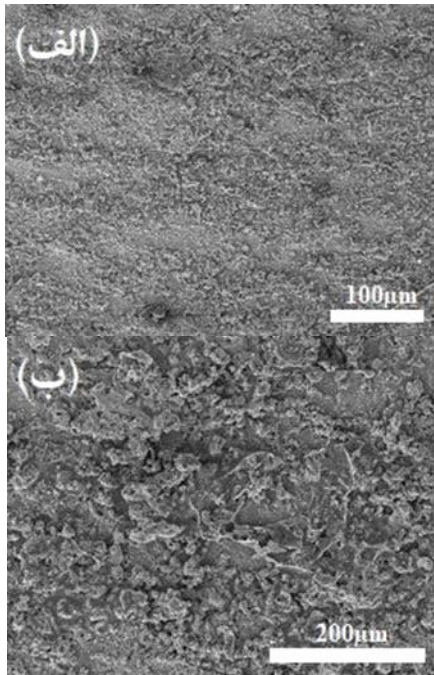
در این تحقیق شدت پاشش در محدوده‌ی ۶/۵ تا ۷/۲ Bar و مقدار پودر کاربرد تنگستن مصرفی از ۶۰ تا ۸۰ gr/min به منظور پیدا کردن مقدار بهینه‌ی فرآیند مورد مطالعه قرار گرفت؛ و نهایتاً با مشخصه‌یابی و آزمون‌های XRD، SEM، آنالیز شیمیایی EDS، میکروسختی سنجی و آزمون سایش، بهینه‌ترین شرایط پوشش‌دهی کاربرد تنگستن بر روی فولاد ۴۱۳۰ معرفی می‌گردد.

۲- مواد اولیه و روش‌های انجام پژوهش

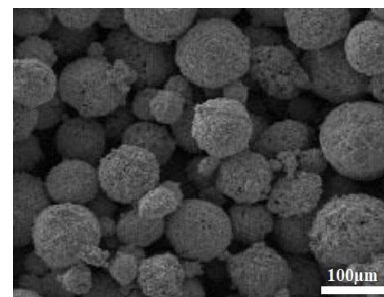
۲-۱-۲- آماده‌سازی نمونه

۲-۱-۱- پودر اولیه

پودر مورد استفاده در فرآیند پوشش‌دهی به روش فرآیند HVOF، پودر کاربرد تنگستن با ترکیب شیمیایی WC و با اندازه ذرات حدوداً $100\mu\text{m}$ انتخاب گردید که در شکل (۱) قابل مشاهده است. همچنین مشاهده می‌شود پودرهای مورد استفاده در این پژوهش برای ایجاد چسبندگی کامل به زیرلایه و نیازمندی به انرژی جنبشی کمتر، به صورت کاملاً کروی شکل هستند.



شکل (۲): ریزساختار میکروسکوپ الکترونی زیرلایه فولاد ۴۱۳۰، (الف) بزرگنمایی ۲۰۰ برابر و (ب) بزرگنمایی ۱۰۰ برابر



شکل (۱): ریزساختار میکروسکوپی پودر کاربرد تنگستن مورد استفاده در فرآیند پوشش‌دهی

۲-۱-۳- آماده‌سازی زیرلایه

فولاد ۴۱۳۰ به منظور پوشش‌دهی در فرآیند پاشش سوخت اکسیژنی با سرعت بالا به شکل استوانه‌ای به قطر ۵۰ و ضخامت ۱۴ میلی‌متر از طریق ماشین کاری تهیه شد [۸]. لازم به ذکر است که این ابعاد به منظور قرارگیری نمونه‌ها در دستگاه پوشش‌دهی انتخاب گردید.

۲-۱-۴- تمیز کردن و چربی‌زدایی

عملیات تمیز کردن و چربی‌زدایی با استفاده از حلال‌های عالی نظیر متیل الکل و استون انجام می‌گیرد. همچنین می‌توان از بخار آب برای چربی‌زدایی و یا گریس‌زدایی^۵ استفاده کرد. در این پژوهش فرآیند تمیز کردن و

۲-۱-۲- زیرلایه

زیرلایه مورد استفاده در فرآیند پوشش‌دهی با کاربرد تنگستن، فولاد ۴۱۳۰ بود که در جدول (۱) ترکیب شیمیایی برحسب درصد وزنی و در شکل (۲)، (الف) و (ب) ریزساختار میکروسکوپ الکترونی آن در دو بزرگنمایی متفاوت، آورده شده است.

۲-۳-۲- مشخصه‌یابی پوشش کاربید تنگستن پوشش داده شده به روش پاشش سوخت اکسیژنی با سرعت بالا

۲-۳-۱- اندازه‌گیری ضخامت

برای اندازه‌گیری ضخامت و همچنین کیفیت سطحی پوشش‌ها از متالوگرافی مقطع عرضی نمونه پوشش داده شده در بزرگنمایی ۱۰۰ و ۱۰۰۰ برابر بهره گرفته شد. پوشش‌دهی انجام شده بر روی نمونه‌های W_1 ، W_2 و W_3 ، از نوع پاشش حرارتی پودر کاربید تنگستن، با فرآیند HVOF توسط ربات صنعتی KUKA ساخت کشور آلمان انجام شد. پس از تهیه نمونه‌های پوشش داده شده، برای انجام آزمون‌های مختلف و گرفتن تصاویر مربوطه، نیاز به برشکاری با ابعاد متفاوتی بود که این کار توسط دستگاه وایرکات صورت پذیرفت.

۲-۳-۲- مشخصه‌یابی فازی پوشش‌ها توسط

XRD

تغییرات فازی در پوشش مورد استفاده بر روی نمونه کنترل (W_0) و نمونه‌ی W_1 و W_2 قبل و بعد از پوشش‌دهی توسط دستگاه XRD مدل pert-pro-MPD ساخت شرکت Panalytical و کشور هلند، مورد مطالعه قرار گرفت. بررسی الگوهای پراش پرتو ایکس تحت استاندارد BS EN13925-1: 2008 انجام شد. پرتو ایکس $K\alpha$ -Cu تحت اختلاف پتانسیل 40KV با طول موج $\lambda = 5406/1 \text{ \AA}$ شدت جریان 30 mA و با سرعت روبش 0/5 درجه بر ثانیه ساطع شد. همچنین با استفاده از نرم‌افزار X' pert مشخصه‌یابی الگوهای به‌دست آمده، انجام گرفت.

۲-۳-۳- بررسی ریزساختار^۱ پوشش‌ها توسط

میکروسکوپ الکترونی روبشی

به‌منظور بررسی ریزساختار پوشش‌های ایجاد شده، از سطوح سایش و براده‌های آن‌ها تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی توسط دستگاه تی اسکن مدل Vega II ساخت کشور چک در مسیر نهایی سایش (3000 متر) تهیه

چربی‌زدایی از طریق شستشوی زیرلایه با آب گرم و سپس غوطه‌وری آن در استون صورت گرفت.

۲-۲- پوشش‌دهی نمونه‌ها به روش پاشش سوخت اکسیژنی با سرعت بالا

به‌منظور بررسی تأثیر پارامترهای شدت پاشش و مقدار پودر مصرفی در فرآیند HVOF، 4 نمونه تحت شرایط مختلف (مطابق با جدول ۲)، تحت فرآیند پوشش‌دهی کاربید تنگستن قرار گرفتند. تفاوت پوشش‌دهی صورت گرفته در این نمونه‌ها در میزان شدت پاشش در محدوده 6/5 تا Bar و 7/2 و همچنین میزان پودر مصرفی در محدوده 60 تا 80 gr/min بود. همچنین، یکی از نمونه‌ها کنترل (W_0) در نظر گرفته شد. تصاویری از پاشش حرارتی پوشش کاربید تنگستن به وسیله‌ی ربات صنعتی در شکل (۳) قابل مشاهده است.



