

# ارزیابی مشخصه‌های ریزساختاری پوشش کامپوزیتی WC/12%Co - Stellite 6 تولید شده به روش HVOF

مهدی احمدی اشکفتکی، مسعود عطاپور، حسین ادريس

دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت مقاله ۹۳/۱۰/۲۳ - پذیرش مقاله : ۹۶/۰۱/۲۹)

## چکیده

در این تحقیق پوشش‌های کامپوزیتی استلایت ۶ - کاربید تنگستن به روش HVOF بر زیرلایه فولاد ساده کربنی اعمال شد. برای این منظور پودر کامپوزیتی کاربید تنگستن با درصدهای ۰، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد وزنی به پودر استلایت ۶ اضافه گردید. برای ارزیابی پوشش‌ها از میکروسکوپ الکترونی رویشی، پراش اشعه ایکس، میکرو سختی‌سنج و زبری‌سنج استفاده شد. یافته‌های آزمایشی نشان داد که ریزساختار پوشش‌های کامپوزیتی شامل دندریتهای محلول‌جامد کبالت و کروم و فازهای بین دندریتهی شامل فاز غنی از کبالت و کاربید و ذرات کاربید تنگستن بوده است. بر اساس الگوی پراش پرتو ایکس، پوشش‌ها شامل فازهای غنی از کبالت،  $Co_3W_3C$ ،  $CoCx$  بوده و همچنین حاوی فازهای کاربیدی  $Cr_{23}C_6$  و  $Cr_7C_3$  بوده است. نتایج نشان داد که با افزایش درصد فاز تقویت کننده کاربید تنگستن، سختی پوشش‌ها افزایش، چسبندگی پوشش‌ها افزایش و تخلخل پوشش‌ها کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: استلایت ۶، کاربید تنگستن، کامپوزیت، پاشش حرارتی، میکروساختار.

## Evaluation of Microstructure Characteristic of Stellite6 - WC/12% Co Composite Coatings Produced by HVOF Process on Carbon Steel

Mehdi Ahmadi , Masoud Atapour, Hossein Edris

Department of Material Engineering, Isfahan University of Technology

(Received 13 Jan 2015, accepted 18 April 2017)

### Abstract

In this study, high-velocity oxygen-fuel (HVOF) process was applied to produce Stellite-WC composite coatings on the surface of carbon steel samples. For this purpose, various amounts of WC powder 0%, 10%, 20% and 30% were mixed with Stellite6. The structural and mechanical behavior of the coatings were evaluated using X-ray diffractometry, scanning electron microscopy, microhardness and roughness test. The results showed that the micro structure of the coatings were composed of a cobalt and chromium solid solution dendritic structure with the interdendritic phases of cobalt enriched phase, carbides and WC particle. The XRD evaluations indicated that the coatings included Co-rich phase,  $CoCx$ ,  $Co_3W_3C$ ,  $Co_6W_6C$  as well as  $Cr_{23}C_6$  and  $Cr_7C_3$  carbides. Also, It was found that the hardness was increased, the adhesion was improved and the porosity was decreased by increasing the tungsten carbide as reinforcement.

**Keywords:** Stellite6, WC/12% Co, Composite, HVOF process, Microstructure.

**E-mail of Corresponding author:** mehdi.ahmadi2010@gmail.com.

## مقدمه

حدود  $1100^{\circ}\text{C}$  از خود نشان می‌دهد. این آلیاژ به طور وسیعی جهت سخت‌کاری شفت پمپ‌ها، یاتاقان‌ها، سطوح تماس در شیرهای نفت و گاز و صنایع نیروگاهی و شیرهای موتورهای احتراق به کار می‌رود [۲].

امروزه پوشش‌های استلایت مورد استفاده در صنایع تنوع بسیار زیادی پیدا کرده‌اند اما تنها تفاوت مهم در آلیاژهای مقاوم به سایش استلایت در میزان کربن آنهاست و بنابراین کسر حجمی کاربیدها در این مواد متفاوت است. این مقاومت بالا ناشی از حضور کاربیدها و عناصر آلیاژی است که می‌توانند موجب سختی‌سازی زمینه شوند. مثلاً نمونه‌ای از کاربیدهای تشکیل شده در این آلیاژها،  $\text{M}_7\text{C}_3$ ،  $\text{M}_3\text{C}_2$ ،  $\text{M}_2\text{C}_6$  و  $\text{M}_6\text{C}$  هستند که M نماینده فلزات موجود در ترکیب است [۳]. کاربید تشکیل شده با افزایش سختی و مدول الاستیسیته، در مقاومت به سایش آلیاژهای استلایت نقش به‌سزایی دارد [۴].

از آنجایی که درصد حضور عناصر مختلف در ساختار پوشش‌های استلایت از اهمیت زیادی برخوردار است، لذا تحقیقاتی در خصوص اضافه نمودن عناصر آلیاژی به ساختار پوشش انجام گرفته است.

Yao و همکاران، در زمینه افزودن عناصری نظیر Mo و W به آلیاژهای استلایت تحقیقاتی را صورت داده و معتقد بودند که افزودن این ذرات سبب بهبود خواص پوشش می‌گردد [۴].

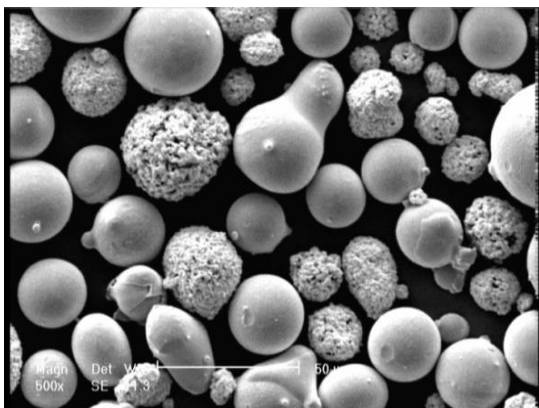
در تحقیقاتی که توسط مددی و همکارانش انجام گرفت، گزارش شد که رفتار مقاومت به سایش پوشش‌های روکش‌کاری<sup>۱</sup> استلایت ۶ - کاربید تنگستن، در اثر اضافه نمودن درصد‌های متفاوت کاربید تنگستن به استلایت ۶ موجب افزایش مقاومت به سایش و سختی این پوشش گردیده است [۵]. با وجود خصوصیات مناسبی که برای پوشش استلایت ۶ ذکر شد، تاکنون مطالعات قابل قبولی در خصوص استفاده از پودر کامپوزیتی کاربید تنگستن به عنوان فاز تقویت‌کننده استلایت ۶ و ایجاد ساختار

فولادهای ساده کربنی مهمترین گروه آلیاژهای مهندسی هستند. این فولادها به علت هزینه نسبتاً کم تولید و داشتن گستره وسیعی از خواص، در بین مواد مهندسی در درجه اول اهمیت قرار دارند. کاربرد این دسته از فولادها نامحدود بوده و می‌توان به کاربرد آنها در ساختمان دستگاه‌های نورد، ساخت غلطک‌ها و شیرهای دروازه‌ای در صنعت نفت و گاز اشاره کرد. از آنجایی که این فولادها به تنهایی قادر به مقابله با سایش و خوردگی نیستند، لذا بایستی از یک پوشش مناسب جهت مقابله با این مشکلات استفاده نمود.

