

ساختار و خواص مکانیکی پوشش NiCrBSi-WC(Co) اعمالی به روش پاشش

شعله‌ای پرسرعت (HVOF)

محمد حسن ندیم، کوروش شیروانی

پژوهشکده مواد پیشرفته و انرژی‌های نو، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران

سیدمهران نحوی

دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت مقاله: ۹۶/۰۶/۲۷- پذیرش مقاله: ۹۷/۱۱/۱۵)

چکیده

در این مقاله نتایج حاصل از بررسی اثر تغییر فاصله پاشش در روش پاشش شعله‌ای پرسرعت (HVOF) در اعمال پوشش‌های سرمت NiCrBSi-WC(Co) بر تغییرات ریزساختاری حاصل و نیز بر تغییرات خواص مکانیکی پوشش (شامل استحکام چسبندگی، سختی و مقاومت سایش) مورد بحث قرار گرفته است. برای ساخت نمونه‌های زیرلایه از ورق فولاد زنگ نزن SS304 استفاده شد. در محدود ۲۰۰-۳۰۰ میلیمتر فاصله پاشش بررسی شده، با افزایش فاصله پاشش، ریزساختار لایه‌ای مناسب‌تر و همگن‌تر، با مقدار تخلخل و ذرات ذوب نشده کمتر، و توزیع بهتر ذرات کاربیدی در ساختار پوشش، حاصل شد. پوشش اعمال شده از فاصله پاشش ۳۰۰ میلیمتر که مناسب‌ترین ساختار را داشت، بیشترین استحکام چسبندگی به زیرلایه، بیشترین سختی، البته با حفظ چقرمگی در پوشش، و کمترین نرخ سایش را نشان داد.

واژه‌های کلیدی: پوشش اسپری حرارتی، HVOF، NiCrBSi، کاربرد تنگستن، ریزساختار، سختی، سایش.

Microstructure and Mechanical Properties of HVOF-Sprayed NiCrBSi-WC(Co) Coatings

Mohammad Hassan Nadim, Kourosh Shirvani

Advanced Materials Department Iranian Research Organization of Science and Technology (IROST)

Sayed Mehran Nahvi

Department of Materials Engineering, Isfahan University of Technology

(Received 18 September 2018, accepted 5 January 2019)

Abstract

In this paper, the effect of changing the spray distance in the high-velocity oxy-fuel (HVOF) spray method to apply NiCrBSi-WC(Co) coatings on the resulting microstructural changes and also on the mechanical properties of the coating (including adhesion strength, hardness and wear resistance) are discussed. The SS304 stainless steel sheet was used to make substrates. In the range of 200-300 mm, where the spraying distance was changed, with increasing spray distances, more suitable and homogeneous layered microstructure, having less porosity and less melted particles, as well as a better distribution of carbide particles in the coating structure, was obtained. The NiCrBSi-WC(Co) coating applied by HVOF gun at a distance of 300 mm indicated the most suitable structure meanwhile the highest adhesion strength to the substrate, the highest hardness, and the lowest wear rate.

Keywords: Thermal spray coating, HVOF, NiCrBSi, tungsten carbide, microstructure, hardness, wear.

E-mail of Corresponding author: mhnadim.iut@gmail.com.

مقدمه

آلیاژ NiCrBSi متشکل از محلول جامد NiCr غنی از نیکل حاوی مقدار کمی یوتکتیک Ni-Ni₃B است. طی اسپری حرارتی، این آلیاژ وقتی از دمای بالا شروع به انجماد می‌کند، شرایط برای تشکیل انواع بورایدها، کاربیدها و سیلیساید در ساختار پوشش حاصل فراهم می‌شود [۱-۳]. چنانچه، آلیاژ NiCrBSi با یک ترکیب کاربیدی اصلاح شود، به انتخاب مناسبی برای اعمال روی قطعات فولادی مورد استفاده در شرایط سرویس در حضور همزمان سایش و خوردگی دمای بالا، تبدیل می‌شود. پوشش‌های با ترکیب NiCrBSi-WC(Co) [۴] و NiCrBSi-SiC [۵] نمونه‌هایی از ترکیب اصلاح شده مذکور هستند.