شکل (۳): تصاویری از پاشش حرارتی پوشش کاربید تنگستن به وسیله‌ی ربات صنعتی

همچنین به‌منظور بررسی تأثیر پارامترهای شدت پاشش و مقدار پودر مصرفی در فرآیند HVOF، 4 نمونه تحت شرایط مختلف، توسط پودر کاربید تنگستن، پوشش‌دهی شدند، که در جدول (۲) آورده شده است.

جدول (۲): مشخصات نمونه‌های پوشش داده شده با کاربید تنگستن به

روش پاشش سوخت اکسیژنی با سرعت بالا				
W_3	W_2	W_1	W_0	نمونه
7/2	7/2	6/5	0	شدت پاشش (Bar)
80	72	80	0	مقدار پودر مصرفی (g/min)

شد و سپس توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی براده‌های سایش نیز مورد مشاهده قرار گرفت.

۴-۳-۲- مشخصه‌یابی ترکیب شیمیایی پوشش‌ها توسط طیف‌سنج پراکندگی انرژی^۲
برای بررسی آنالیز کمی و درصد عناصر موجود در پوشش از دستگاه طیف‌سنج پراکندگی انرژی، استفاده شد.

۴-۲- آزمون‌های مکانیکی

۴-۲-۱- آزمون میکروسختی سنجی

این آزمون به منظور بررسی سختی سطح پوشش نمونه‌های فولاد آلیاژی ۴۱۳۰، پوشش‌دهی شده به وسیله‌ی کاربید تنگستن با استفاده از دستگاه بوئلر^۸، مدل ID:510HAR01 و ساخت کشور آمریکا بر اساس استاندارد E 384-17 ASTM به روش ویکرز با استفاده از فرورونده هرم الماسه‌ای و نیروی اعمالی ۱۰ gtf به دست آمد. از هر نمونه ۳ آزمون سختی گرفته شد و میانگین اعداد به دست آمده به عنوان سختی میانگین در نظر گرفته شد.

۴-۲-۲- آزمون مقاومت به سایش

۴-۲-۱- آماده‌سازی نمونه‌ها

مطالعات پیشین نشان داد که به دلایل زیر بهتر است نمونه‌ها به عنوان پین انتخاب شوند. اول اینکه پین دچار سایش عمیق‌تری از دیسک می‌شود چون تمام سطح آن دائماً در طول آزمایش در حال تماس و سایش است و این عامل زمان آزمایش را کاهش می‌دهد. دوم اینکه وزن آن کم است و همین امر باعث افزایش دقت در اندازه‌گیری میزان کاهش وزن می‌شود. برای تهیه پین‌ها، از وایرکات به منظور ساختن نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۵ میلی‌متر و ارتفاع ۸ میلی‌متر استفاده شد.

۴-۲-۲- آزمون پین روی دیسک

رفتار سایشی پوشش کاربید تنگستن بر روی فولاد آلیاژی ۴۱۳۰ نیز در حین فرآیند سایش از طریق میزان کاهش وزن نمونه‌ها، مطالعه گردید. این آزمون توسط دستگاه آزمون

سایش شرکت آریانا مدرن صنعت، ساخت کشور ایران انجام شد. از یک پین فولادی با قطر ۵ میلی‌متر و دیسکی با سختی ۲۰۶۰ ویکرز در این آزمون استفاده شد. انجام آزمایش سایش به روش پین بر دیسک^۹، مطابق با استاندارد ASTM G99-95a به وسیله دستگاه نشان داده شده در شکل (۴) و همچنین با استفاده از مطالعات میکروسکوپی سطوح و آنالیز شیمیایی EDS انجام شد. برای تعیین کردن وزن پین‌ها نیز همان‌طور که در قسمت تجهیزات توضیح داده شد، از ترازوی دیجیتالی مدل AND با دقت ۰/۰۰۰۱ گرم استفاده شد. بعد از طی شدن مسیرهای مشخص سایش از ۶۰۰ تا ۳۰۰۰ متر، بدون آنکه تماسی با سطوح ساییده شده رخ دهد، وزن پین‌ها دوباره اندازه‌گیری شد و میزان کاهش وزن آن‌ها به دست آمد. سپس منحنی‌های کاهش وزن هر نمونه بر حسب مسافت سایش رسم شد. برای بررسی مکانیزم‌های غالب سایش نیز به بررسی تصاویر میکروسکوپ الکترونی سطح‌های سایش و نیز خرده‌های سایش پرداخته شد. نیروی اعمالی برای انجام دادن آزمون سایش ۴/۲۵ کیلوگرم نیرو و مسافت طی شده ۶۰۰، ۱۲۰۰، ۱۸۰۰، ۲۴۰۰ و ۳۰۰۰ متر با سرعت خطی ۱۰ متر بر دقیقه در نظر گرفته شد. همچنین جهت بالا بردن دقت محاسبه وزن نمونه‌ها قبل و بعد از آزمون سایش به دلیل حذف آلودگی‌ها و فرآورده‌های ناشی از سایش، نمونه‌ها در محلول اتانول قرار گرفته و تحت امواج فراصوت، در دستگاه آلتراسونیک آماده‌سازی شد. شکل (۴) شکل شماتیک و دستگاه مورد استفاده در فرآیند پین بر دیسک را نشان می‌دهد.



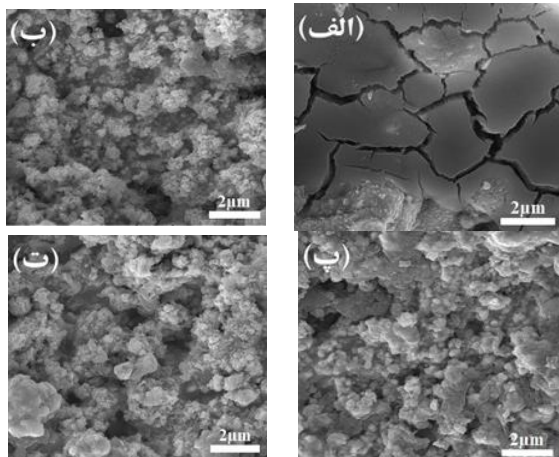
شکل (۴): شکل شماتیک و دستگاه مورد استفاده در فرآیند پین بر روی دیسک

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی سطوح نمونه‌های پوشش داده شده توسط کاربید تنگستن به روش پاشش

HVOF قبل از سایش توسط SEM

سطوح پوشش داده شده توسط کاربید تنگستن قبل از سایش در بزرگنمایی ۱۰۰ و ۱۰۰۰ برابر در نمونه‌های کنترل (W_0)، W_1 ، W_2 و W_3 به ترتیب در شکل (۵) و (۶) به وسیله SEM قابل مشاهده است. نتایج نشان می‌دهد که با انتخاب پارامترهای مناسب فرآیند پوشش دهی، می‌توان میزان تخلخل‌های ایجاد شده و توزیع یکنواخت‌تر آن‌ها را در کل سطح پوشش، تعیین کرد. به‌طور کلی می‌توان گفت که افزایش گازهای حبس شده در لایه پوشش، افزایش ذرات ذوب‌شده یا نیمه ذوب‌شده پوشش و عدم یکنواختی در ایجاد پوشش بر روی زیرلایه از عوامل مؤثر در ایجاد تخلخل در فرآیند پوشش‌دهی به روش پاشش HVOF می‌باشد.