فرآیند HVOF یکی از پرکاربردترین و در عین حال مهمترین فرآیندهای پاشش حرارتی است که به دلایل بهره‌وری اقتصادی و کیفیت پوشش عالی به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد. پوشش‌های ایجاد شده در این روش دارای مقاومت به خوردگی، سایش و استحکام بالایی هستند. پوشش ایجاد شده به روش HVOF در مقایسه با سایر روش‌های پاشش حرارتی دارای دانسیته بالا، سختی و استحکام باند و پیوند قابل توجه‌ای است [۱]. نمونه‌ای از پوشش‌های پرکاربرد که توسط این روش مورد استفاده قرار می‌گیرند، پوشش کامپوزیتی کاربید تنگستن - کبالت است. از آنجایی که کبالت فلزی نرم با قابلیت ترشوندگی بالاست، لذا به عنوان زمینه کامپوزیت، ذرات تقویت‌کننده را به خوبی در خود جای می‌دهد.

پوشش‌های استلایت ۶ به عنوان آلیاژ پایه کبالت، مقاومت به سایش خوبی در محدوده دمایی وسیع دارند و از آنجایی که سختی خود را در حد قابل قبولی تا دمای  $500^{\circ}\text{C}$  حفظ می‌نمایند، به طور وسیعی در صنعت به کار برده می‌شوند. این آلیاژ مقاومت عالی به شوک حرارتی داشته و در برابر انواع مختلف سایش بخصوص هنگامی که همراه با خوردگی باشد از خود مقاومت نشان می‌دهد. آلیاژ استلایت ۶ مقاومت به اکسیداسیون بالایی تا دمای

<sup>1</sup> Cladding



شکل ۱. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از ذرات پودر استالایت ۶ حاوی ۲۰٪ وزنی کامپوزیت تنگستن.

پوشش مورد نظر به روش پاشش HVOF و با استفاده از دستگاه Met jet III، ساخت شرکت Metallezation انگلستان در شرکت پودر افشان اصفهان بر روی زیرلایه‌هایی از جنس فولاد ساده کربنی اعمال گردید. پارامترهای مورد استفاده جهت فرآیند پوشش‌دهی در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳. پارامترهای مورد استفاده در پوشش HVOF.

پارامتر	نرخ تغذیه اکسیژن (mlit/min)	نرخ تغذیه سوخت (mlit/min)	فاصله پاشش (Cm)	نرخ تزریق پودر (gr/min)	فشار اکسیژن (bar)
مقدار	۸۳۰	۳۴۰	۳۵	۴۰	۲۰

سپس خصوصیات پوشش توسط میکروسکوپ نوری، میکروسکوپ الکترونی روبشی و ریزسختی سنج مورد ارزیابی قرار گرفت. در ادامه جزئیات آزمایش‌های انجام شده آورده شده است.

#### سختی

جهت بررسی تاثیر پارامترهای پاشش حرارتی بر سختی پوشش از ریزسختی سنج ویکرز با بار ۳۰۰ gf و زمان ماندن ۱۵ ثانیه استفاده گردید. برای این منظور پوشش‌ها

کامپوزیتی Stellite6 - WC/12%Co به روش HVOF انجام نشده است. در پژوهش حاضر با استفاده از فرآیند HVOF، کامپوزیت استالایت ۶ با ذرات تقویت کننده از جنس کامپوزیت کاربید تنگستن با ایده مشخصه‌یابی و ارزیابی خواص پوشش ایجاد گردید.

#### مواد و روش تحقیق

پودر کامپوزیتی کاربید تنگستن با مقادیر صفر، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد وزنی به پودر استالایت ۶ اضافه شد و جهت پوشش‌دهی به صورت کامپوزیتی ابتدا به مدت یک ساعت در مخلوط‌کن بدون گلوله به خوبی مخلوط گردید. پودر استالایت ۶ با ترکیب شیمیایی مطابق با جدول ۱، تولید شرکت Stellite Deloro با اندازه ذرات ۱۵+۴۵- $\mu\text{m}$  و پودر کامپوزیتی کاربید تنگستن با ترکیب شیمیایی مطابق با جدول ۲، تولید شرکت GTV با اندازه ذرات ۱۵+ $\mu\text{m}$  -۵۳ مورد استفاده قرار گرفت.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی پودر استالایت ۶

Co	Si	W	Fe	Ni	Cr	C	Mn
بقیه	۱/۱	۴/۹	۱/۹	۲/۲	۲۸/۶	۱/۳	۰/۳

جدول ۲. ترکیب شیمیایی پودر کاربید تنگستن.

W	Fe	Co	O	C <sub>t</sub>	C <sub>f</sub>
بقیه	۰/۰۲۶	۱۲	۰/۰۳۳	۰/۴۵	۰/۰۳

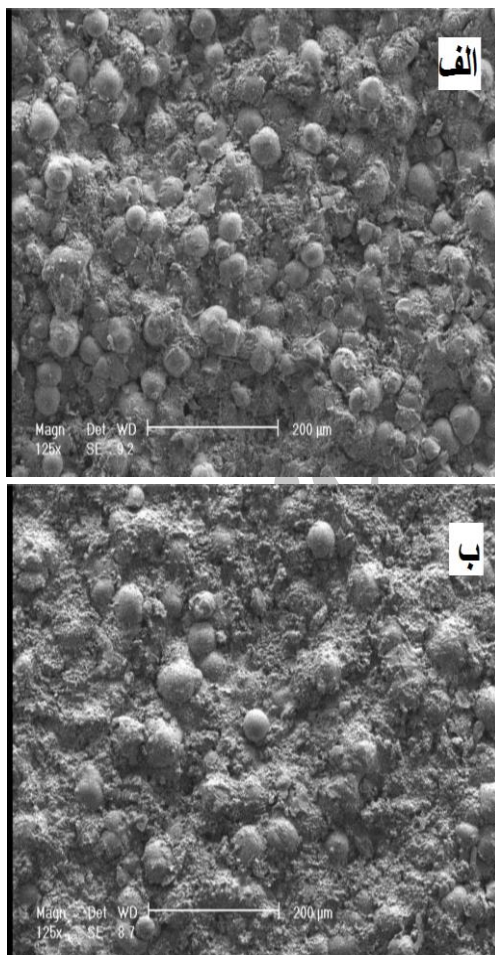
شکل ۱ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) ذرات پودر بعد از یک ساعت مخلوط سازی را نشان می‌دهد. در این شکل ذرات کروی، استالایت ۶ و ذرات اسفنجی شکل کامپوزیت کاربید تنگستن هستند. همانطور که مشاهده می‌شود مورفولوژی ذرات پودر بعد از یک ساعت مخلوط‌سازی همچنان کروی است که این امر موجب آن خواهد شد که فرآیند پاشش حرارتی به خوبی صورت گیرد.

اندازه‌گیری و میانگین آنها ثبت گردید.

### نتایج و بحث

#### مورفولوژی سطحی پوشش

پودرهای کامپوزیتی استنلایت ۶ حاوی فاز تقویت‌کننده کامپوزیت کاربرد تنگستن با استفاده از پارامترهای بهینه شده شرکت پودر افشان اصفهان بر روی زیرلایه‌های فولادی پوشش داده شد. به منظور بررسی مورفولوژی سطحی پوشش‌ها، تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از سطوح مورد نظر گرفته شد. شکل ۲ مورفولوژی سطحی پوشش‌های مورد بررسی را نشان می‌دهد.



شکل ۲. تصویر میکروسکوپی الکترونی از مورفولوژی سطح پوشش

(الف) استنلایت ۶ (ب) استنلایت ۶ حاوی ۳۰٪ تقویت‌کننده.

ابتدا مقطع زده شده و سپس تا سناده ۴۰۰۰ پولیش شدند و در آخر پروفیل سختی برای پوشش‌ها رسم گردید.

#### تخلخل

جهت ارزیابی تاثیر پارامترهای پاشش حرارتی بر تخلخل پوشش از تصاویر میکروسکوپ الکترونی و روش آنالیز تصویر استفاده شد. تصاویر میکروسکوپ الکترونی از سطح مقطع پوشش و با بزرگنمایی ۱۰۰۰ برابر جهت استفاده در نرم افزار آنالیز تصویر تهیه گردید.

