

## مشخصه یابی پوشش‌های پاشش حرارتی استلایت ۶

احسان بهارزاده

دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد

مرتضی شمعیان

دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان

( دریافت مقاله : ۸۹/۳/۷ - پذیرش مقاله : ۸۹/۹/۲ )

### چکیده

در این تحقیق به بررسی پوشش آلیاژ استلایت ۶ ایجاد شده بر روی زیر لایه فولاد St37 بوسیله فرآیند پاشش حرارتی HVOF پرداخته شده است. ریزساختار، تخلخل، ضخامت و فازشناسی پوشش ایجاد شده با استفاده از روش‌های مختلفی نظیر میکروسکوپ نوری، پرتو پراش ایکس (XRD) و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مجهز به آزمون طیف سنج انرژی (EDS) مورد بررسی قرار گرفت. همچنین آزمون ریز سختی سنجی بر سطح مقطع پوشش انجام شد. یافته‌های پژوهشی نشان داد که پوشش ایجاد شده دارای یک ساختار لایه‌ای بوده که بواسطه رسوب و انجماد پیوسته ذرات بودر مذاب و نیمه مذاب ایجاد شده است. همچنین در این ساختار تخلخل، آخال، ذرات ذوب نشده و نیمه ذوب شده مشاهده می‌شود. تخلخل موجود در پوشش در حدود ۲٪ و سختی آن نیز در حدود ۷۰۰ ویکرز بوده و ضخامت تقریبی آن در حدود ۵۰۰ میکرون است. با توجه به آزمون چسبندگی انجام شده، چسبندگی پوشش به زیرلایه بیشتر از ۶۷ مگاپاسکال می‌باشد. نتایج آنالیز XRD پوشش ایجاد شده دلالت بر این امر دارد که در حین انجام فرآیند پاشش هیچ گونه تغییر فاز محسوسی در بودر رخ نداده و فاز کبالت با ساختار FCC به عنوان فاز اصلی در ساختار پوشش وجود دارد.

واژه های کلیدی: استلایت ۶، پوشش پاششی، ریزساختار، سختی، آزمون چسبندگی.

## Characterization of thermal sprayed stellite 6 coatings

E. Baharzadeh

Department of Materials Engineering, Islamic Azad University, Najafabad Branch, Iran

M. Shamanian

Department of Materials Engineering, Isfahan University of Technology, Iran

### Abstract

This paper studies the microstructure and properties of stellite6 coatings produced by high velocity oxy-fuel (HVOF) presses on low carbon steel (St 37). The microstructure, porosity, coating thickness, phase formation and microhardness of the coating were investigated using the combined techniques of optical microscopy, X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy/ energy dispersive spectrometry (SEM/EDS). The coatings exhibited a layered microstructure due to deposition and re-solidification of molten powder particles. Porosity, unmelted and semi melted particles and inclusions were present in the microstructure of the coating. In addition, the coating showed porosity content of about 2% and a hardness of about 700 HV. The thickness of as-sprayed coatings was about 500  $\mu\text{m}$ . The adhesive strength of coating to substrate was more than 67 MPa. The result of XRD indicated that no phase transitions occur in feedstock powder after HVOF spraying and the coatings consist of a Co-rich matrix of face centered cubic (FCC).

**Keywords:** Stellite6, Coating spray, Microstructure, Hardness, Adhesive Strength.

**E-mail of corresponding author:** e\_baharzadeh@yahoo.com.

## مقدمه

شیرهای دروازه‌ای<sup>۱</sup> در صنعت نفت دارای نقشی حساس در انتقال نفت و گاز، تعیین شرایط ایمنی کار و محافظت از محیط زیست است. در حین کار اجزای این شیرها در معرض سایش و خوردگی قرار می‌گیرند که این امر موجب کاهش قابل توجه عمر آنها می‌گردد. جنس این شیرها بیشتر از فولاد ساده کربنی بوده که این ماده به تنهایی قادر به مقابله با موارد فوق نبوده و بنابراین باید از یک پوشش مناسب جهت مبارزه با سایش و خوردگی در آنها استفاده کرد.