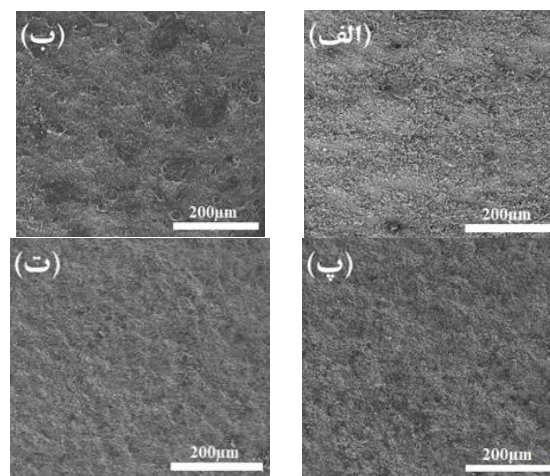


شکل (۶): بررسی سطوح پوشش داده شده توسط کاربید تنگستن به روش پاشش HVOF قبل از سایش در بزرگنمایی ۱۰۰ برابر توسط SEM در نمونه‌های الف) کنترل (W_0)، ب) W_1 ، پ) W_2 و ت) W_3

۳-۲- بررسی ضخامت کاربید تنگستن پوشش

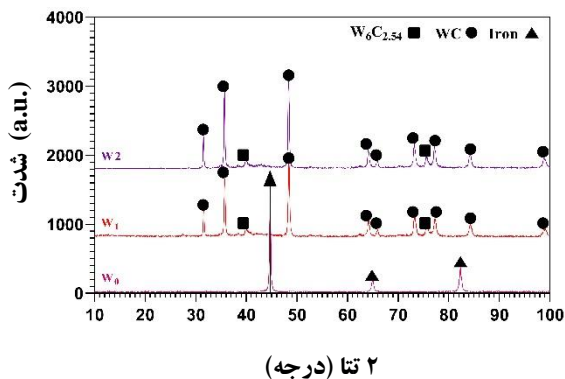
داده شده بر روی زیر لایه فولاد ۴۱۳۰

این بررسی به منظور کنترل و اطمینان از کیفیت پوشش و بررسی ضخامت آن انجام گردید. بدین منظور دو نمونه‌ی W_1 و W_2 به منظور بررسی کاربید تنگستن پوشش داده شده و همچنین کیفیت فصل مشترک پوشش و زیرلایه مورد مطالعه‌ی تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی قرار گرفتند. شکل (۷) ضخامت کاربید تنگستن پوشش داده شده بر روی نمونه‌های W_1 و W_2 را در دو بزرگنمایی متفاوت ۱۰۰ برابر و ۱۰۰۰ برابر، نشان می‌دهد. ضخامت پوشش ایجاد شده بر روی خواص مکانیکی نمونه تأثیر گذار است [۹]. ضمن اینکه نرخ سایش در صورت عدم وجود عیب در پوشش با افزایش ضخامت پوشش کاهش پیدا می‌کند [۱۰]. این در حالی است که هرچه تخلخل زیادتر باشد با افزایش ضخامت پوشش، احتمال افت خواص نیز امکان دارد، در نتیجه در صورت بی‌نقص بودن پوشش با افزایش ضخامت نرخ سایش کاهش پیدا می‌کند [۹-۱۰]. علاوه بر آن میزان تخلخل و همچنین شکل و توزیع آن‌ها بر روی خواص مکانیکی پوشش تأثیر گذار است [۱۱]. همچنین طبق پژوهش‌های پیشین یک پوشش پاشش حرارتی مطلوب، باید دارای مقدار تخلخل کمی باشد [۱۲]. تخلخل موجود در پوشش‌ها، معمولاً در تصاویر میکروسکوپی قابل تشخیص هستند و این عیوب در زیر



شکل (۵): بررسی سطوح پوشش داده شده توسط کاربید تنگستن به روش پاشش HVOF قبل از سایش در بزرگنمایی ۱۰۰ برابر توسط SEM در نمونه‌های الف) کنترل (W_0)، ب) W_1 ، پ) W_2 و ت) W_3

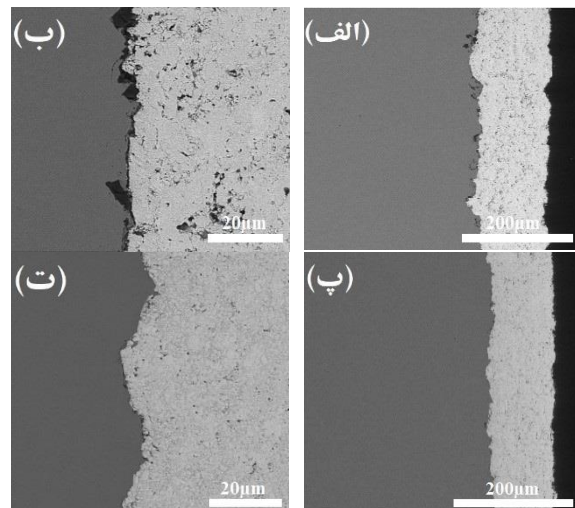
W_2 و W_1 در شکل (۸) برای نمونه کنترل، تنها پیک‌های مشخصه مربوط به آهن مشاهده می‌گردد که تأییدکننده جنس فولاد ۴۱۳۰ برای زیرلایه می‌باشد. با مقایسه دو نمودار نمونه W_1 و W_2 در شکل (۸) مشاهده می‌شود که شدت پیک‌های کاربید تنگستن برای نمونه W_1 به مراتب بیشتر از نمونه W_2 می‌باشد. همان‌طور که در نتایج پیش نیز بحث شد، علت اصلی آن می‌تواند بهینه بودن پارامترهای پوشش‌دهی در نمونه W_2 نسبت به نمونه W_1 باشد، که منجر به پوشش‌دهی بیشتر و همگن‌تر کاربید تنگستن بر روی لایه ۴۱۳۰ شده است.



شکل (۸): الگوی نتایج حاصل از XRD نمونه‌های کنترل (W_0), W_1 و W_2

تشکیل فازهای مختلف وابسته به شرایط سینتیکی و ترمودینامیکی اعمال شده دارد که تشکیل فازهای کاربیدهای تنگستن نیز از این قاعده مستثنی نیستند. در این پژوهش بعد از پوشش‌دهی کاربید تنگستن بر روی فولاد ۴۱۳۰، شناسایی کاربیدهای مختلفی مانند WC و $W_6C_{2.54}$ با استفاده از آزمون XRD انجام شد، همان‌طور که در بالا اشاره شد دلیل تشکیل کاربیدهای مختلف، شرایط سینتیکی و ترمودینامیکی اعمال شده می‌باشد که تحقیقات خامنه و همکاران نیز همین موضوع را اثبات می‌کند [۱۴]. یکی از عوامل تبدیل WC به دیگر کاربیدها از جمله $W_6C_{2.54}$ دگرپوره شدن می‌باشد، هرچند طبق تحقیقات دجون و همکاران، به‌طور کلی در روش پاشش HVOF، پایین بودن دمای شعله و بالا بودن سرعت پاشش موجب کاهش اکسیداسیون و دگرپوراسیون می‌شود، ولی در حالت کلی