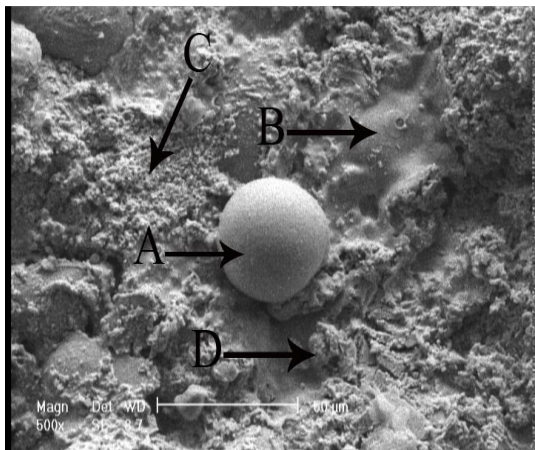
#### چسبندگی

سنجش استحکام چسبندگی پوشش‌دهی پاشش حرارتی طبق استاندارد ASTM-C633 و در دمای اتاق انجام می‌گیرد. بر طبق این استاندارد ابتدا نمونه‌ها شسته و سپس سندبلاست گردید و پوشش‌هایی با ضخامت بیشتر از ۳۸۰ میکرومتر بر روی نمونه‌های استوانه‌ای از جنس فولاد ساده کربنی به قطر ۲/۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۳/۸ سانتی‌متر ایجاد شد. سپس استوانه پوشش داده شده به استوانه دیگری با استفاده از یک چسب اپوکسی استحکام بالا به صورت هم محور متصل گردید. دو قطعه متصل شده توسط دستگاه کشش تحت نیروی محوری قرار گرفته و با نرخ ۰/۰۱۳ تا ۰/۰۲۱ میلی‌متر بر ثانیه کشیده شدند و این کار تا زمانی ادامه یافت که دو قطعه از هم جدا شدند. استحکام چسبندگی از نسبت بین نیروی حاصل از شکست و سطح مقطع قطعه محاسبه گردید.

#### زبری سنجی

جهت بررسی زبری سنجی پوشش‌ها از دستگاه زبری‌سنج Taylor Hobson مدل Surtronic 25 استفاده شد. این دستگاه دارای یک سنسور دقیق است که بر روی سطح نمونه قرار گرفته و با حرکت پروپ آن بر روی پوشش، زبری سطح پوشش اندازه‌گیری می‌شود. زبری پوشش‌ها توسط این دستگاه قبل و بعد از عملیات سنگ‌زنی اندازه‌گیری شد. زبری هر یک از سطوح، ۵ بار

ساختار پوشش افزایش یابد، میزان تخلخل پوشش نیز بیشتر و خواص پوشش افت پیدا می‌کند. افزایش ذرات ذوب نشده بر روی نرخ زبری پوشش نیز می‌تواند تاثیر گذار باشد و موجب افزایش زبری سطحی پوشش گردد. در شکل ۳ به وضوح می‌توان انواع ذرات ذوب شده، ذوب نشده و نیمه ذوب شده را ملاحظه کرد. در این تصویر A ذره ذوب نشده استلایت ۶ است. B ذره کاملاً ذوب شده استلایت ۶ است که بعد از ذوب شدن به طور کامل بر روی پوشش پخش گردیده است. C ذره کاربید تنگستن و D ذره نیمه‌ذوب شده را نشان می‌دهد. جهت تشخیص دقیق این نقاط از آنالیز EDS استفاده گردید که در ادامه قابل ملاحظه است.



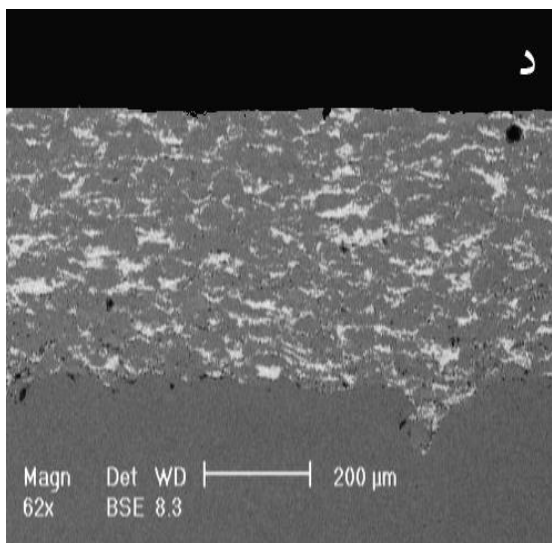
شکل ۳. سطح پوشش حاوی ۳۰٪ وزنی تقویت کننده.

#### بررسی ساختار پوشش‌ها

به منظور بررسی پوشش‌ها از نظر ضخامت، تخلخل، پیوند با زیرلایه و ساختار، سطح مقطع تهیه شده از آنها توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۴ تصاویر SEM مربوط به سطح مقطع پوشش‌های تهیه شده در این پژوهش را نشان می‌دهد. در تصاویر نشان داده شده به خوبی ضخامت پوشش‌ها قابل مشاهده است.

در فرآیند HVOF هنگام برخورد ذرات به سطح، سرعت و دمای بالا باعث تغییر فرم ذرات می‌شود و لایه ورقه‌ای شکل نازکی به دست می‌آید. این لایه کاملاً شکل سطح را گرفته و بر آن منطبق می‌شود و می‌چسبد. ذرات منجمد شده یکی پس از دیگری در حرکت به طرف سطح به سرعت بر روی هم قرار می‌گیرند و لایه‌های پیوسته‌ای به وجود می‌آورند. عموماً پوشش‌های ایجاد شده بر روی سطح دارای ذرات ذوب شده، ذرات نیمه ذوب شده، ذرات ذوب نشده، اکسید، حفره و تخلخل هستند [۶].

با در نظر گرفتن تصاویر شکل ۲ مربوط به مورفولوژی سطحی دو پوشش، تفاوت در شکل و مورفولوژی سطحی دو پوشش به وضوح دیده می‌شود. به دلیل مورفولوژی کروی و مناسب پودر و توزیع یکنواخت ذرات تقویت‌کننده، کمترین میزان گرما می‌تواند ذرات را به صورت مذاب و یا نیمه مذاب در آورده و پوششی با کمترین میزان عیوب ایجاد نماید. در خصوص مورفولوژی نمونه بدون تقویت‌کننده دیده می‌شود که میزان ذرات ذوب نشده و نیمه ذوب شده در مقایسه با نمونه حاوی ۳۰ درصد تقویت‌کننده بیشتر هستند. ذوب نشدن ذرات پودر را می‌توان متأثر از ترکیب شیمیایی پودر، خواص فیزیکی و همچنین پارامترهای پاشش دانست. از طرفی هدایت حرارتی پودر کامپوزیتی کاربید تنگستن تقریباً ۶ برابر استلایت ۶ هستند. لذا با افزایش درصد کاربید تنگستن هدایت حرارتی پوشش بیشتر و ذرات پودر بیشتری می‌توانند به حالت ذوب شده تبدیل شوند. ذراتی که به شکل ذوب شده در ساختار پوشش ایجاد شده‌اند، به شکل اسپلت بر روی سطح پهن گردیده‌اند و به شکل نواحی تختی در ساختار پوشش به چشم می‌خورند [۷]. برخی از ذرات نیمه ذوب شده نیز به دلیل سرعت بسیار بالا در لحظه برخورد با سطح زیر لایه منفجر می‌شوند و بر روی سطح پخش و گاهی باعث ایجاد ذرات بسیار ریزی بر روی سطح پوشش می‌شوند. هرچه میزان ذرات ذوب نشده و نیمه ذوب شده در