سخت‌کاری سطحی مهمترین روش بازسازی و اصلاح سطح قطعات صنعتی است که از آن برای پوشش دادن مواد ضد سایش و ضد خوردگی بر روی سطح استفاده می‌شود. سه روش سخت‌کاری سطحی عبارتند از: روکش‌کاری، جوشکاری و پاشش حرارتی.

پاشش حرارتی به مجموعه‌ای از فرآیندهای پوشش‌دهی اطلاق می‌شود که در طی آن قطعات ریز مذاب یا نیمه مذاب به روی سطح مورد نظر پاشیده شده و تشکیل پوشش می‌دهند. فرآیند HVOF یکی از عمومی‌ترین و در عین حال پیشرفته‌ترین و مهمترین فرآیندهای پاشش حرارتی است که به طور وسیعی در صنایع برای ایجاد پوشش‌هایی با کیفیت بالا، برای حفاظت قطعات از سایش، خوردگی و فرسایش مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱]. با این وجود تخلخل موجود در این پوشش‌ها در برخی از مواقع کاربرد آنها را در مقابله با خوردگی محدود می‌کند [۲]. با این حال برخی از پوشش‌های پاشش حرارتی ایجاد شده توسط فرآیند HVOF نظیر سرمته‌ها برای مبارزه با خوردگی مورد استفاده قرار می‌گیرد. پوشش‌های کاربید تنگستن-کبالت ایجاد شده توسط فرآیند HVOF نیز کاربردهای زیادی برای افزایش مقاومت سایشی داشته و مطالعات زیادی در این زمینه صورت گرفته است. پوشش‌های MCrAlY اعمال شده با این روش نیز مقاومت خوبی در برابر خوردگی داغ از خود نشان می‌دهند. از جمله کاربردهای این پوشش‌ها می‌توان به استفاده آنها در پره

توربین‌های گازی اشاره کرد [۳]. یکی دیگر از مهمترین آلیاژهای مورد استفاده برای ایجاد پوشش، آلیاژ پایه کبالت استلایت ۶ می‌باشد که مقاومت خوبی در برابر سایش و خوردگی از خود نشان می‌دهد. مقاومت به خوردگی و اکسیداسیون در دمای بالای پوشش‌های استلایت ۶ ایجاد شده توسط این فرآیند نیز در برخی از مطالعات مورد بررسی قرار گرفته است [۴-۶]. مطالعاتی نیز در مورد رفتار سایشی-اصطکاکی آلیاژهای رویه سختی استلایت انجام گرفته است. در این مطالعات از فرآیندهایی نظیر جوشکاری، لیزر و پاشش حرارتی برای ایجاد پوشش بر روی سطح زیر لایه استفاده شده است [۷-۱۰]. در مورد استفاده از پوشش‌های استلایت ۶ برای مبارزه با سایش و خوردگی در شیرهای مورد استفاده در صنعت نفت و گاز با استفاده از روکش‌کاری توسط لیزر مطالعاتی انجام گرفته است [۱۱]. نتایج حاصله نشان داده است که این شیرها تحت نیروهای بالا از خود مقاومت به سایش و ترک مناسبی را نشان می‌دهند، لذا هدف از انجام این تحقیق استفاده از پوشش‌های استلایت ۶ جهت بهبود رفتار سایشی فولادهای ساده کربنی و مبارزه با سایش و خوردگی در شیرهای مورد استفاده در صنعت نفت و گاز با استفاده از فرآیندهای پاشش حرارتی است.