میکروسکوپ‌ها به رنگ تیره‌رنگ قابل مشاهده هستند [۱۲]. تخمین میزان تخلخل پوشش‌ها با استفاده از تکنیک‌های آنالیز تصویر انجام می‌گیرد [۱۱]. همان‌طور که می‌دانید نتایج حاصل از آزمون‌های آنالیز تصویر، صد درصد دقیق نیستند و محاسبه تخلخل همراه با مقداری خطا می‌باشد که به دلیل خطاهای انسانی و یا نرم‌افزاری ممکن است به وجود آید. به همین دلیل معمولاً این آزمون در چندین مرتبه انجام می‌شود تا میزان خطا در گزارش داده‌ها تا حد امکان کاهش یابد. در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار Anix MP دو سطح مقطع (ب) و (ت) در شکل ۷ در مقاله مورد بررسی قرار گرفت و مشاهده شد که در قسمت (ب) یعنی نمونه (W_1) میزان تخلخل حدوداً ۴/۱۳ درصد و در قسمت (ت) یعنی نمونه (W_2) میزان تخلخل حدوداً ۰/۷۶ درصد بود و این امر نشان داد که میزان تخلخل کاهش یافته است.



شکل (۷): ضخامت کاربید تنگستن پوشش داده شده بر روی نمونه‌های الف) W_1 با بزرگنمایی ۱۰۰ برابر، ب) W_2 با بزرگنمایی ۱۰۰ برابر، پ) W_1 با بزرگنمایی ۱۰۰۰ برابر و ت) W_2 با بزرگنمایی ۱۰۰۰ برابر

۳-۳- نتایج آزمون XRD

نتایج حاصل از آزمون XRD برای زیرلایه فولاد ۴۱۳۰ قبل و بعد از پوشش‌دهی توسط کاربید تنگستن برای دو نمونه W_1 و W_2 در شکل (۸) آورده شده است. همان‌طور که در شکل (۷) مشاهده شد پس از پوشش‌دهی، فاز کاربید تنگستن در بین پوشش‌ها، بیشترین شدت پیک فازی را دارد و همچنین به دلیل شرایط پوشش‌دهی ترکیب فازی W_6 -

جدول (۳): جدول مقادیر آنالیز شیمیایی سطح ساییده شده نمونه‌های

نمونه	عنصر	سری	درصد وزنی	درصد اتمی
W ₀	اکسیژن	K	۳/۰۳	۹/۸۲
W ₀	آهن	K	۹۶/۰۶	۸۹/۲۸
W ₁	کربن	K	۱۸/۵۹	۳۸/۸۱
W ₁	اکسیژن	K	۳۱/۵۱	۴۹/۳۸
W ₁	آهن	K	۳/۴۰	۱/۵۳
W ₁	تنگستن	L	۳۸/۴۷	۵/۲۵
W ₂	کربن	K	۳۳/۳۱	۵۵/۱۹
W ₂	اکسیژن	K	۳۱/۱۲	۳۸/۷۰
W ₂	آهن	K	۱/۲۲	۰/۴۳
W ₂	تنگستن	L	۲۷/۶۶	۲/۹۹
W ₃	کربن	K	۲۱/۴۱	۴۳/۴۵
W ₃	اکسیژن	K	۳۵/۲۷	۴۹/۴۵
W ₃	آهن	K	۲/۶۳	۰/۹۵
W ₃	تنگستن	L	۸۲/۵۲	۳/۴۸

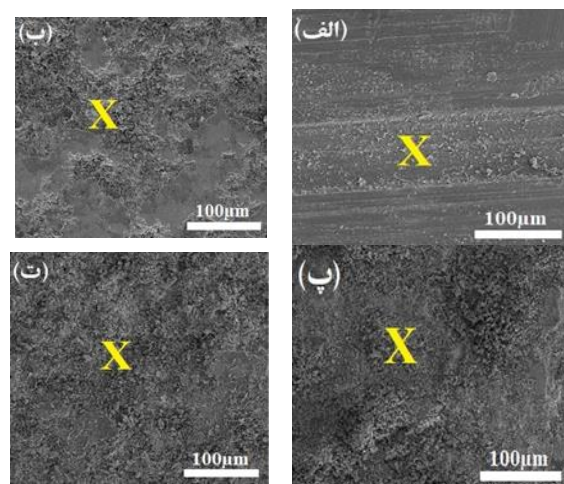
۳-۵- آنالیز شیمیایی EDS براده‌های سایش به همراه SEM

در جدول (۴) جدول مقادیر آنالیز شیمیایی EDS و برای براده‌های سایش نمونه‌های کنترل، W₁، W₂ و W₃ آورده شده است. اگر مقدار اکسیژن موجود در سطوح ساییده شده هر نمونه با مقدار اکسیژن موجود در براده‌های سایش هر نمونه مقایسه شود، واضح است که براده‌های سایش بعد از جدا شدن از پوشش نمونه اکسید شده و با توجه به افزایش سطوح (براده‌ها سطوح بیشتری از یک سطح صاف دارند) و دمای نمونه پس از طی مسافت ۳۰۰۰ متری و اکسیژن محیط، اکسیژن بیشتری جذب کرده‌اند و افزایش سختی قابل توجهی نیز پیدا کرده‌اند که به‌عنوان عاملی برای غالب شدن مکانیزم سایش سه جسمی معرفی می‌شوند، که تحقیقات پیشین نیز تأثیر این اکسیدها را ثابت می‌کنند [۱۷ و ۱۸]. از طرفی این براده‌های سایش، درصد کربن بالاتری نسبت به سطح نمونه مشابه خود دارند که نشان از وجود کاربیدهایی سخت همچون W₆C_{2.54} دارد که این نیز به سایش ساییده سه جسمی کمک خواهد کرد.

امکان حذف شدن آن وجود ندارد [۱۵]. لذا وجود این فاز مختلف کاربرد تنگستن در پوشش ناشی از دکربوراسیون WC می‌باشد [۱۶].

۳-۴- بررسی آنالیز شیمیایی EDS سطوح ساییده شده

در شکل (۹) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی مکان انجام آنالیز شیمیایی سطح ساییده شده نمونه‌های کنترل (W₀)، W₁، W₂ و W₃ و در جدول (۳) مقادیر آنالیز شیمیایی EDS آن‌ها برای آورده شده است. نتایج نشان داد که مقدار اکسیژن موجود در نمونه‌های پوشش داده شده بسیار بیشتر از نمونه کنترل می‌باشد که از دلایل آن می‌توان به این نکته اشاره کرد که با توجه به دمای بالای ذرات تنگستن هنگام پاشش و از طرفی اکسیژن موجود در اتمسفر، این ذرات اکسیژن بیشتری را جذب کرده و با خود بر روی سطح فولاد ۴۱۳۰ اولیه نشانده است. از طرفی اگر به روند صعودی درصد کربن توجه شود، این افزایش درصد کربن بیانگر وجود کاربیده‌های تنگستن سختی است و انتظار می‌رود با افزایش درصد کربن، پوشش سخت‌تری حاصل گردد. البته دانستن این نکته ضروری است که در صورت جدا شدن این ذرات از پوشش امکان به‌وجود آوردن مکانیزم سایش ساییده سه جسمی به دلیل سختی زیاد در سطح نمونه‌ها، بالا می‌رود که به این نکته در قسمت بررسی مکانیزم سایش پرداخته خواهد شد.