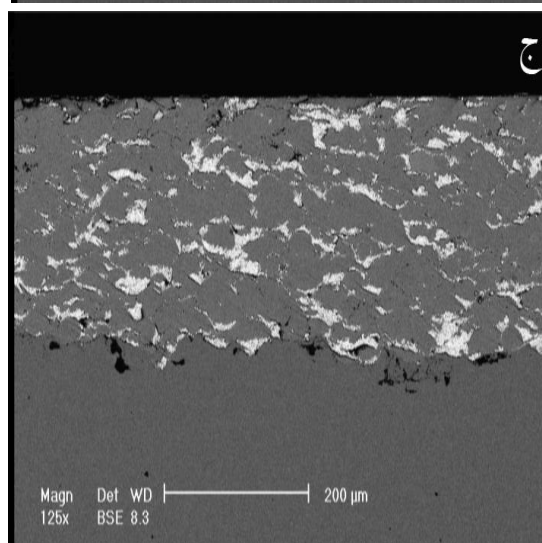
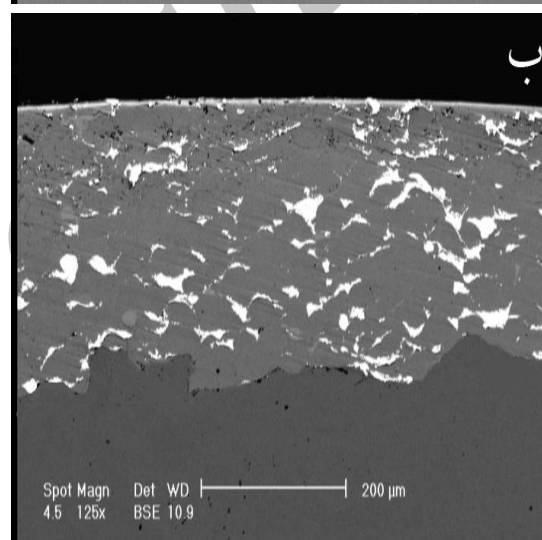
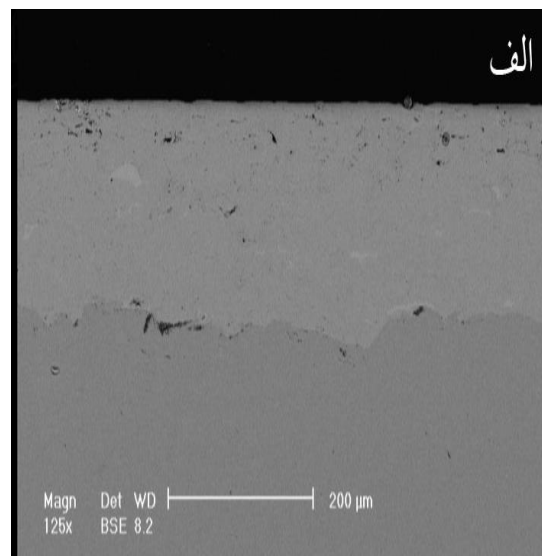


شکل ۴. تصاویر میکروسکوپی الکترونی مربوط به سطح مقطع

پوشش‌های الف) استلایت ۶ ب) استلایت ۶-۱۰٪ کامپوزیت کاربرد

تنگستن ج) استلایت ۶-۲۰٪ کامپوزیت کاربرد تنگستن

د) استلایت ۶-۳۰٪ کامپوزیت کاربرد تنگستن.



همانطور که از شکل ۴ مشاهده می‌شود، پوشش‌ها دارای ساختاری بسیار یکنواخت و همگن هستند و ذرات تقویت کننده با رنگ سفید به خوبی در ساختار توزیع شده است. میزان عیوب موجود در ساختار پوشش همچون تخلخل، خلل و فرج و ذرات اکسیدی بسیار ناچیز است و پوششی با کیفیت بسیار بالا ایجاد گردیده است. مشاهدات متالوگرافی نشان داد که ساختار پوشش ایجاد شده به شکل لایه‌لایه بوده و از ذرات پودر ذوب شده و نیمه ذوب شده ایجاد گردیده است. اگر ذرات مذاب بعد از خروج از تفنگ پاشش به شکل ذوب شده بر روی سطح زیرلایه بنشینند، یک لایه بسیار نازک و کشیده موازی با فصل مشترک ایجاد می‌شود، اما اگر ذرات پودر به شکل ذوب نشده یا نیمه ذوب شده به روی سطح زیرلایه بنشینند مورفولوژی کروی خود را حفظ نموده و تغییر شکل ناچیزی خواهند داد. در اطراف برخی از اسپلت‌ها لایه‌های بسیار نازک سیاه رنگی از اکسید نیز مشاهده می‌شود که در حین پرتاب شدن ذرات از تفنگ HVOF به سمت زیرلایه ایجاد شده‌اند. این لایه‌های

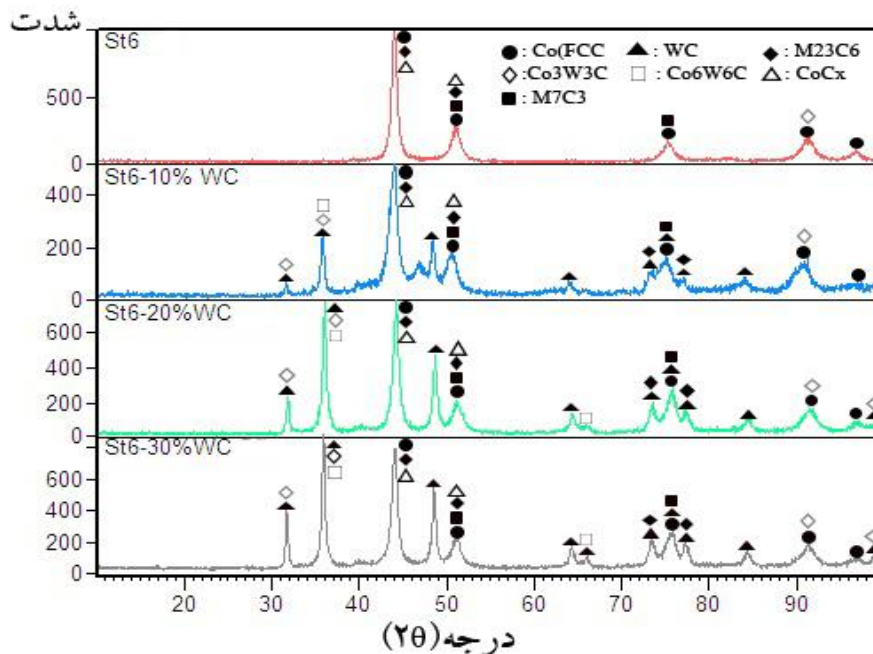
تقویت‌کننده با درصد‌های مختلف و مقایسه آن با نمونه بدون تقویت‌کننده را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ساختار پوشش‌ها دارای فاز غنی از کبالت با ساختار مکعبی با وجوه مرکزدار (FCC) است. فازهای کاربیدی تشکیل شده در ساختار پوشش نقش به‌سزایی در بهبود خواص پوشش از جمله سختی دارند. فازهای کاربیدی ایجاد شده در ساختار پوشش استلایت ۶،  $M_7C_3$  و  $M_{23}C_6$  هستند که M نماینده عنصر Cr است. با مقایسه الگوی پراش برای پوشش‌های مختلف می‌توان دریافت که با افزایش درصد فاز تقویت‌کننده کاربید تنگستن، شدت پیک‌های کبالت رو به کاهش و شدت پیک‌های فاز کاربید تنگستن و محصولات ناشی از واکنش آن با سایر اجزای پوشش افزایش یافته است. فازهای کاربیدی غنی از کبالت،  $CoC_x$ ،  $Co_3W_3C$  و  $Co_6W_6C$  با افزایش فاز تقویت‌کننده شروع به شکل گرفتن کرده‌اند که این فازها موجب افزایش سختی پوشش خواهند شد.