اثر کروم در ترکیب NiCrBSi-WC(Co) بهبود مقاومت خوردگی دما- بالا از طریق تشکیل فیلم محافظ Cr₂O₃ روی سطح و افزایش سختی در نتیجه فعال سازی مکانیزم رسوب سختی است. از طرفی، نتیجه حضور بور و سیلیسیم در ترکیب کاهش نقطه ذوب آلیاژ و ایجاد خاصیت خودگردازی است که در اعمال پوشش به روش‌های پاشش حرارتی مثل HVOF یک مزیت محسوب می‌شود [۶]. اما، نقش اصلی افزایش مقاومت سایش را جزء کاربیدی ترکیب پوشش ایفا می‌کند. بر همین اساس، خواص تریبولوژیکی پوشش‌های NiCrBSi اصلاح شده با کاربرد به مقدار قابل ملاحظه‌ای تحت تأثیر کسر جزء کاربیدی در ترکیب پوشش است [۷-۹]. در کاربرد غلطک‌های نورد ورق، به شرط استفاده از مقدار کافی جزء کاربیدی در ترکیب پودر پوشش، عملکرد پوشش اعمال شده روی سطح غلطک‌ها به روش اسپری حرارتی رضایت بخش گزارش شده است [۶]. خوشبختانه، ترشوندگی مناسب بین ذرات کاربید و آلیاژ پایه، امکان اضافه کردن نسبت قابل توجه پودر WC به پودر NiCrBSi با هدف بهینه سازی سختی پوشش / یا مقاومت سایشی را فراهم می‌سازد [۳].

پارامترهای تأثیرگذار بر کیفیت و خواص پوشش‌های NiCrBSi اصلاح شده اسپری حرارتی شده عبارتند از: توزیع WC(Co) در زمینه NiCrBSi، مقدار و توزیع فازهای دوم در پوشش، درصد حجمی تخلخل و ذرات ذوب نشده و میزان چسبندگی پوشش به زیرلایه [۵،۳]. روش پوشش دهی HVOF قادر به ایجاد پوشش‌های NiCrBSi اصلاح شده با تخلخل کمتر از ۲ درصد حجمی و با چسبندگی مناسب به زیرلایه است [۱۰]. Sosa و همکاران [۱۱] تأثیر تغییر فاصله پاشش در روش HVOF را بر ریزساختار و خواص مکانیکی پوشش NiCrBSi مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج آن‌ها مشخص کرد که با افزایش فاصله اسپری، کسر حجمی ذرات ذوب نشده افزایش یافته و میکروترک‌هایی حاصل می‌شود که به کاهش مدول الاستیک پوشش می‌انجامد.

در این مقاله تأثیر تغییر فاصله پاشش در روش پاشش شعله‌ای پرسرعت (HVOF) بر تغییرات ریزساختاری پوشش‌های سرمت NiCrBSi-WC(Co) اعمال شده روی فولاد زنگ نزن SS304 و نیز بر تغییرات خواص مکانیکی پوشش (شامل استحکام چسبندگی، سختی و مقاومت سایش) بحث شده است.

مواد و روش آزمایش‌ها

ترکیب شیمیایی پودرهای NiCrBSi و WC(Co) تهیه شده از شرکت GTV که برای اعمال پوشش در این تحقیق استفاده گردید، در جدول ۱ ارائه شده است. ترکیب ۵۰-۵۰ درصد وزنی از دو پودر مذکور بعنوان پودر پوشش دهی مخلوط گردید.

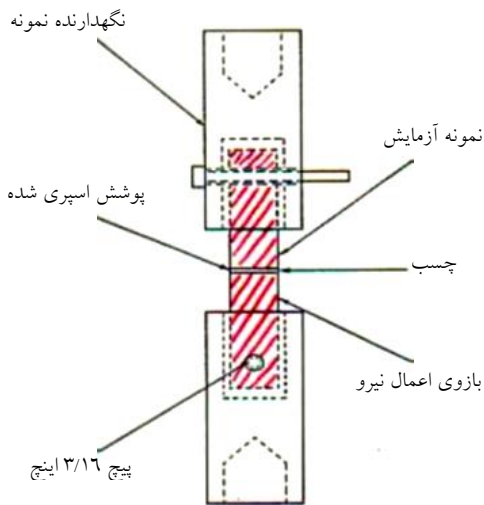
جدول ۱. ترکیب شیمیایی (درصد وزنی) پودرهای پوشش‌دهی

Co	WC	Si	B	Cr	Ni	Fe	نوع پودر
--	---	۴٫۳	۳٫۲	۱۴٫۶	۷۴٫۲	۳٫۷	NiCrBSi
۱۲	۸۸	---	---	---	---	---	WC(Co)

زیرلایه‌ها برای اعمال پوشش به شکل کوپن‌های با ابعاد ۱×۲ سانتیمتر از یک ورق فولاد زنگ نزن استنتیتی 304 به

آزمایش چسبندگی نشان داده شده است. برای آزمون کشش از دستگاه کشش مدل STM-30 شرکت سنتام استفاده شد.