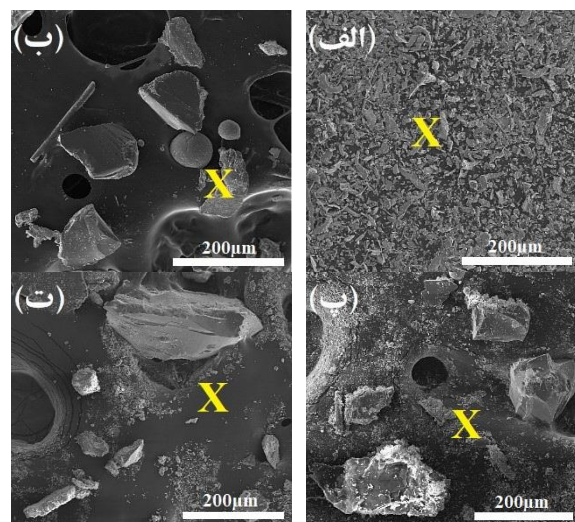
شکل (۹): تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی مکان انجام آنالیز شیمیایی سطح ساییده شده نمونه‌ها (X)، نمونه‌های الف) کنترل (W₀)، ب) W₁، پ) W₂ و ت) W₃

جدول (۴): جدول مقادیر آنالیز شیمیایی براده‌های سایش نمونه‌های

الف) کنترل (W_0)، ب) W_1 (پ) W_2 ، ت) W_3

نمونه	عنصر	سری	درصد وزنی	درصد اتمی
W_0	اکسیژن	K	۳/۰۳	۹/۸۲
W_1	کربن	K	۳۵/۵۰	۵۰/۶۰
W_1	اکسیژن	K	۳۸/۰۵	۴۰/۷۲
W_1	تنگستن	L	۱۲/۸۶	۱/۲۰
W_2	کربن	K	۲۱/۱۵	۳۸/۷۹
W_2	اکسیژن	K	۲۷/۲۰	۳۷/۴۵
W_2	تنگستن	L	۱۰/۳۹	۱/۳۱
W_3	کربن	K	۲۸/۸۰	۴۶/۲۸
W_3	اکسیژن	K	۳۷/۷۸	۳۹/۵۴
W_3	تنگستن	L	۱۴/۴۷	۱/۳۴

در شکل (۱۰)، SEM حاصل از براده‌های سایش پس از طی مسافت سایش ۳۰۰۰ متر بررسی شده است.



شکل (۱۰): بررسی براده‌های سایش پس از طی ۳۰۰۰ متر در بزرگنمایی ۲۰۰ برابر توسط SEM در نمونه‌های کنترل (W_0)، ب) (W_1 ، پ) W_2 ، ت) W_3 و X مکان انجام آنالیز شیمیایی EDS

۶-۳- میکروسختی سنجی

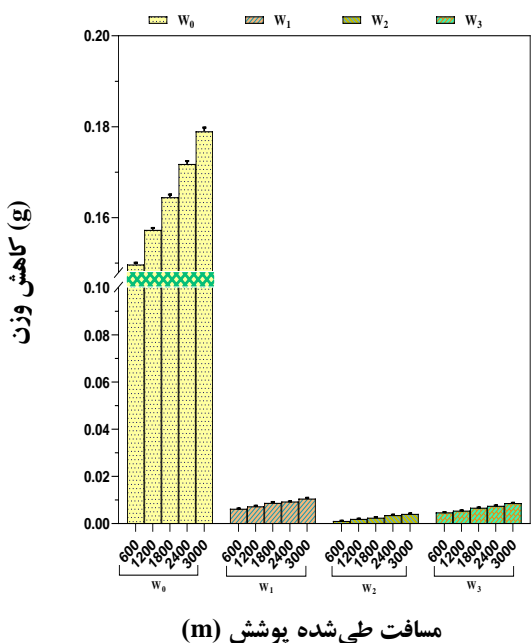
نتایج میانگین آزمون میکروسختی سنجی به روش ویکرز در جدول (۵) آورده شده است. همچنین شکل (۱۱) نمودار ستونی مقادیر سختی تمامی نمونه‌های پوشش داده شده را نشان می‌دهد. سختی سطوح پوشش داده شده همه نمونه‌ها قبل و بعد از فرآیند پوشش‌دهی مورد مطالعه قرار گرفت. افزایش سختی در پوشش‌ها با کاهش تخلخل و به هم پیوستگی لایه‌های پوشش داده شده روی همدیگر رابطه مستقیم دارد. همچنین دستیابی به کمترین مقادیر سختی در

نمونه W_1 مربوط به زیاد بودن مقدار پودر تزریقی و عدم زمان لازم برای ذوب کامل آن و در نتیجه عدم توزیع یکنواخت ذرات کاربید تنگستن بر روی زیرلایه و میزان تخلخل‌های بیشتر اشاره کرد. مقادیر بیشتر تخلخل در پوشش ایجاد شده در نمونه W_1 در مقایسه با نمونه بهینه (W_2) در شکل (۷)، الف و پ آورده شده است. محدوده سختی پوشش‌ها از ۱۹۳۲ ویکرز تا ۲۰۶۰ ویکرز است، که بیشترین سختی مربوط به پوشش نمونه W_2 و کمترین سختی مربوط به پوشش نمونه W_1 می‌باشد. با افزایش شدت پاشش به ۶/۸ Bar با تغییر پارامتر مقدار پاشش از ۶۰ به ۸۰ gr/min نیز مشاهده می‌گردد که میکروسختی از ۲۰۱۰ به ۱۹۵۵ ویکرز کاهش پیدا می‌کند و همچنین با افزایش شدت پاشش به ۷/۲ Bar و تغییر مقدار پاشش از ۶۰ به ۸۰ gr/min مجدداً مشاهده می‌گردد که مقدار میکروسختی پوشش از ۲۰۶۰ به ۱۹۹۵ ویکرز کاهش می‌یابد. در نتیجه به‌طور کلی می‌توان گفت در فشار پاشش ثابت، با افزایش مقدار پودر کاربید تنگستن میزان میکروسختی، برای فشارهای ۶/۵ و ۷/۲ Bar به ترتیب ۳/۵ و ۲/۲۶ درصد کاهش پیدا می‌کند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با نزدیک شدن فشار پاشش به مقدار بهینه ۷/۲ Bar، تأثیر کاهش مقدار سختی با افزایش مقدار پودر کاربید تنگستن تزریقی، کاهش پیدا می‌کند. با توجه به بررسی نتایج، علت اصلی کم بودن سختی پوشش در نمونه‌های W_1 و W_3 را در زیاد بودن مقدار پودر تزریقی (80 gr/min) و عدم زمان لازم برای ذوب کامل آن و در نتیجه عدم توزیع یکنواخت ذرات کاربید تنگستن بر روی زیرلایه و میزان تخلخل‌های بیشتر دانست. این امر در حالی است که تمامی نمونه‌های پوشش داده شده نسبت به نمونه کنترل دارای میکروسختی به‌مراتب بالاتری هستند و بیشترین تفاوت این سختی‌ها در نمونه کنترل (۲۲۵ ویکرز) و نمونه W_2 (۲۰۶۰ ویکرز) به میزان حدوداً ۹/۱۵ برابری محاسبه گردید.