نازک اکسیدی ایجاد شده به وسیله فرآیند HVOF توسط محققان دیگری همچون Sidhu و Sturgeon نیز گزارش گردیده بود [۸-۹]. مشاهداتی که از سطح مقطع پوشش‌های استلایت ۶ ایجاد شده به وسیله فرآیند پاشش HVOF در این پژوهش بدست آمد با نتایج Zhao و Ak نیز تطابق دارد [۱۰-۱۱].

با توجه به سطح مقطع پوشش‌ها می‌توان پیوند مناسب پوشش به زیرلایه را نیز مشاهده کرد. در فصل مشترک پوشش‌های نشان داده شده هیچ اثری از نچسبیدن پوشش به زیرلایه دیده نمی‌شود. سندبلاست کردن سطح قبل از پاشش سبب به وجود آمدن فرورفتگی‌ها و برآمدگی‌هایی شده که توانسته است به ایجاد قفل مکانیکی بین پوشش و زیرلایه کمک کند و اتصالات قوی مابین آنها به وجود آورد و موجب ایجاد پوشش‌هایی با چسبندگی بالایی شده است [۱۲].

#### بررسی فازی ساختار پوشش‌ها

شکل ۵ الگوهای پراش پرتو ایکس نمونه‌های حاوی



شکل ۵. الگوهای پراش پرتو ایکس (XRD) نمونه‌های پوشش داده شده با درصد‌های مختلف تقویت‌کننده.

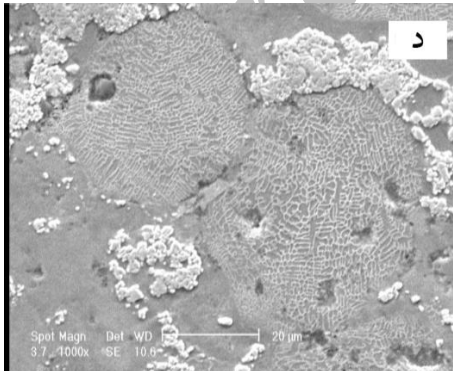
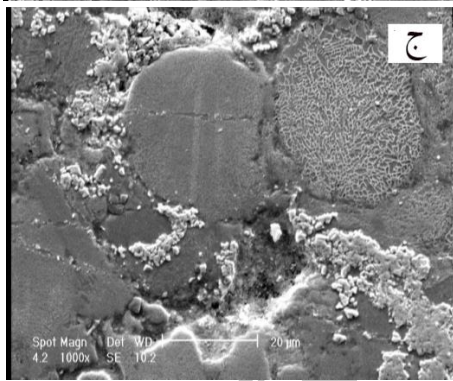
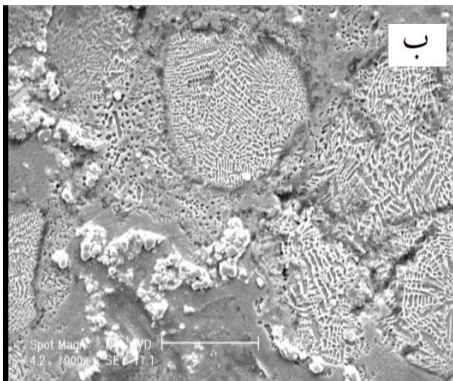
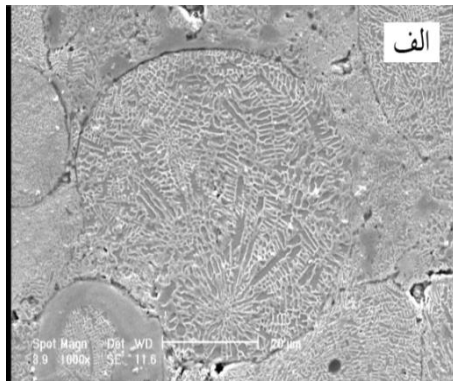
Archive of SID



### بررسی ریز ساختار پوشش‌ها

به منظور بررسی بیشتر پوشش‌ها از نظر ریز ساختار و نحوه توزیع فاز تقویت کننده کاربید تنگستن و همچنین توزیع فاز زمینه در بین این ذرات از تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی با بزرگنمایی ۱۰۰۰ برابر استفاده شد. در شکل ۶ تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از پوشش‌های تهیه شده نشان داده شده است. در تصاویر مربوط به پوشش‌های کامپوزیتی زمینه فلزی استلایت ۶، توزیع نسبتاً یکنواخت ذرات کاربید تنگستن در زمینه دیده می‌شود. استفاده از آسیاب بدون گلوله شرایط مناسبی برای توزیع یکنواخت ذرات کاربید تنگستن در زمینه فلزی فراهم کرده و این یکنواختی با شرایط مناسب استفاده شده برای فرآیند پاشش حرارتی HVOF منجر به ایجاد پوشش‌هایی با یکنواختی مناسب گردیده است. کبالت به دلیل داشتن خواص عالی در کنار کاربرد تنگستن مانند ترکندگی عالی برای آن و همچنین اندازه ذرات مناسب کامپوزیت کاربید تنگستن استفاده شده در این پوشش می‌تواند یکی از علل یکنواختی و همگن بودن بیشتر این پوشش‌ها دانست.

از آنجایی که استلایت ۶ یک آلیاژ هیپوئوتکتیک محسوب می‌شود، ریزساختار حاصل از انجماد آن شامل دندریت‌های محلول جامد کبالت (مناطق روشن) و کروم با ساختار FCC و یوتکتیک بین دندریتی (مناطق تیره) شامل فاز غنی از کبالت و کاربیدهای نوع  $M_7C_3$  و  $M_{23}C_6$  است که به وضوح در اشکال قابل رویت است. این کاربیدها در اثر پس زده شدن عناصر محلول در مذاب نظیر W، Mo، Cr به محدوده بین دندریتها، در حین انجماد شکل می‌گیرند. اولین فازی که از مذاب جدا شده و منجمد می‌شود مناطق غنی از کبالت است که به شکل دندریت رشد می‌کند [۱۳].



شکل ۶. تصاویر میکروسکوپی الکترونی مربوط به ریز ساختار

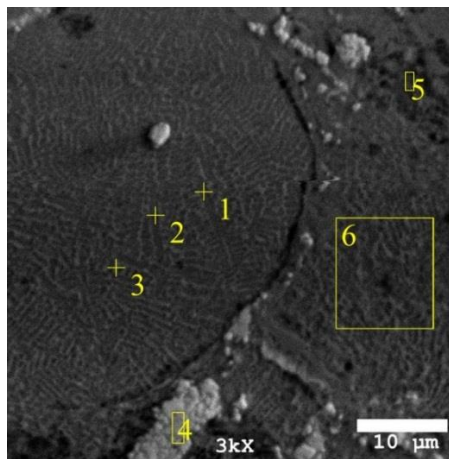
پوشش‌های (الف) استلایت ۶ (ب) استلایت ۶-۱۰٪ کامپوزیت کاربید

تنگستن (ج) استلایت ۶-۲۰٪ کامپوزیت کاربید تنگستن

(د) استلایت ۶-۳۰٪ کامپوزیت کاربید تنگستن.

آورده شده است.