بمنظور اندازه‌گیری سختی پوشش از سختی سنجی ویکرز با اعمال نیروی ۳۰۰ گرم حین آزمون سختی استفاده شده است. عدد سختی گزارش شده میانگین حسابی تعداد حداقل پنج مورد سختی سنجی برای هر نمونه است.



شکل ۱. طرح شماتیک نحوه قرارگیری نمونه با پوشش اسپری شده در محل نمونه گیر دستگاه کشش استفاده شده برای آزمایش استحکام چسبندگی

برای شناسایی رفتار سایش پوشش‌ها از دستگاه آزمون سایش پین-روی-دیسک مطابق با استاندارد ASTM G99 استفاده شد. در این آزمون از پین فولادی با جنس AISI 52100 دارای سختی در محدوده ۶۶-۶۲ راکول C، استفاده شد. پس از طی مسافت سایش مشخص پین روی پوشش، نمونه‌ها بطور کامل شسته و خشک شد تا هرگونه محصولات سایش برطرف شود و سپس توزین نمونه‌ها توسط یک ترازوی دیجیتال با دقت ± 0.0001 گرم انجام شد. شرایط آزمون‌های سایش انجام شده در جدول ۳ ارائه شده است.

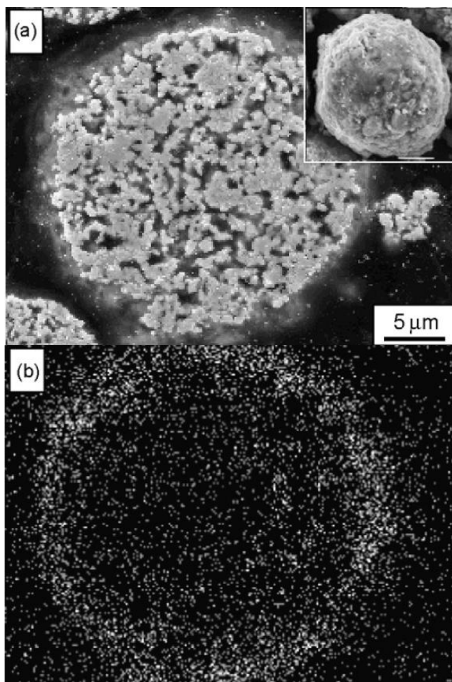
ضخامت 0.3 سانتیمتر تهیه شدند. قبل از اعمال پاشش، سطح نمونه‌ها با استفاده از پودر کاربید سیلیسیم مش 80 بلاست و زبر گردید. در ادامه، نمونه‌ها در محلول نسبت برابر از متانول و استون، تمیزشویی و چربی زدایی شدند. از میان فرآیندهای مختلف پاشش حرارتی، روش پاشش با تفنگ HVOF که قابلیت اعمال پوشش با درصدهای تخلخل و ذرات ذوب نشده زیر 2 درصد را دارد، برای اعمال پوشش‌های با کیفیت مطلوب در این تحقیق استفاده شد. HVOF مورد استفاده مدل MET JET 4PL ساخت شرکت Metallization با سوخت مایع بود که بالاترین سرعت جریان پاشش پودر در هنگام برخورد با سطح زیرلایه را فراهم می‌کند. جدول ۲ نشان دهنده پارامترهای پاشش پودر با HVOF فوق است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در شرایط یکسان پاشش، تغییر فاصله پاشش تا سطح نمونه (200 ، 250 و 300 میلیمتر) مورد بررسی قرار گرفته است. سایر پارامترها طبق پیشنهادات سازنده پودرها برای دستیابی به پوشش‌های در دامنه ضخامت 250 تا 500 میکرون، انتخاب شده است.