## مواد و روش آزمایش‌ها

### مواد زیر لایه و پوشش

در این تحقیق از فولاد ساده کربنی DIN1.2356 به عنوان ماده زیر لایه استفاده شد. ترکیب شیمیایی زیر لایه مصرفی آنالیز شده بوسیله دستگاه کوانتومتری، در جدول ۱ ذکر شده است. برای ایجاد پوشش بر روی زیر لایه نمونه‌هایی از آن به ابعاد  $10 \times 15 \times 60$  میلی‌متر تهیه شده که این نمونه‌ها قبل از فرآیند پوشش‌دهی بوسیله ماسه سیلیسی سند بلاست شده و توسط استون برای زدودن چربی‌ها و گرد و غبار شست‌وشو داده شدند.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی فولاد DIN1.3265 (درصد وزنی)

C	Mn	Si	S	P	Fe
0.192	0.530	0.130	0.007	0.008	Bal

### مشخصه یابی پوشش‌ها

جهت بررسی ساختار پوشش از میکروسکوپ نوری مدل Axiotech استفاده شد. فازشناسی پوشش با استفاده از دستگاه Philips و با اشعه  $CuK\alpha$  با طول موج  $\lambda = 1.54 \text{ \AA}$  انجام گرفت. از میکروسکوپ الکترونی روبشی TESCAN مدل VEGA مجهز به تجهیز EDS برای بررسی ریز ساختار پوشش و همچنین برای آنالیز نقطه‌ای پوشش استفاده شد. تخلخل پوشش با استفاده از تصاویر SEM و نرم افزار آنالیز تصویری اندازه‌گیری شد. ضخامت پوشش ایجاد شده با استفاده از دستگاه ضخامت سنج Elcometer 456 اندازه‌گیری شد. زبری سطح پوشش قبل و بعد از عملیات سنگ‌زنی با استفاده از دستگاه زبری سنج Hobson Taylor مدل Surtronic25 اندازه‌گیری شد. میکروسختی پوشش نیز با استفاده از دستگاه Zwick 3212 و تحت بار ۱۰۰ گرم اندازه‌گیری شد. جهت بررسی استحکام چسبندگی پوشش به زیرلایه نیز از آزمون چسبندگی مطابق با استاندارد ASTM-C633 استفاده شد.

### نتایج و بحث

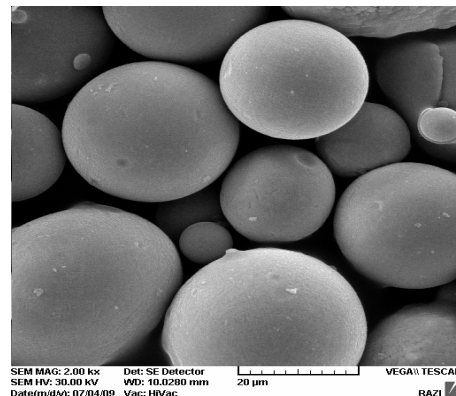
ضخامت پوشش با دو روش میکروسکوپ الکترونی روبشی و استفاده از دستگاه ضخامت سنج Elcometer 456 در امتداد سطح مقطع نمونه اندازه‌گیری شد. ضخامت اندازه‌گیری شده در حدود ۵۰۰ میکرون بود.

تخلخل پوشش‌های پاشش حرارتی نقش به سزایی در مقاومت به خوردگی آنها بازی می‌کند. پوشش‌های متراکم محافظت به خوردگی بهتری نسبت به پوشش‌های متخلخل دارند. تخلخل پوشش ایجاد شده با استفاده از بررسی تصاویر SEM پوشش بوسیله نرم افزار آنالیز تصویری محاسبه شد.

همچنین از پودر استلایت ۶ تولیدی شرکت Deloro stellite با شماره پودر Jet-Kote 576 و ترکیب ذکر شده در جدول ۲ به عنوان ماده پوشش استفاده شد. اندازه ذرات پودر در محدوده ۱۵ تا ۴۵ میکرومتر (مش ۳۲۵) بود. شکل ۱ تصویر SEM ذرات پودر را نشان می‌دهد. این تصویر نشان می‌دهد که مورفولوژی ذرات پودر کاملاً کروی بوده و جهت انجام فرایند پاشش مناسب می‌باشند.