جدول (۶): مقادیر میانگین کاهش وزن نمونه‌های کنترل و پوشش داده شده تحت شرایط متفاوت در مسیرهای ۶۰۰ تا ۳۰۰۰ متر

نمونه	W ₀	W ₁	W ₂	W ₃
مسیر ۶۰۰ متر	۰/۱۴۹۷	۰/۰۰۶۳	۰/۰۰۱۱	۰/۰۰۴۸
مسیر ۱۲۰۰ متر	۰/۱۵۷۳	۰/۰۱۰۶	۰/۰۰۴۱	۰/۰۰۸۹
مسیر ۱۸۰۰ متر	۰/۱۶۴۵	۰/۰۰۹۴	۰/۰۰۳۶	۰/۰۰۷۸
مسیر ۲۴۰۰ متر	۰/۱۷۱۸	۰/۰۰۸۸	۰/۰۰۲۵	۰/۰۰۰۷
مسیر ۳۰۰۰ متر	۰/۱۷۹	۰/۰۰۷۳	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۵۸

همچنین نمودار ستونی مقادیر کاهش وزن نمونه‌های W₁، W₂ و W₃ در شکل (۱۲) از ۶۰۰ تا ۳۰۰۰ متر آورده شده است.



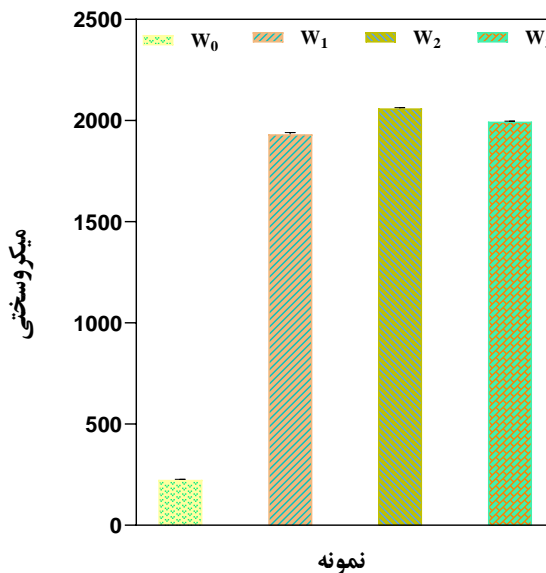
شکل (۱۲): نمودار ستونی مقادیر کاهش وزن نمونه‌های کنترل (W₀)، W₁، W₂ و W₃ در مسیرهای ۶۰۰ تا ۳۰۰۰ متر

۳-۷-۲- بررسی سطوح ساییده شده توسط SEM

در اشکال (۱۳) و (۱۴) سطوح ساییده شده توسط SEM بعد از مسیر ۳۰۰۰ متر برای نمونه کنترل و تمام نمونه‌های پوشش داده شده بررسی شده است.

جدول (۵): مقادیر میانگین آزمون میکروسختی سنجی به روش ویکرز تحت بارگذاری ۱۰ grf توسط فرو رونده هرم الماسه از ۴ نقطه تصادفی در مقطع پوشش

نمونه	W ₀	W ₁	W ₂	W ₃
سختی میانگین	۲۲۵	۱۹۳۲	۲۰۶۰	۱۹۹۵



شکل (۱۱): نمودار ستونی میکروسختی نمونه‌های پوشش داده شده در پارامترهای فرآیند پاشش سوخت HVOF متفاوت

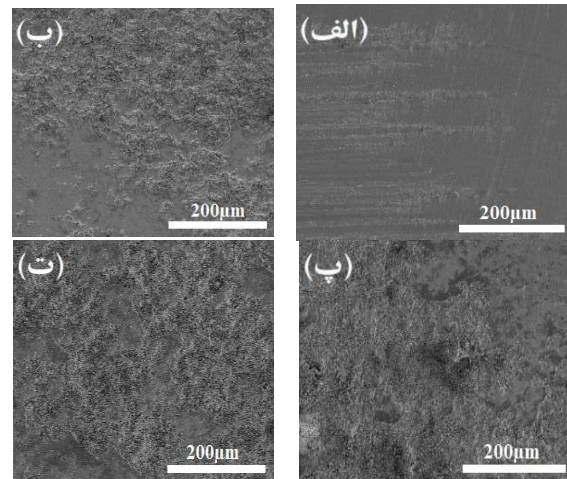
۳-۷-۳- آزمون ساییش

نمونه‌های پوشش داده شده تحت شرایط متفاوت در فرآیند پاشش مورد آزمایش ساییش تا مسیر ۳۰۰۰ متر قرار گرفتند و در ادامه، نتایج آزمایش ساییش از سطوح ساییده شده و براده‌های ساییش به صورت کاهش وزن و تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی ارائه گردید.

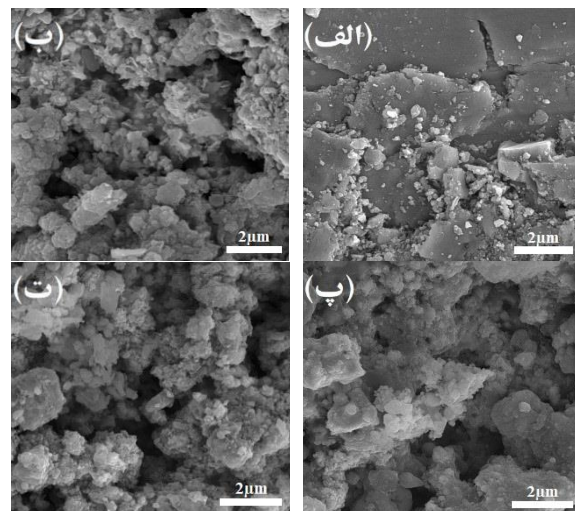
۳-۷-۱- میزان کاهش وزن

جدول (۶) مقادیر متوسط کاهش وزن برای نمونه کنترل (W₀) و نمونه‌های پوشش داده شده W₁، W₂ و W₃ آورده شده است، که تحت شرایط پوشش‌دهی متفاوت را نشان می‌دهد. آزمون ساییش این نمونه‌ها در شرایط یکسان ساییشی مطابق با پارامترهای بیان شده در جدول (۲) انجام گردید و نتایج در مسیرهای متفاوت ساییش از ۶۰۰، ۱۲۰۰، ۱۸۰۰، ۲۴۰۰ و ۳۰۰۰ متر ارائه شد.

اتمسفر محیط، تصاویری با بزرگنمایی‌های مختلف با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی از نمونه‌ها و براده‌های سایش گرفته شد و کاهش وزن نمونه‌ها بررسی شد. برای درک بهتر میزان سایش، نمودار کاهش وزن نمونه‌ها بر اساس مسافت طی شده در آزمون پین بر دیسک رسم شد. همان‌طور که در شکل (۱۲) مشخص است، بعد از نمونه کنترل که پوشش‌دهی نشده است، بیشترین میزان کاهش وزن برای نمونه W_1 با شدت پاشش $7/4$ Bar و مقدار پودر مصرفی 80 gr/min رخ داده و نمونه W_2 با شدت پاشش $7/2$ Bar و مقدار پودر مصرفی 72 gr/min کمترین میزان کاهش وزن را داشته که نوید بهترین مقاومت در برابر سایش را می‌دهد. لازم به ذکر است که حتی در نمونه W_2 که کاهش وزن کم و مقاومت بالایی در برابر سایش را نیز داشته که به صفر رساندن سایش در قطعات صنعتی عملاً غیرممکن است؛ اما نکته حائز اهمیت همین کاهش چشمگیر میزان سایش در این نمونه است. از طرفی با نگاهی دقیق‌تر به نمودار مشخص می‌شود که سرعت پاشش تأثیر بیشتری روی نسبت وزن پودر در افزایش مقاومت به سایش دارد. علاوه بر این‌ها با نگاهی به نمودارهای ستونی کاهش وزن برحسب مسافت طی شده در بخش ۳-۷-۱ و دقت به مقدار احتمال در آن‌ها مشخص می‌شود که نمونه W_2 از نظر مقدار کاهش وزن تفاوت قابل ملاحظه‌ای دارد. همچنین پارامتر دیگری که باید در نظر گرفت میزان سختی نمونه‌ها است، با بررسی شکل (۱۱) متوجه آن می‌شویم که نمونه W_2 از دیگر نمونه‌ها سختی بیشتری دارد که این عامل نیز سبب آن شده که این نمونه کمترین مقدار کاهش وزن را در بین نمونه‌ها داشته باشد، لذا شرایط پوشش‌دهی نمونه‌ها هر چه به مقدار بهینه شدت پاشش $7/2$ Bar و مقدار پودر مصرفی 72 gr/min نزدیک‌تر شود، نمونه‌ها مقاومت به سایش بهتری را خواهند داشت. همچنین با نگاه به مقدار احتمال در شکل (۱۱) می‌توان به آن پی برد که نمونه W_2 حتی نسبت به دیگر نمونه‌ها افزایش سختی قابل ملاحظه‌ای دارد که نهایتاً منجر به افزایش مقاومت در برابر سایش می‌شود [۱۹].