جدول ۲. پارامترهای پوشش‌دهی با دستگاه HVOF

دبی اکسیژن ورودی (L/min)			۸۳۳
دبی سوخت ورودی (mL/min)			۲۵۰
فاصله پاشش (mm)			۳۰۰
۲۰۰	۲۵۰	۳۰۰	

در مرحله متالوگرافی با میکروسکوپ‌های نوری (OM) و الکترونی (SEM) بررسی میزان تخلخل پوشش، سلامت ناحیه فصل مشترک پوشش و زیرلایه، اندازه‌گیری ضخامت پوشش و توزیع ذرات کاربیدی در مقطع پوشش مورد توجه قرار گرفته است.

آزمون کنترل کیفی چسبندگی پوشش‌های اسپری شده به زیرلایه مطابق با استاندارد ASTM C633 (نحوه انجام تست چسبندگی پوشش‌های اسپری حرارتی) انجام شده است. در شکل ۱ شماتیک نمونه پوشش نصب شده در محل نمونه گیر دستگاه کشش استفاده شده برای



شکل ۲. الف) تصویر SEM پودر WC(Co) و ب) نقشه توزیع عنصر WC(Co) در پودر WC(Co)

با افزایش فاصله پاشش به ۲۵۰ میلیمتر درصد ذرات ذوب نشده و همچنین اندازه تخلخلها کاهش می‌یابد (شکل ۳ ب). در مقایسه با پوشش اول فاصله پاشش ۵۰ میلیمتر افزایش یافته در حالی که ذرات ذوب نشده بیش از ۷۰ درصد کاهش یافته است. کاهش شدید تخلخل و حضور ذرات اکسیدی در این پوشش نتیجه سیلان بهتر مذاب پاشش شده، است.

در سطح مقطع پوشش نشان داده شده در شکل ۳-پ که نتیجه پاشش از فاصله ۳۰۰ میلیمتری سطح نمونه است ساختار لایه‌ای با دو نوع فاز لایه‌ای مختلف دیده می‌شود. نوع اول، لایه‌های WC(Co) با ساختار گوشه دار است. نوع دوم، لایه NiCrBSi است که بعنوان ترکیب زمینه بحساب می‌آید. همان‌طور که بیان شده است زمینه فاز محلول جامد کروم در نیکل محتوی فازهای بورایدی، سیلیسایدی و کربورایدی است [۲]. عدم حضور ذرات ذوب نشده و تخلخلها در لایه‌های این پوشش نشان دهنده ذوب و سیلان کافی پودرها در مسافت پاشش و هنگام برخورد با سطح نمونه است.

جدول ۳. شرایط آزمون سایش

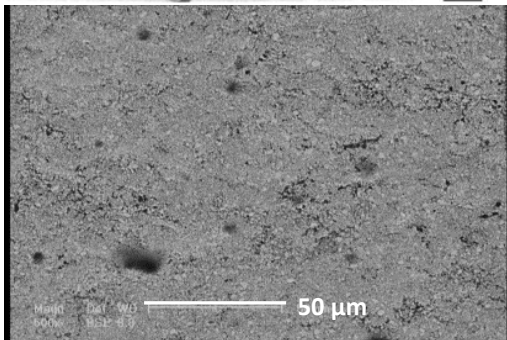
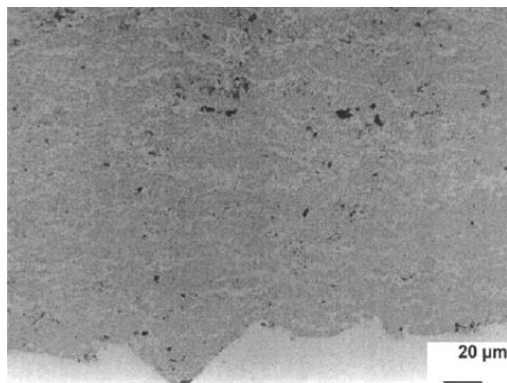
مسافت (m)	نیرو (N)	سرعت (m/min)	نوع
۱۰۰۰	۷۰	۱۵	تست سایش دمای محیط
۳۰۰۰	۷۰	۱۵	تست سایش دمای محیط مسافت طولانی
۱۵۰۰	از ۵ تا ۱۱۰	۱۵	تست سایش بارپذیری