با توجه به نتایج EDS فازهای دندریتی (مناطق روشن‌تر) طبق جدول ۷، حاوی محلول جامد کبالت و کروم هستند. با ایجاد دندریت‌های غنی از کبالت و کروم، رفته‌رفته غلظت عناصر آلیاژی در اثر پس زده شدن به محدوده بین دندریت‌ها افزایش یافته و فازهای غنی از کبالت نظیر  $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$  و  $\text{Co}_6\text{W}_6\text{C}$  و فازهای کاربیدی مهمی همچون  $\text{M}_7\text{C}_3$  و  $\text{M}_{23}\text{C}_6$  که عمدتاً کاربید کروم (مناطق تیره بین دندریتی) هستند، شکل می‌گیرند.



شکل ۷. تصاویر EDS گرفته شده از ساختار پوشش استلایت ۶-۲۰٪ کامپوزیت کاربید تنگستن.

جدول ۴. عناصر پوشش استلایت ۶-۲۰٪ کامپوزیت کاربید تنگستن.

ناحیه	% Co (Atomic)	% Cr (Atomic)	% W (Atomic)	% Fe (Atomic)	% C (Atomic)
۱	۴۲/۴۴	۲۷/۸۲	۶/۹۴	۲/۷۵	۲۰/۰۴
۲	۴۴/۳۹	۳۱/۸۶	۶/۲۳	۳/۲۵	۱۴/۲۷
۳	۴۴/۰۹	۳۰/۹۸	۷/۰۴	۲/۸۳	۱۵/۰۶
۴	۱۵/۰۸	۸/۵۱	۵۲/۹۵	۳/۱۵	۱۷/۳۱
۵	۴۰/۷۰	۲۹/۸۵	۷/۷۸	۲/۶۷	۱۸/۹۹
۶	۴۰/۳۲	۲۸/۱۰	۷/۰۳	۳/۱۳	۲۱/۴۲

در پژوهش‌های صورت گرفته توسط سایر محققین که بر روی پوشش‌های روکش‌کاری شده استلایت ۶ صورت گرفته است، عمدتاً فاز کامپوزیتی کاربید تنگستن به دلیل قرار گیری در دمای بسیار بالای جوشکاری فرصت کافی برای تجزیه شدن و ایجاد فازهای جدید غنی از کبالت نظیر  $\text{Co}_6\text{W}_6\text{C}$  و  $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$  را دارد اما در روش HVOF به دلیل آنکه مدت زمان بسیار اندکی را در معرض دمای بسیار بالا قرار می‌گیرند، عمدتاً به صورت کامل ذوب نمی‌شوند و به شکل اسپلت بر روی سایر اسپلت‌ها قرار می‌گیرند. از آنجایی که ساختار کامپوزیتی کاربید تنگستن خود دارای ساختار اسفنجی شکل است، سطح بیرونی آن با جذب حرارت بسیار بالا با ذوب جزئی خود می‌تواند با زمینه غنی از کبالت واکنش داده و موجب ایجاد مقادیر بسیار کمی از فازهای غنی از کبالت شود. کامپوزیت ایجاد شده از جمله کامپوزیت‌های دو فازی است که فاز کاربیدی به خوبی از فاز زمینه قابل تفکیک است. تصاویر میکروسکوپی الکترونی در حالت الکترون ثانویه (SE) به خوبی این اختلاف را نشان می‌دهند که به علت اختلاف قابل توجه در عدد اتمی تنگستن و کبالت است. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود توزیع ذرات کاربید تنگستن با رنگ سفید در زمینه به صورت کاملاً یکنواخت توزیع گردیده است. این مطلب نشانگر یکنواختی توزیع کاربید تنگستن در ساختار پودر مصرفی نیز هست.

### آنالیز فازی پوشش

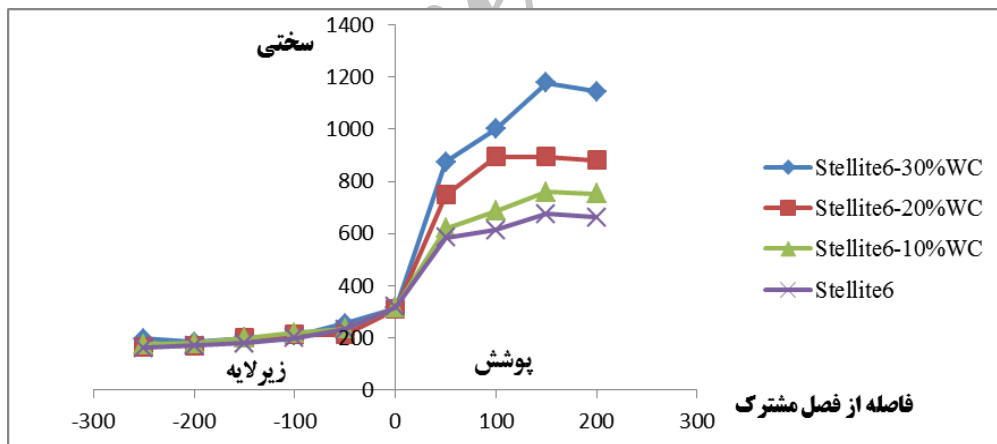
جهت بررسی دقیق فازهای ایجاد شده در ساختار پوشش اعم از فازهای دندریتی، بین دندریتی و نامشخص از آنالیز نقطه‌ای طیف سنجی انرژی اشعه ایکس (EDS) استفاده گردید. شکل ۷ آنالیز عنصری پوشش استلایت ۶ حاوی ۲۰ درصد وزنی کامپوزیت کاربید تنگستن را نشان می‌دهد. مناطق ۱ تا ۶ فازهای مختلف ایجاد شده در ساختار پوشش هستند که آنالیز عنصری آنها در جدول

پوشش و زیرلایه کاملاً مشهود است. بدیهی است که میزان میکروسختی در امتداد سطح مقطع پوشش با فاصله از فصل مشترک زیرلایه - پوشش تغییر می‌کند. این غیر یکنواختی در سختی پوشش‌ها، در امتداد فاصله از همه زیرلایه‌ها، به تغییرات ساختاری سطح مقطع پوشش‌ها نسبت داده می‌شود. این تغییرات ساختاری ممکن است ناشی از حضور فاز تقویت‌کننده، تخلخل، اکسید، ذرات ذوب نشده، نیمه‌ذوب و یا ذوب شده در ساختار پوشش باشد. حضور تخلخل بیشتر در ساختار پوشش موجب می‌شود تا سختی کمتری از حالت بدون تخلخل دریافت شود. در برخی از تحقیقات صورت گرفته نیز سختی کمتری را برای پوشش‌های استلایت ۶ گزارش کرده‌اند که می‌توان گفت عمدتاً به دلیل تخلخل بالاتر در پوشش آنها بوده است [۱۵].

افزایش در میزان درصد کربن فازهای بین دندریتی نیز که در جدول آمده است نیز گواه بر این موضوع است. البته با توجه به اینکه از سیستم آنالیز EDS نمی‌توان جهت تعیین دقیق عناصر سبک نظیر کربن استفاده کرد، لذا از درصد کربن تنها جهت مقایسه استفاده می‌شود. همانطور که از نتایج آنالیز نیز مشخص است، فازهای سفید رنگ در ساختار پوشش کاربرد تنگستن هستند که در اثر حرارت تفنگ پاشش درون زمینه غنی از کبالت به صورت یکنواخت توزیع شده‌اند.

#### بررسی سختی

جدول ۴ میانگین سختی محاسبه شده برای پوشش‌های مختلف را نشان می‌دهد. پروفیل سختی نمونه های استلایت ۶ همراه با فاز تقویت کننده کاربرد تنگستن از مغز به سمت سطح پوشش نیز در شکل ۸ نشان داده شده است. با توجه به پروفیل شکل ۸ تفاوت در سختی



شکل ۸. تغییرات میکروسختی پوشش‌ها بر حسب فاصله از فصل مشترک.