شکل (۱۳): بررسی سطوح ساییده شده توسط SEM پس از مسافت ۳۰۰۰ متر در بزرگنمایی ۱۰۰ برابر نمونه‌های الف) کنترل (W_0)، ب) W_1 ، پ) W_2 و ت) W_3 ، محل انجام آنالیز شیمیایی EDX



شکل (۱۴): بررسی سطوح ساییده شده توسط تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی پس از مسافت ۳۰۰۰ متر در بزرگنمایی ۱۰۰۰ برابر نمونه‌های الف) کنترل (W_0)، ب) W_1 ، پ) W_2 و ت) W_3

۸-۳- بررسی مکانیزم سایش

امروزه یکی از اصلی‌ترین وظایف پژوهشگران، پیدا کردن راه‌حلی برای افزایش طول عمر قطعات می‌باشد که باعث کاهش هزینه‌ها می‌شود. لذا با شناسایی مکانیزم‌های غالب سایش در قطعات، می‌توان راه‌حلی برای کاهش سایش و نهایتاً افزایش طول عمر آن‌ها معرفی کرد. برای بررسی و پیدا کردن شرایط پوشش‌دهی بهینه، مطابق با استاندارد ASTM-G99 آزمایش سایش پین بر دیسک انجام گردید و بعد از طی کردن مسیر ۳۰۰۰ متری در

مؤثر در ایجاد تخلخل در فرآیند پوشش‌دهی به روش پاشش HVOF است.

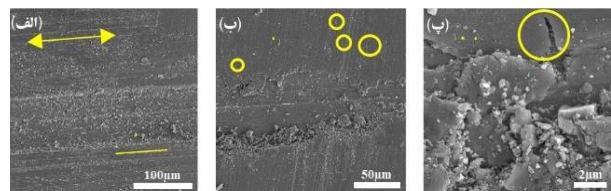
۲- نتایج حاصل از پیک‌های مشخصه در XRD، حضور کاربیدهای WC و $W_6C_{2.54}$ در نمونه‌های پوشش داده شده و پیک آهن برای نمونه کنترل را که تأییدکننده جنس فولاد ۴۱۳۰ برای زیرلایه می‌باشد، تأیید کرد. همچنین، شدت پیک‌های کاربید تنگستن برای نمونه W_1 به مراتب بیشتر از نمونه W_2 بود که علت اصلی آن بهینه بودن پارامترهای پوشش‌دهی در نمونه W_2 نسبت به نمونه W_1 بوده است که منجر به پوشش‌دهی بیشتر و همگن‌تر کاربید تنگستن بر روی لایه ۴۱۳۰ شده است.

۳- با بررسی تمامی مقادیر میکروسختی برای نمونه‌ها مشاهده گردید که بیشترین مقدار میکروسختی برای نمونه W_2 و کمترین مقدار میکروسختی مربوط به نمونه W_1 می‌باشد. به عبارت دیگر پارامترهای فرآیند پوشش‌دهی، تحت شرایط شدت پاشش ۷/۲ Bar و مقدار پودر تزریقی ۷۲gr/min، بهترین شرایط برای دستیابی به بالاترین میکروسختی (نمونه W_1) و همچنین شرایط شدت پاشش ۶/۵ Bar و مقدار پودر مصرفی ۸۰gr/min به‌عنوان ضعیف‌ترین شرایط برای پوشش‌دهی کاربید تنگستن بر روی زیرلایه ۴۱۳۰ معرفی می‌گردد.

۴- با بررسی مقادیر متوسط کاهش وزن ناشی از سایش برای نمونه کنترل (W_0) و نمونه‌های پوشش داده شده W_1 ، W_2 و W_3 مشاهده گردید که تمامی نمونه‌های پوشش داده شده نسبت به نمونه کنترل دارای کاهش وزن به مراتب کمتری بودند و همچنین بیشتر بودن کاهش وزن پوشش در نمونه‌های W_1 و W_3 نسبت به نمونه W_2 را در زیاد بودن مقدار پودر تزریقی ۸۰gr/min نسبت به ۷۰gr/min و عدم زمان لازم برای ذوب کامل آن و در نتیجه عدم توزیع یکنواخت ذرات کاربید تنگستن بر روی زیرلایه و میزان تخلخل‌های بیشتر دانست.

۵- به منظور بررسی مکانیزم سایش، با بررسی تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی می‌توان حفرات ریزی را دید که بیانگر سایش چسبان بود. از طرفی چون دیسک در

در تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی این نمونه ترک‌هایی نیز مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده سایش خستگی می‌باشد، لذا مکانیزم سایش در این نمونه ترکیبی از مکانیزم سایش دو جسمی و سه جسمی، سایش خستگی و سایش چسبان می‌باشد، اما مکانیزم غالب سایش خراشان دو جسمی می‌باشد [۲۰]. در تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی موجود در تحقیقات دانشمندان اخیر نیز وجود این حفرات ریز [۲۱] که نشان از سایش چسبان دارد، مشهود است. برای بررسی بهتر نسبت به مکانیزم‌های سایش، تصاویری از این نمونه انتخاب و نشانه‌های سایش مشخص شده است که در شکل (۱۵) قابل مشاهده است.



شکل (۱۵): تحلیل تصاویر SEM علامت گذاری شده از سطح نمونه W_0 پس از بررسی مکانیزم سایش با بزرگنمایی‌های (الف) ۳۰۰، (ب) ۵۰۰ و (پ) ۱۰۰۰۰ برابر

۴- نتیجه‌گیری

پوشش‌های کاربید تنگستن توسط فرآیند HVOF در شدت پاشش‌های متفاوت در محدوده ۶/۵ تا ۷/۲ Bar و مقدار پودر مصرفی ۶۰ تا ۸۰gr/min بر روی فولاد ۴۱۳۰ با موفقیت پوشش داده شد و تأثیر پارامترهای مذکور روی کیفیت و خواص سایشی پوشش‌های ایجاد شده، مورد بررسی قرار گرفت که نتایج به شرح زیر می‌باشد:

۱- بررسی تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطوح پوشش داده شده توسط کاربید تنگستن، نشان داد که با انتخاب پارامترهای مناسب فرآیند پوشش‌دهی، می‌توان میزان تخلخل‌های ایجاد شده و توزیع یکنواخت‌تر آن‌ها را در کل سطح پوشش، تعیین کرد. به‌طور کلی می‌توان گفت که افزایش گازهای حبس شده در لایه پوشش، افزایش ذرات ذوب شده یا نیمه ذوب شده پوشش و عدم یکنواختی در ایجاد پوشش بر روی زیرلایه، از عوامل

[4] H. Wang & et al. "Sliding wear resistance enhancement by controlling W_2C precipitation in HVOF sprayed WC-based cermet coating," Surface and Coatings Technology, vol. 387, pp. 125533, 2020.