نتایج و بحث

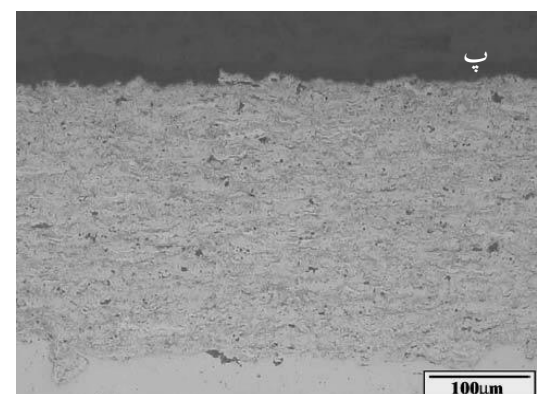
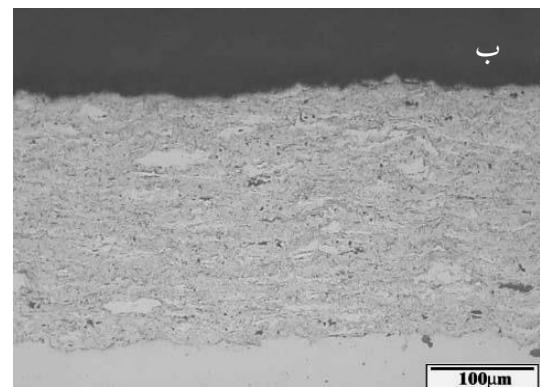
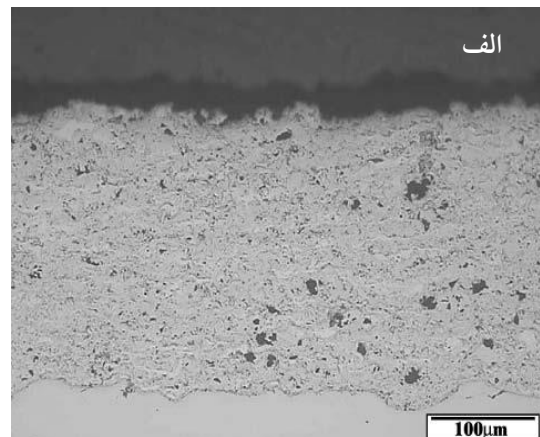
تصویر SEM و نقشه اشعه-x از پودر WC(Co) مورد استفاده در این پژوهش در شکل ۲ نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود پودر استفاده شده دارای مورفولوژی کروی و مناسب برای تزریق مناسب به محفظه احتراق است. از طرفی، توزیع عنصر کبالت در ذره پودر (شکل ۲-ب) نشان‌دهنده تمرکز کبالت در نواحی سطحی ذره است. تمرکز کبالت در پوسته هر ذره کاربرد تنگستن از حرارت دیدن بیش از اندازه کاربرد تنگستن در حین پاشش جلوگیری کرده و باعث حفظ خواص مطلوب آن خواهد شد [۱۲].

تصاویر OM از سطح مقطع پوشش‌های ایجاد شده در سه فاصله پاشش مختلف در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۳-الف دیده می‌شود حضور درصد بالایی از ذرات ذوب نشده در پوشش اعمال شده در فاصله پاشش ۲۰۰ میلیمتر، شاخص است. متناظراً درصد تخلخل‌های بین ذرات ذوب نشده نیز قابل توجه است. همان‌طور که بیان شده است فاصله نسبتاً کم پاشش و در نتیجه زمان کوتاه حضور ذرات در شعله، باعث می‌شود برخی از ذرات پودر بطور کامل ذوب نشود که نتیجه آن ایجاد مقدار قابل توجهی از این ذرات در پوشش خواهد بود [۱۳].

چسبندگی در شکل ۵ ارایه شده است. پوشش با فاصله پاشش ۲۰۰ میلی‌متر کمترین استحکام چسبندگی را نشان داد، حتی در مواردی در مقطع پوشش جدایش بوجود آمد که نشان دهنده استحکام چسبندگی ضعیف درون لایه‌ای پوشش است. این نتایج ارتباط خوبی با ریزساختار پوشش‌ها (حضور ذرات ذوب نشده و تخلخل) در فواصل مختلف پاشش داشت، بنحوی که مقدار بسیار ناچیز (نزدیک به صفر) تخلخل و عدم حضور ذرات اکسیدی و ذوب نشده مشخصه مهم پوشش با فاصله پاشش ۳۰۰ میلی‌متر بود که بیشترین سطح استحکام چسبندگی به زیرلایه را نیز نشان داد.