#### تست تخلخل سنجی

تخلخل از جمله مهمترین موارد مورد بررسی در ساختار پوشش‌های پاشش حرارتی است. ایجاد فضای خالی بین اجزای پوشش پاشش حرارتی در حین قرار گرفتن ذرات روی یکدیگر سبب ایجاد تخلخل در پوشش می‌شود. تخلخل موجود در ساختار پوشش می‌تواند بر گستره

جدول ۵. میانگین سختی پوشش‌ها.

پوشش	سختی (VHN)
Stellite6	$627 \pm 13$
Stellite6 / 10% WC	$760 \pm 38$
Stellite6 / 20% WC	$892 \pm 23$
Stellite6 / 30% WC	$1028 \pm 19$



شکل ۱۰. نمونه پوشش حاوی ۲۰ درصد تقویت کننده بعد از آزمون چسبندگی.

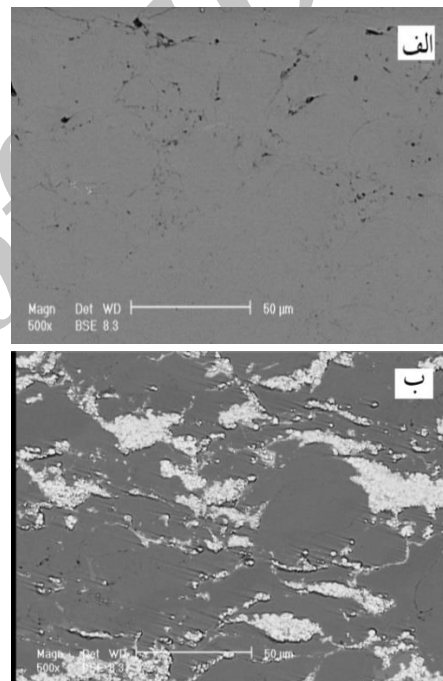
پوشش حاوی ۳۰ درصد تقویت کننده دارای تخلخل بسیار ناچیز است و به دلیل سطح تماس بسیار کم پودر با شعله HVOF، به نظر می‌رسد لایه اکسیدی تشکیل نشده و حتی مرز اسپلت‌ها نیز قابل تشخیص نیست. در پوشش استلایت ۶ لایه‌های بسیار نازک از اکسید در اطراف اسپلت‌ها مشاهده می‌شود که در حین پرتاب شدن ذرات از تفنگ به سمت زیرلایه بر روی سطح آنها ایجاد شده‌اند. این لایه نازک اکسیدی ایجاد شده توسط محققان دیگری همچون Dent [۸] و Zhang [۱۷] نیز گزارش گردیده است.

آزمون تخلخل سنجی برای تمامی نمونه‌ها تا ۵ بار تکرار گردید که میانگین نتایج آن در جدول ۵ آورده شده است. بیشترین میزان تخلخل از آن پوشش استلایت ۶ و کمترین میزان تخلخل را پوشش استلایت ۶ حاوی ۳۰ درصد وزنی کامپوزیت کاربید تنگستن دارا است.

جدول ۶. مقادیر تخلخل اندازه گیری شده برای پوشش‌ها.

پوشش	درصد تخلخل
Stellite6	۲
Stellite6 / 10% WC	۱/۷
Stellite6 / 20% WC	۱/۳
Stellite6 / 30% WC	< ۰/۴

وسیع‌تری از خواص مانند مدول الاستیک، رسانندگی حرارتی، تافنس شکست، سختی، مقاومت به سایش و خوردگی تاثیر گذار باشد. جهت تشخیص میزان تخلخل، از روش آنالیز تصویری استفاده شد. محققان زیادی قابل اعتماد بودن این روش برای سنجش میزان تخلخل را ذکر نموده‌اند. بنحوی که قابل اعتماد بودن این روش، در شرایط مناسب متالوگرافی در حدود ۹۵٪ ذکر شده است [۱۶].



شکل ۹. تصویر SEM از سطح مقطع پوشش الف) استلایت ۶ ب) استلایت ۶ حاوی ۳۰٪ کامپوزیت کاربید تنگستن.

برای تشخیص میزان تخلخل از تصاویر میکروسکوپی در حالت الکترون‌های ثانویه و بازگشتی در بزرگنمایی ۱۰۰۰ برابر استفاده گردید (مطابق شکل ۹). در پوشش‌های پاشش حرارتی نقاط تیره رنگ در تصاویر الکترون‌های بازگشتی که در تصاویر میکروسکوپی در حالت الکترون‌های ثانویه به صورت روشن دیده می‌شوند و دارای عمق هستند، تخلخل هستند.

## تست چسبندگی

جدول ۷. میانگین چسبندگی پوشش‌ها با افزایش میزان فاز تقویت‌کننده.

پوشش	استحکام چسبندگی (MPa)
Stellite6	۵۳
Stellite6 / 10% WC	۵۵
Stellite6 / 20% WC	>۶۰
Stellite6 / 30% WC	>۶۰

## زبری سنجی

معمولا پوشش‌های پاشش حرارتی در حالت پاشیده شده استفاده نشده و به عملیات سنگ‌زنی نهایی جهت رسیدن به صافی سطح بالا بعد از انجام عملیات پاشش نیازمندند. حال هرچه زبری سطح در حالت پاشیده شده کمتر باشد، عملیات سنگ‌زنی برای رسیدن به صافی سطح نهایی راحت‌تر و کم هزینه‌تر خواهد بود.

عوامل مختلفی همچون فاصله پاشش، زبری سطح زیرلایه، نسبت اکسیژن به سوخت، اندازه ذرات پودر و سرعت ذرات می‌توانند بر زبری سطح تاثیر گذار باشند. یکنواخت بودن اندازه ذرات پودر باعث کاهش زبری می‌شود. [۹].

نتایج حاصل از زبری‌سنجی پوشش‌های مختلف در جدول ۷ آورده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود زبری پوشش‌ها با افزایش میزان فاز تقویت‌کننده کاربرد تنگستن رو به کاهش است. به نظر می‌رسد از آنجایی که میزان ذرات ذوب نشده در ساختارهای با درصدهای کمتر فاز تقویت‌کننده بیشتر است، لذا این امر موجب افزایش در نرخ زبری سطحی شده است.

موضوع مهم دیگر در این رابطه توزیع اندازه ذرات پودر است که به دلیل یکنواختی و کروی بودن ذرات پودر منجر به زبری کم این دسته از پوشش‌ها گردیده است. این مسأله را می‌توان به وضوح در تصاویر ۳-۴ که توسط

آزمون چسبندگی از جمله آزمون‌های مشخصه‌یابی پوشش‌های پاشش حرارتی است که می‌تواند برای کنترل کیفیت این پوشش‌ها نیز مورد استفاده قرار گیرد. با افزایش میزان تخلخل در ساختار پوشش ارتباط کمتری بین لایه‌ها وجود داشته و در نتیجه استحکام چسبندگی کاهش می‌یابد.

از آنجایی که سرعت پرتاب ذرات بر روی سطح زیرلایه در روش پاشش حرارتی بسیار بالاست، لذا این امر موجب افزایش استحکام چسبندگی پوشش به زیرلایه می‌گردد. یکی از عوامل تاثیرگذار در چسبندگی آماده-سازی زیرلایه است. این آماده‌سازی بایستی متناسب با نوع پوشش انجام گیرد که عمدتا در فرآیندهای پاشش حرارتی از روش سندبلاست استفاده می‌شود [۱۸].

نتایج حاصل از آزمون چسبندگی برای پوشش‌های مختلف در جدول ۶ آورده شده است. تصویر ماکروسکوپی از نمونه پوشش حاوی ۲۰ درصد تقویت‌کننده پس از آزمون چسبندگی در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، گسیختگی صورت گرفته در فصل مشترک پوشش با زیرلایه صورت گرفته است که در این حالت انهدام به چسبندگی پوشش مربوط بوده و به وسیله آن می‌توان استحکام چسبندگی را محاسبه نمود.