جدول ۲. ترکیب شیمیایی پودر استلایت ۶ مصرفی (درصد وزنی)

Cr	Si	C	W	Fe	Ni	Mn	Mo	Co
28.6	1.1	1.3	4.9	1.9	2.2	0.3	<0.1	Bal



شکل ۱. تصویر میکروسکوپ الکترونی ذرات پودر استلایت ۶

### ایجاد پوشش

پودر استلایت ۶ با استفاده از دستگاه HVOF ساخت شرکت Metallization مدل Met-Jet III بر روی سطح زیر لایه پاشیده شده و پوشش مورد نظر ایجاد گردید. در این دستگاه از سوخت مایع کروسن استفاده می‌شود. بعد از انجام عملیات پاشش، پوشش ایجاد شده در هوا سرد شد. پارامترهای مورد استفاده جهت فرایند پوشش‌دهی در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳. پارامترهای مورد استفاده در پوشش HVOF

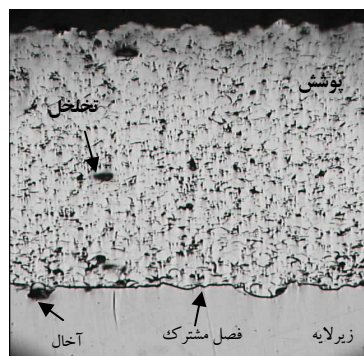
پارامتر	نرخ تغذیه اکسیژن (lit/min)	نرخ تغذیه سوخت (milt/min)	فاصله پاشش (Cm)	نرخ گاز حامل (lit/min)	فشار اکسیژن (bar)
مقدار	۸۳۰	۲۷۵	۳۰	۴	۲۰

شکل ۳ تصویر SEM پوشش را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشخص است پوشش دارای تخلخل، ذرات ذوب نشده و نیمه ذوب شده و آخال‌های اکسیدی است. مناطقی نظیر آنچه که با فلش در شکل ۳ الف مشخص شده است مناطقی هستند که توسط ذرات به طور کامل ذوب شده ایجاد شده‌اند. آنالیز EDS این مناطق ترکیب شیمیایی پوشش را نشان می‌دهد. هیچ گونه ذره اکسیدی که بیانگر اکسید شدن ذرات پودر در حین پاشش بوده در پوشش مشاهده نشد و این امر نشان می‌دهد که شرایط پاشش پودر شرایط کاملاً مناسبی بوده است. همچنین ذرات ذوب نشده و نیمه ذوب شده نیز در پوشش مشاهده می‌شود. تخلخل موجود در پوشش نیز به صورت نقاط سیاه رنگ در پوشش مشخص است. آنالیز EDAX نقاط سیاه موجود در فصل مشترک پوشش/ زیرلایه نشان داد که این مناطق آخال‌های اکسیدی، اکسید آلومینیم و کاربید سیلیسیم است. ذرات اکسید آلومینیم ممکن است در حین پولیش کردن و ذرات کاربید سیلیسیم ممکن است هنگام سند بلاست کردن زیرلایه و عدم دقت در تمیزکاری سطح زیر لایه بعد از آن، در پوشش و زیر لایه وارد شده باشند.