شکل ۴. الف) فصل مشترک پوشش NiCrBSi-WC(Co) با فاصله پاشش ۳۰۰ میلی‌متر؛ نشان دهنده اتصال مکانیکی بدون نقص برای پوشش، ب) تصویر SEM از سطح مقطع پوشش که نشان دهنده فشردگی مناسب و تخلخل ناچیز آن است.

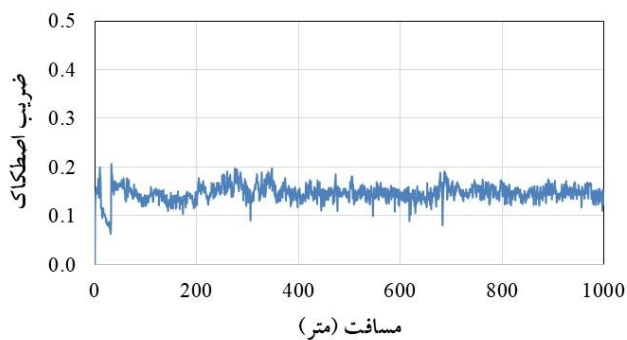


شکل ۳. تصاویر OM از سطح مقطع پوشش NiCrBSi-WC(Co) اعمال شده در فاصله پاشش الف) ۲۰۰ ب) ۲۵۰ و پ) ۳۰۰ میلی‌متر

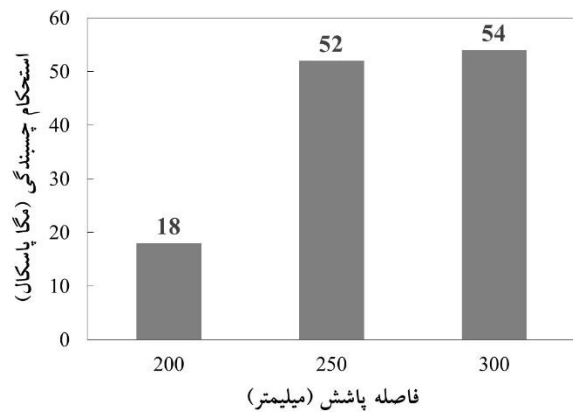
شکل ۴ تصویر سطح مقطع پوشش اعمالی در فاصله پاشش ۳۰۰ میلی‌متر با تمرکز بر ناحیه فصل مشترک پوشش / زیرلایه را نشان می‌دهد. اتصال مکانیکی خوب مشاهده شده نتیجه زبری مناسب سطح زیرلایه ایجاد شده قبل از اعمال پوشش توسط سندبلاست است. اثر اتصالات مکانیکی خوب مذکور در نتایج بدست آمده از استحکام چسبندگی پوشش بخوبی آشکار گردید. نتایج آزمون

شکل ۷ نمودار تغییرات ضریب اصطکاک بر حسب مسافت را برای پوشش با فاصله پاشش ۳۰۰ میلیمتر نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد این پوشش دارای ضریب اصطکاک پایین و تقریباً ثابت در طول مسافت سایش بوده است. متعاقب آن این پوشش رفتار سایشی مناسبی هم نشان داد که در شکل ۸ این رفتار به صورت نرخ سایش نمونه در برابر مسافت طی شده توسط پین روی سطح این پوشش را نشان می‌دهد. نرخ بسیار پایین سایش این پوشش متناظر با ضریب اصطکاک کم و ساختار مناسب و مستحکم پوشش NiCrBSi حاوی توزیع مناسب از ذرات WC(Co) است که مطابق با رفتار پوشش‌های مشابه است [۱۴، ۱۵].

در بررسی سطح پوشش بعد از آزمون سایش نیز خراش‌های موازی و با عمق ناچیز مشاهده شد که با نتایج نرخ سایش نمونه هماهنگ بود. تصویر SEM از سطح پوشش نشان دهنده خراش‌های کم عمق مذکور در شکل ۹ ملاحظه گردد. همان‌طور که دیده می‌شود سطح پوشش عاری از هرگونه ترک است که عموماً به چقرمگی مناسب پوشش نسبت داده می‌شود [۱۴].