با توجه به نتایج، ملاحظه می‌شود پوشش‌های حاوی درصد بالاتر فاز تقویت‌کننده کامپوزیت کاربرد تنگستن دارای استحکام چسبندگی بالاتری هستند. با توجه به نتایج به دست آمده مشخص است، پوشش‌های حاوی درصد بالای فاز تقویت‌کننده به دلیل دارا بودن سختی بالاتر و هدایت حرارتی بیشتر در حین پاشش توانسته‌اند به طور مناسب‌تری نسبت به پوشش استلایت ۶ با زیرلایه تماس حاصل کنند و موجب اتصال قوی پوشش به زیرلایه شده است.

تقویت‌کننده میزان تخلخل پوشش از ۲ درصد برای پوشش استلایت ۶ به کمتر از ۰/۴ درصد برای نمونه استلایت ۶ حاوی ۳۰ درصد کاربید تنگستن، کاهش یافت.

۵- چسبندگی پوشش با اضافه نمودن فاز تقویت‌کننده افزایش یافت به گونه‌ای که چسبندگی پوشش حاوی ۳۰ درصد فاز تقویت‌کننده به بیش از ۶۰ مگاپاسکال می‌رسد.

۶- از آنجایی که پوشش‌های حاوی مقادیر کمتر فاز تقویت‌کننده دارای ذرات ذوب نشده بیشتری هستند، لذا زبری سطحی آنها نیز بیشتر و این میزان زبری با افزایش فاز تقویت‌کننده کاهش یافته است.

#### منابع و مراجع

1. J. Vicenzi, D.L. Villanova, M.D. Lima, *Development of an apparatus to determine high-temperature erosive wear up to 800 °C*, Materials Science and Engineering A, 27(2006) 231-236.
2. A. Asphahani, *Corrosion of Cobalt-Base Alloys*, ASM Metals Handbook, 13(1992) 658-662.
3. S.J. Matthews, Haynes International Inc, ASM Metals Handbook, 6(1993).
4. M.X Yao, J.B.C. Wub, Y. Xiec, *Wear, Corrosion and cracking resistance of some W or Mo-containing Stellite hardfacing alloys*, Materials Science and Engineering A, 407(2005) 234-244.
5. F. Madadi, M. Shamanian, F. Ashrafizadeh, *Effect of pulse current on microstructure and wear resistance of Stellite6/tungsten carbide claddings produced by tungsten inert gas process*, Surface and Coatings Technology, 205(2011) 4320-4328.
6. S. Grainer, J. Blunt, *Engineering coatings Design and Application*, 2<sup>nd</sup> edition, Abington publications, Cambridge, England, (2006) 120-166.
7. H.S. Sidhu, B.S. Sidhu, S. Prakash, *Solid particle erosion of HVOF sprayed NiCr and Stellite-6 coatings*, Surface and Coatings Technology, 202(2007) 232-238.
8. T.S. Sidhu, S. Prakash, R.D. Agrawal, *Performance of HVOF chromium carbide Nickel Chromium Coating in an Actual Boiler*

میکروسکوپ الکترونی از سطح پوشش قبل از عملیات سنگ‌زنی گرفته شده است، ملاحظه نمود.

جدول ۸ مقادیر زبری سطحی اندازه‌گیری شده برای پوشش‌ها.

پوشش	زبری پس از پاشش (R <sub>a</sub> )	زبری پس از سنگ‌زنی (R <sub>a</sub> )
Stellite6	۷/۹۲ ± ۰/۳ μm	۰/۴۳ ± ۰/۰۱ μm
Stellite6/ 10% WC	۷/۱۴ ± ۰/۳ μm	۰/۴۱ ± ۰/۰۱ μm
Stellite6/ 20% WC	۶/۸۳ ± ۰/۳ μm	۰/۳۳ ± ۰/۰۱ μm
Stellite6/ 30% WC	۶/۵۷ ± ۰/۳ μm	۰/۲۹ ± ۰/۰۱ μm

#### نتیجه‌گیری

۱- با اضافه نمودن فاز تقویت‌کننده کاربید تنگستن به زمینه، خواص پوشش ارتقا پیدا نمود و تصاویر سطح مقطع پوشش‌ها نیز حاکی از توزیع بسیار یکنواخت و همگن ذرات تقویت‌کننده در ساختار پوشش دارد.

۲- نتایج فازیابی پوشش نشان داد، ساختار پوشش‌ها دارای فاز غنی از کبالت با ساختار مکعبی با وجوه مرکزدار (FCC) است. فازهای کاربیدی غنی از کبالت، CoC<sub>x</sub>، Co<sub>3</sub>W<sub>3</sub>C و Co<sub>6</sub>W<sub>6</sub>C با افزایش فاز تقویت‌کننده شروع به شکل گرفتن کرده‌اند که این فازها در بهبود خواص پوشش از جمله سختی، نقش به‌سزایی پوشش ایفا می‌کنند.

۳- با اضافه نمودن فاز تقویت‌کننده کاربید تنگستن به زمینه استلایت ۶ سختی پوشش‌ها افزایش یافته است. حداکثر سختی پوشش‌ها از ۱۰۲۸ HV برای نمونه حاوی ۳۰ درصد تقویت‌کننده تا نزدیک ۶۲۷ HV برای نمونه بدون تقویت‌کننده متغیر است.

۴- در پوشش‌های پاشش‌حرارتی یکی از مهمترین پارامترها، درصد تخلخل پوشش است. با اضافه نمودن فاز

*Environment of Thermal Power Plant, Corrosion*, 63(2007) 828-834.

9. A.J. Sturgeon, ASM Handbook, surface Engineering, Thermal Spray Coatings, 5 (2001) 1149.

10. N.F. Ak, C. Tekmen, I. Ozdemir, H.S. Soykan, E. Celik, *NiCr coatings on stainless steel by HVOF technique*, Surface and coatings technology, 173-174(2003) 1070-1073.

11. L. Zhao, J. Zwick, and E. Lugscheider, *HVOF spraying of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dispersion strengthened NiCr powder*, Surface and Coatings Technology, 182(2004) 72-77.

12. Y.C. Zhu, C.X. Ding, K. Yukimura, T. Dannyxiao, and P.R. Strutt, *Deposition and characterization of nanostructured WC-Co coating*, Ceramics International, 27(2001) 669-674.

13. A. Lesnewich, *Influence of welding on steel weldment soundness*, *Welding Brazing & Soldering*, ASM Metal Handbook, 6(2010) 408-415.

14. W. Zhang, S.A. Sampath, *Universal method for representation of in-flight particle characteristics in thermal spray processes*, Journal of Thermal spray Technology, 18(2009) 23-34.

15. T.S. Sidhu, S. Prakash, R.D. Agrawal, *Studies of the metallurgical and mechanical properties of high velocity oxy-fuel sprayed stellite6 coatings on Ni and Fe based superalloys*, Surface and Coatings Technology, 20(2006) 273-281.

16. S. Deshpande, A. Kulkarni, H. Herman, *Application of image analysis for characterization of porosity in thermal spray coatings and correlation with small angle neutron scattering*, Surface and Coating Technology, 187(2004) 6-16.

17. A. Zhang, Y. Wang, and J. Xing, *Erosion-Corrosion characteristic and electrochemical behavior of HVOF spray coating and two types of steels*, Journal of Xi'an Jiaotong University, 37(2003) 1150-1158.

18. L. Pawlowski, *The Science and Engineering of Thermal Spray Coating*, John Wiley and Sons, (1995).