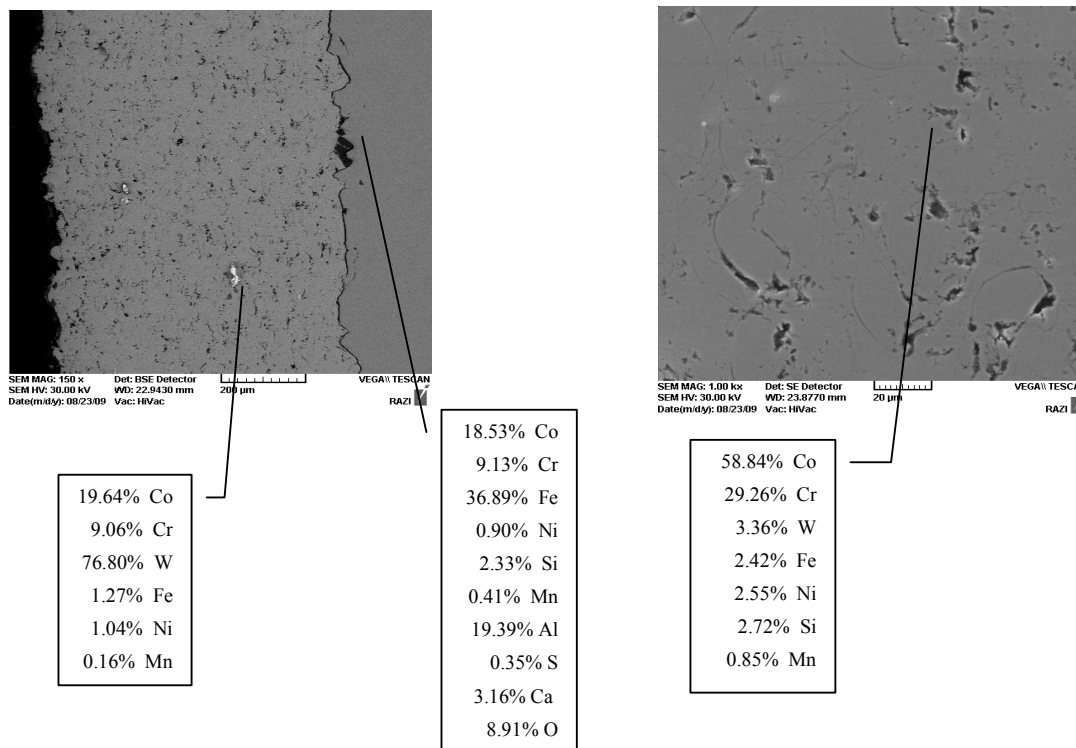
سختی در اکثر مواقع خواص مکانیکی پوشش‌ها را نمایان می‌سازد. در شکل ۴ تغییرات سختی در امتداد سطح مقطع پوشش و زیر لایه نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که ریز سختی زیر لایه در حدود ۲۰۰ ویکرز بوده در حالی که ریز سختی پوشش در محدوده ۶۵۰ تا ۷۰۰ ویکرز است. این سختی بالاتر پوشش نسبت به زیر لایه به دلیل ماهیت آلیاژ استلایت ۶ می‌باشد [۱۸]. همچنین زیرلایه در نزدیکی فصل مشترک پوشش/ زیرلایه مقادیر سختی بالاتری نسبت به دیگر مناطق از خود نشان می‌دهد. دلیل این امر می‌تواند بواسطه کارسختی به علت انجام عملیات سند بلاست، قبل از انجام عملیات پاشش باشد [۱۵]. این کارسختی همچنین می‌تواند به دلیل سرعت بالای اصابت ذرات پودر در خلال انجام فرایند HVOF اتفاق بیفتد [۱۲ و ۱۶ و ۱۷]. نکته قابل توجه دیگر در این شکل شیب شدید تغییرات سختی از پوشش به سمت زیر لایه است که این اختلاف سختی در اغلب نمونه‌های

متوسط تخلخل اندازه گیری شده پوشش مورد نظر در حدود ۲٪ بود. از آنجا که در فرآیند HVOF ذرات پودر با سرعت بسیار زیاد از داخل نازل تفنگ به سمت زیر لایه پرتاب می‌شوند و به واسطه این سرعت زیاد و شدت اصابت این ذرات به زیر لایه، پوشش‌های پاشش حرارتی HVOF را در مقایسه با دیگر فرایندهای پاشش حرارتی دارای ساختار متراکم‌تری نموده و تخلخل پایینی دارند. زبری سطح پوشش قبل از عملیات سنگ‌زنی در حدود ۶/۶ میکرومتر ( $Ra=6.6 \mu m$ ) و پس از آن در حدود ۰/۴ میکرومتر ( $Ra=0.04 \mu m$ ) بود.