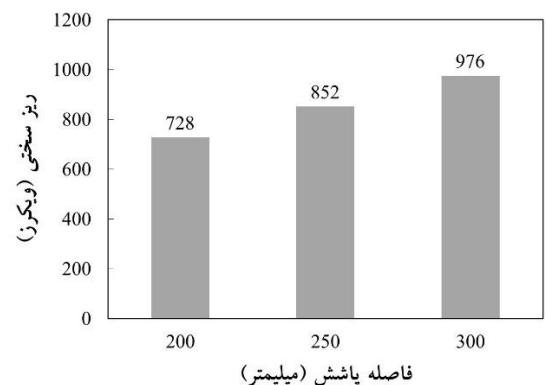


شکل ۷. نمودار تغییرات ضریب اصطکاک بر حسب مسافت سایش روی پوشش NiCrBSi-WC(Co)



شکل ۵. نتایج اندازه‌گیری استحکام چسبندگی نمونه‌های پوشش اعمال شده در فواصل پاشش مختلف

اعداد ریزسختی میانگین مربوط به پوشش‌های NiCrBSi-WC(Co) ایجاد شده در سه فاصله پاشش متفاوت در شکل ۶ نشان داده شده است. با توجه به سختی ۱۲۰۰ ویکرز پوشش WC(Co)، مشاهده می‌گردد که در نتیجه جایگزین شدن آلیاژ NiCrBSi به مقدار ۵۰ درصد وزنی با ترکیب WC(Co)، سختی پوشش سرعت حاصل در فاصله پاشش ۳۰۰ میلیمتر، با حدود ۲۵۰ واحد کاهش به عدد سختی حدود ۹۵۰ ویکرز رسیده است، که موضوع همراستا با یافته‌های قبلی است [۱۴]. مشاهده بالاترین عدد سختی برای پوشش با فاصله پاشش ۳۰۰ میلیمتر مستقیماً مرتبط با ساختار لایه‌ای مناسب و استحکام چسبندگی داخلی بهتر این پوشش در مقایسه دو پوشش دیگر است.

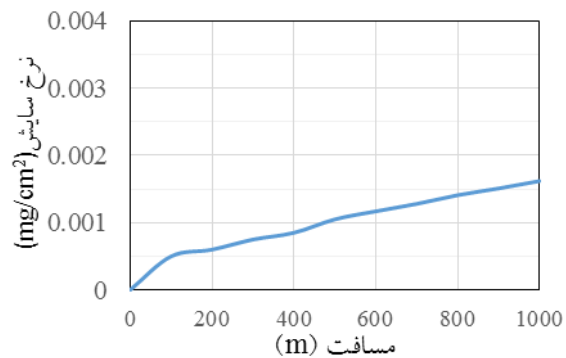


شکل ۶. ریزسختی پوشش‌های NiCrBSi-WC(Co) اسپری شده در فواصل پاشش متفاوت

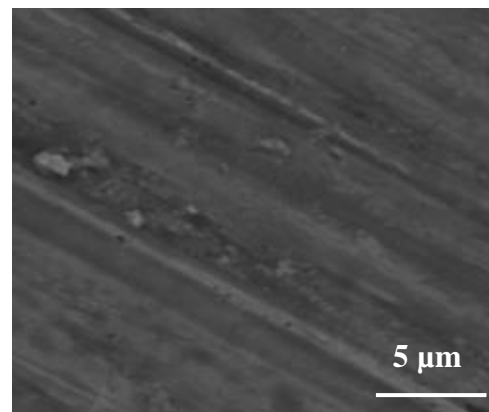
۴) ارتباط مستقیم بین افزایش سختی و بهبود مقاومت سایشی در مورد پوشش NiCrBSi-WC(Co) مشاهده گردید، بنحوی که نرخ سایش بسیار پایین همراه با عدم ترک خوردگی سطحی پوشش اعمال شده با فاصله پاشش ۳۰۰ میلیمتر، بهترین عملکرد در بین پوشش‌های مورد ارزیابی بود.