[5] Q. Wang & et al. "The parameters optimization and abrasion wear mechanism of liquid fuel HVOF sprayed bimodal WC-12Co coating", Surface and coatings technology, pp. 2231-2241, 2012.

[7] س. شریف حسن، ض. والفی، س. ح. حسینی و ک. جعفرزاده، "اثر فاصله پاشش و نرخ تغذیه پودر در فرآیند HVOF بر رفتار خوردگی داغ پوشش‌های NiCrAlY"، مجله فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، شماره ۳، صفحه ۳۳-۴۳، پاییز ۱۳۸۹.

[8] ع. ا. قادی، ح. تقفیان و م. سلطانی، "بررسی تأثیر زیرلایه فولادی در تشکیل پوشش‌های کاربردی کروم و وانادیم با روش نفوذ فعال حرارتی"، مجله فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، صفحه ۱۱۹-۱۲۹، شماره ۲ - تابستان ۱۳۹۷.

[9] K. Holmberg & et al, "Tribological contact analysis of a rigid ball sliding on a hard coated surface: Part II: Material deformations, influence of coating thickness and Young's modulus", Surface and Coatings Technology, vol. 200, pp. 3810-3823, 2006.

[10] G. Bolelli, L. Lusvarghi & M. Barletta, "HVOF-sprayed WC-CoCr coatings on Al alloy: effect of the coating thickness on the tribological properties", Wear, vol. 267, pp. 944-953, 2009.

[11] C. J. Li & A. Ohmori, "Relationships between the microstructure and properties of thermally sprayed deposits", Journal of thermal spray technology, vol. 11, pp. 365-374, 2002.

[12] M. Capp & J. Rigsbee, "Laser processing of plasma-sprayed coatings", Materials Science and Engineering, vol. 62, pp. 49-56, 1984.

[13] A. Stewart, P. H. Shipway & D. G. McCartney, "Surface and Coatings Technology", vol. 105, pp. 13-24, 1998.

[14] S. K. Asl, M. H. Sohi, K. Hokamoto & M. Uemura, "Effect of heat treatment on wear behavior of HVOF thermally sprayed WC-Co coatings," Wear vol. 260, pp. 1203-1208, 2006.

[15] K. Dejun & S. Tianyuan, "Wear behaviors of HVOF sprayed WC-12Co coatings by laser remelting under lubricated condition", Optics & Laser Technology, vol. 89, pp. 86-91, 2017.

آزمون پین بر دیسک از جنس فولاد سخت می‌باشد و طبق تئوری مولکولی-دینامیکی این عامل نیز سبب جابجا شدن ماده بر اثر حرکت لغزشی می‌شود، لذا در این نمونه سایش با مکانیزم سایش چسبان آغاز شده است. همچنین چنانچه نسبت سختی ماده سخت به ماده نرم بیش از ۱/۲ برابر باشد (لازم به ذکر می‌باشد سختی دیسک در آزمایش پین روی دیسک برابر با ۲۰۶۰ ویکرز و سختی نمونه کنترل برابر با ۲۲۵ ویکرز می‌باشد) مکانیزم سایش خراشان دو جسمی بر روی سطح نرم تر که در اینجا نمونه پوشش داده شده است، رخ می‌دهد. همچنین از آنجایی تصاویر میکروسکوپ الکترونی بعد از سایش آورده شده است، دمای نمونه بالا رفته و با توجه به اکسیژن موجود در محیط، موجب تسهیل اکسید شدن گردیده است (فرآیند اکسیداسیون به وضوح در آنالیز شیمیایی EDS سطوح ساییده شده و براده‌های سایش به ترتیب در بخش ۳-۴ و ۳-۵ تأیید گردیده است)، بنابراین ذرات و براده‌های حاصل از سایش که حال با اکسید شدن، سختی مضاعفی نیز دارند باعث پیدایش مکانیزم سایش خراشان سه جسمی شده است که یکی از ویژگی‌های آن مشاهده ذرات ریز حتی در بزرگنمایی‌های کم می‌باشد.

۵- منابع

[۱] م. طاهری، م. ح. سهی، م. قدمی، "پاشش حرارتی: ویژگی‌ها و کاربردها"، دانشگاه صنایع و معادن ایران، تهران، ۱۳۸۷.

[2] K. Seiji, "Warm spraying-a novel coating process based on high-velocity impact of solid particles", Sci. Technol. Adv. Mater, 2008.

[۳] م. طهری، "بهینه‌سازی پارامترهای پاشش حرارت HVOF، برای بهبود مقاومت به اکسیداسیون پوشش MCrAlY توسط روش سطح پاسخ"، مجله فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، شماره ۳، صفحه ۷۳-۸۵، پاییز ۱۳۹۶.

[3] K. O. Méndez-Medrano & et al, "Microstructure and Properties Characterization of WC-Co-Cr Thermal Spray Coatings", Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering, pp. 428-497. 2018.

[16] E. Celik, O. Culha, B. Uyulgan, N. A. Azem, I. Ozdemir & A. Turk, "Assessment of microstructural and mechanical properties of HVOF sprayed WC-based cermet coatings for a roller cylinder", *Surface and Coatings Technology*, vol. 200, no. 14-15, pp. 4320-4328, 2006.

[17] M. M. De Oliveira, H. L. Costa, W. M. Silva & J. D. B. De Mello, "Effect of iron oxide debris on the reciprocating sliding wear of tool steels", *Wear*, vol. 426-427, pp. 1065-1075, 2019.

[18] A. C. Bozzi & J. D. B. de Mello, "Wear resistance and wear mechanisms of WC-12%Co thermal sprayed coatings in three-body abrasion", *Wear*, vol. 233-235, pp. 575-587, 1999.

[19] Y. Qiao, Y. Liu & T. E. Fischer, "Sliding and abrasive wear resistance of thermal-sprayed WC-CO coatings", *Journal of Thermal Spray Technology*, vol. 10, no. 1, pp. 118-125, 2001.

[20] N. Axén, S. Jacobson & S. Hogmark, "Influence of hardness of the counterbody in three-body abrasive wear-an overlooked hardness effect", *Tribology International*, vol. 27, pp. 233-241, 1994.

[21] L. Fan, Y. Dong, H. Chen, L. Dong & Y. Yin, "Wear Properties of Plasma Transferred Arc Fe-based Coatings Reinforced by Spherical WC Particles", *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed*, vol. 34, pp. 433-439, 2019.

۶- پی‌نوشت

- [1] High Velocity Oxygen Fuel (HVOF)
- [2] Medrano et al
- [3] Wang et al
- [4] X-ray Diffraction (XRD)
- [5] Degreasing
- [6] Morphology
- [7] Energy Dispersive Spectroscopy (EDS)
- [8] Buehler
- [9] Pin on Disk