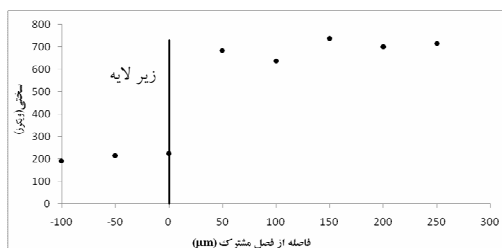
سطح مقطع پوشش‌های رسوب کرده بر روی زیر لایه با استفاده از میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفت. مشاهدات متالوگرافی در شکل ۲ نشان می‌دهد که پوشش دارای ساختار لایه‌ای بوده که این امر به واسطه رسوب و انجماد ذرات پودر مذاب و نیمه مذاب رخ می‌دهد. در این ساختار لایه‌ای ذرات کاملاً ذوب شده، ذرات ذوب نشده و نیمه ذوب شده، تخلخل و آخال مشاهده می‌شود. ذرات ذوب نشده در پوشش توسط اندازه آنها و همچنین مورفولوژی آنها که تقریباً کروی است شناسایی می‌شوند. ذرات ذوب و منجمد شده دارای ظاهر مشخصی نبوده درحالی که ذرات ذوب نشده دارای ساختار دندرتی می‌باشند [۱۲]. برخی از نقاط سیاه در پوشش و همچنین فصل مشترک پوشش/ زیرلایه آخال و ذرات اکسیدی بوده که توسط آنالیز EDAX شناسایی می‌شوند.



شکل ۲. تصویر میکروسکوپ نوری از سطح مقطع پوشش استلایت ۶



شکل ۳. تصویر میکروسکوپ نوری از سطح مقطع پوشش استلایت ۶

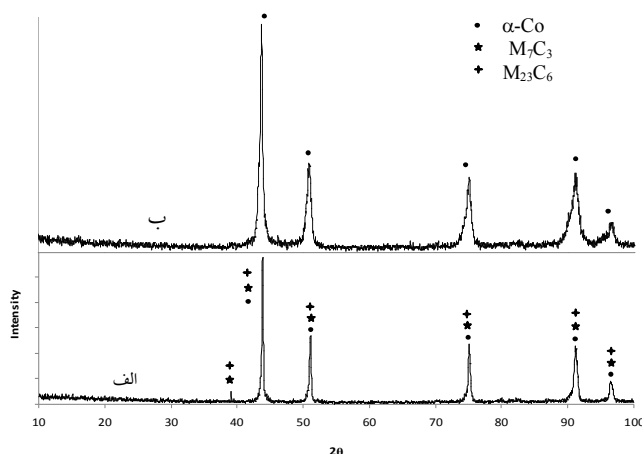


شکل ۴. پروفیل ریزسختی پوشش استلایت ۶ ایجاد شده به روش HVOF

توجه کرد این است که پیک‌های حاصله مربوط به پوشش پهن‌تر شده‌اند. پهن‌تر شدن این پیک‌ها می‌تواند به دلیل حضور تنش‌های پسماند و همچنین ریز دانه‌تر شدن ساختار پوشش‌ها به دلیل شرایط سرد شدن پوشش‌ها باشد. به دلیل اختلاف دما بین ذرات پرتابی و زیر لایه معمولاً پوشش‌های ایجاد شده به سرعت سرد می‌شوند. پیک مجزای مربوط به تشکیل کاربیدها که در پودر اصلی در زاویه در حدود ۳۹ درجه مشاهده می‌شود، در الگوی مربوط به پوشش مشاهده نمی‌گردد. این امر نیز مربوط به شرایط سرد شدن پوشش ایجاد شده می‌باشد. زیرا برای شکل‌گیری کاربیدها، پوشش