مراجع

1. R. González, M. Cadenas, R. Fernández, J.L. Cortizo and E. Rodríguez, *Wear behaviour of flame sprayed NiCrBSi coating remelted by flame or by laser*, *Wear* 262(3-4) (2007) 301-307.
2. J. M. Miguel, J. M. Guilemany, S. Vizcaino, *Tribological study of NiCrBSi coating obtained by different process*, *Tribology International* 36(3) (2003) 181-187.
3. T. Gómez-del Río, M.A. Garrido, J.E. Fernández, M. Cadenas, J. Rodríguez, *Influence of the deposition techniques on the mechanical properties and microstructure of NiCrBSi coatings*, *Journal of Materials Processing Technology* 204(1-3) (2008) 304-312.
4. M.J. Tobar, C. Álvarez, J.M. Amado, G. Rodríguez and A. Yáñez, *Morphology and characterization of laser clad composite NiCrBSi-WC coatings on stainless steel*, *Surface and Coatings Technology* 200(22-23) (2006) 6313-6317.
5. S. Buytoz, M. Ulutan, S. Islak, B. Kurt and O.N. Çelik, *Microstructural and wear characteristics of high velocity oxygen fuel (HVOF) sprayed NiCrBSi-SiC composite coating on SAE 1030 steel*, *Arabian Journal for Science and Engineering* 38 (2013) 1481-1491.
6. S. H. Yao, *Tribological behavior of NiCrBSi-WC(Co) coatings*, *Journal of Materials Research Innovations* 18 (2014) sup2: CMSE-2013.
7. C. Guo, J. Zhou, J. Chen, J. Zhao, Y. Yu, and H. Zhou, *High temperature wear resistance of laser cladding NiCrBSi and NiCrBSi/WC-Ni composite coatings*, *Wear* 270(7-8) (2011) 492-498.
8. X. Wang, M. Zhang, Z. Zou and Sh. Qu, *Microstructure and properties of laser clad TiC+NiCrBSi+rare earth composite coatings*,



شکل ۸. نرخ سایش پوشش NiCrBSi-WC(Co) در برابر مسافت سایش



شکل ۹. تصویر SEM از سطح پوشش NiCrBSi-WC(Co) پس از آزمون سایش

نتیجه گیری

- ۱) پوشش با ریزساختار لایه‌ای ایده‌آل و کمترین مقدار تخلخل، عاری از ذرات ذوب نشده و بهترین توزیع ذرات کاربیدی، در پاشش پودر پوشش دهی با فاصله ۳۰۰ میلیمتری بین سر تفنگ HVOF و سطح نمونه بدست آمد.
- ۲) همین پوشش، بالاترین مقدار استحکام چسبندگی را به زیرلایه نشان داد. بنابراین با افزایش فاصله پاشش در محدوده ۲۰۰ تا ۳۰۰ میلیمتر، استحکام چسبندگی پوشش روند افزایشی دارد.
- ۳) مشابه با استحکام چسبندگی، سختی پوشش هم با افزایش فاصله پاشش، افزایش یافت که البته همراه بود با حفظ چقرمگی پوشش.

- Surface and Coatings Technology 161(2-3) (2002) 195-199.
9. D.W. Wheeler and R.J.K. Wood, *Erosion of hard surface coatings for use in offshore gate valves*, Wear 258 (2005) 526-536.
10. J.Stokes, *The theory and application of the SULZER METCO diamond jet HVOF thermal spray process*, Sulzer METCO (2003).
11. J.G. La Barbera-Sosa, Y.Y. Santana, C. Villalobos-Gutiérrez, and M.H. Staia, *Effect of spray distance on the corrosion-fatigue behavior of a medium-carbon steel coated with a Colmonoy 88 alloy deposited by HVOF thermal spray*, Surface and Coatings Technology 205(4) (2010) 1137-1144.
12. L. Du, B. Xu, S. Dong, W. Zhang, *Sliding wear behavior of the supersonic plasma sprayed WC-Co coating in oil containing sand*, Surface and Coatings Technology 202 (2008) 3709-3714.
13. S. Buytoz, M. Ulutan, S. Islak, B. Kurt and O.N. Çelik, *Microstructural and wear Characteristics of high-velocity oxygen fuel (HVOF) sprayed NiCrBSi-SiC composite coating on SAE 1030 steel*, Arab Journal of Science and Engineering 38 (2013)1481-1491.
14. X. Luo, J. Li and G.J. Li, *Effect of NiCrBSi content on microstructural evolution, cracking susceptibility and wear behaviors of laser cladding WC/Ni-NiCrBSi composite coatings*, Journal of Alloys and Compounds 626 (2015) 102-111.