پاشش حرارتی مشاهده می‌شود و این امر ناشی از اختلاف شدید ترکیب پوشش و زیر لایه و عدم امتزاج ماده پوشش و زیر لایه در فصل مشترک است. همانطور که از پروفیل نشان داده شده در شکل ۴ مشهود است، ریزسختی در امتداد سطح مقطع پوشش با فاصله از فصل مشترک پوشش / زیر لایه متغیر است. این غیر یکنواختی در سختی پوشش دلیلی بر تغییر ریزساختار در امتداد سطح مقطع پوشش است. این تغییرات ریزساختاری به دلیل حضور تخلخل، ذرات ذوب نشده، ذرات نیمه ذوب شده و همچنین ذرات ذوب شده در ساختار می‌باشد که این موارد با استفاده از SEM و میکروسکوپ نوری قابل مشاهده هستند [۱۲ و ۱۳ و ۱۵].

الگوهای تفرق اشعه ایکس پودر استلایت ۶ و پوشش ایجاد شده در شکل ۵ نشان داده شده است. با مقایسه این الگوها می‌توان نتیجه گرفت که پوشش استلایت ۶ ایجاد شده نیز همانند پودر اولیه دارای فاز کبالت با ساختار FCC به عنوان فاز اصلی است و تغییر محسوسی در حین فرآیند پاشش در پودر ایجاد نشده است. نکته مورد توجه بعدی که باید به آن



شکل ۵. الگوی پراش اشعه ایکس (الف) پودر استلایت ۶ (ب) پوشش استلایت ۶

- ۳- ریزساختار پوشش دارای زمینه فلزی غنی از کبالت با شبکه کریستالی مکعبی با وجوه مرکزدار است و هیچ گونه ذره اکسیدی در ریزساختار پوشش مشاهده نمی‌شود.
- ۴- آنالیز EDS پوشش نشان می‌دهد که پوشش ایجاد شده از نظر ترکیب شیمیایی دارای ترکیب شیمیایی مناسبی است.
- ۵- استحکام چسبندگی پوشش به زیرلایه در حدود ۶۷ مگاپاسکال بوده که استحکام نسبتاً مناسبی است.

#### تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند از مدیریت شرکت پودرافشان و شرکت پرسایش برای همکاری در پیشبرد اهداف این تحقیق تشکر و قدردانی نمایند.

#### منابع

1. T. Sidhu, S. Prakash, R. Agrawal, *Hot corrosion and performance of nickel-based coatings*, Surface and Coating Technology, 201(2005)1602-1612.
2. L. Zaho, *Wear behavior of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dispersion strengthened MCrAlY coating*, Surface and Coating Technology, 184(2004)298-306.
3. K. Bharat, *Development of low oxide MCrAlY coating for gas turbine application*, Thermal Spray Technology, 16(2007)275-283.
4. T. Sidhu, S. Prakash, *A comparative study of hot corrosion resistance of HVOF sprayed NiCrBSi and Stellite6 coated Ni based superalloy at 900°C*, Materials Science and Engineering, 445(2007)210-218.

ایجاد شده باید به اندازه کافی آهسته سرد شود تا کاربیدها فرصت شکل گرفتن داشته باشند، لذا احتمال می‌رود میزان کاربیدها بعد از فرآیند پاشش کاهش یافته و بنابراین پیک اصلی مربوط به آن حذف گردیده است. مطالعه الگوی XRD حضور هیچ فاز دیگری نظیر فازهای اکسیدی CoNiO<sub>2</sub> را که توسط افراد دیگری [۱۹] مشاهده شده است را تأیید نمی‌کند. دلیل این امر آن است که در دستگاه‌هایی که از سوخت مایع استفاده می‌شود، همانند دستگاه‌های گاز سوز جریان هوای اضافی وجود نداشته، لذا شرایط جهت اکسید شدن عناصر فراهم نمی‌باشد. استحکام چسبندگی پوشش به زیرلایه در حدود ۶۷ مگاپاسکال است که استحکام چسبندگی مناسبی می‌باشد. بالا بودن استحکام چسبندگی پوشش به زیرلایه در پوشش‌های HVOF به بالا بودن نیروی برخورد ذرات به سطح زیرلایه نسبت داده می‌شود.

#### نتیجه‌گیری

- ۱- تحت شرایط پاشش انتخاب شده، پوشش استلایت ۶ به طور موفقیت‌آمیزی توسط فرآیند HVOF با استفاده از سوخت مایع ایجاد شد. ضخامت پوشش ایجاد شده در حدود ۵۰۰ میکرومتر بوده و میزان تخلخل پوشش نیز در حدود ۲٪ بود.
- ۲- سختی پوشش در حدود ۷۰۰ ویکرز بوده که این میزان سختی بسیار بالاتر از سختی زیرلایه است. سختی پوشش با فاصله از فصل مشترک تغییر می‌کند و دلیل این امر تغییرات ریزساختاری در امتداد سطح مقطع پوشش است.

5. T. Sidhu, S. Prakash, *Hot corrosion studies of HVOF NiCrBSi and Stellite6 coating on a Ni based superalloy in an actual industrial environment of a coal fired boiler*, Surface Coating and Technology, 201(2006)1602-1612.
6. S. Singh, S. Prakash, *On the high temperature oxidation protection behavior of plasma sprayed Stellite6 coatings*, Metallurgical and Materials Transactions, 37A(2006)3047-3056.
7. M. Stanford, V. Jain, *Friction and wear characteristics of hard coatings*, Wear, 251(2001)990-996.
8. X. Bin-shi, J. Gou, *Microstructure and wear resistance of electro thermal explosion sprayed Stellite coating used for remanufacturing*, Hi-tech Research and Development of China, 12(2005)207-215.
9. M. Yao, J. Wu, Y. Xie, *Wear, corrosion and cracking resistance of some W-or Mo-containing stellite hardfacing alloys*, Materials Science and Engineering, 407(2005)234-244.
10. J. Aoh, Y. Jeng, E. Chu, L. Wu, *On the wear behavior of surface clad layers under high temperature*, Wear, 225(1999)1114-1122.
11. S. Chang, H. Wu, C. Chen, *Impact wear resistance of Stellite6 hardfacing Valve Seats with laser pcladding*, Materials and Manufacturing processes, 23(2008)708-713.
12. T. Sidhu, S. Prakash, *Erosion-corrosion of plasma as sprayed and laser remelted Stellite-6 coatings in a coal fired boiler*, Surface and Coatings Technology, 198(2005)441-449.
13. H. Staia, T. Valente, C. Bartuli, D. Lewis, C. Constable, *Characterization of Cr3C2-25% NiCr reactive plasma sprayed coatings produced at different pressures*, Surface and Coatings Technology, 146(2001)553 -560.
14. N. Ak, C. Tekmen, I. Ozdemir, H. Soykan, E. Celik, *NiCr coatings on stainless steel by HVOF technique*, Surface and Coatings Technology, 173(2003)1070-1079.
15. T. sundararajan, S. kuroda, F. Abe, *Effect of thermal cycling on the adhesive strength of Ni-Cr coatings*, Material Transaction, 45(2004)1299-1305.
16. V. H. Hidalgo, J.B. Varela, J.M. Calle, A.C. Menendez, *Characterization of NiCr flame and plasma sprayed coatings for use in high temperature regions of boilers*, Surface Engineering, 16(2000)137-142.
17. T. Sidhu, S. Prakash, *Studies of plasma spray coatings on a Fe-base superalloy, their structure and high temperature oxidation behavior*, Surface and Coating Technology, 166(2003)89-97.
18. H. Hawthorne, B. Arsenault, J. Immarigeon, J. Legoux, *Comparison of slurry and dry erosion behavior of some HVOF thermal sprayed coatings*, Wear, 225(1999)825-833.
19. A. Dent, A. Horlock, S. McCartney, J. Harris, *Microstructural characterisation of a Ni-Cr-B-C based alloy coating produced by high velocity oxy-fuel thermal spraying*, Surface and Coating Technology, 139(2001)244-251.