

تأثیر عملیات حرارتی بر ریزساختار و خواص مکانیکی پوشش Cr₃C₂-NiCr ایجاد شده توسط فرایند HVOF

پژمان زمانی مقدم^{۱*}، رضا قاسمی^۱، بهناز سعیدی^۱، حمید دهاقین^۲، فرهاد شهریاری^۳، محمود معماری^۴

۱- کارشناس واحد توسعه پوشش، شرکت توربو کمپرسورتک خاورمیانه، تهران، ایران

۲- مدیر واحد توسعه پوشش، شرکت توربو کمپرسورتک خاورمیانه، تهران، ایران.

۳- مشاور واحد توسعه پوشش، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران.

۴- مدیر گروه توسعه تکنولوژی ساخت، شرکت توربو کمپرسورتک خاورمیانه، تهران، ایران

*عهده دار مکاتبات: (09179684669) p.zamani@turbotec-co.com

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۷/۱۰، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۰۳)

چکیده: ایجاد ترکیب سرمته Cr₃C₂-NiCr توسط فرایند پاشش سوخت-اکسیژن سرعت بالا (HVOF) منجر به انحلال بخشی از فازهای Cr₃C₂ در آلیاژ NiCr و افت سختی و مدول الاستیک پوشش می‌شود. در این تحقیق، پودر Cr₃C₂-25wt% (Ni-20Cr) توسط فرایند HVOF روی زیرلایه‌هایی از جنس سوپر آلیاژ Hastelloy X اعمال شدند. تأثیر عملیات حرارتی بر بازیابی فاز Cr₃C₂ و بهبود سختی و مدول الاستیک پوشش مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور، بررسی ریزساختاری توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی و بررسی ترکیب فازی توسط آنالیز پراش اشعه ایکس (XRD) روی پوشش قبل و بعد از عملیات حرارتی انجام شد. آنالیز تصاویر میکروسکوپی الکترونی برگشتی نشان داد که طی عملیات حرارتی تا ۱۱ درصد فازهای کاربیدی حل شده در آلیاژ NiCr بازیابی می‌شوند. در الگوهای XRD پوشش عملیات حرارتی شده، نواحی آمورف محو شدند و پیک‌های NiCr باریک و با شدت بیشتری در الگوی فاز زمینه مشاهده شدند. همچنین سختی و مدول الاستیک پوشش پس از عملیات حرارتی به ترتیب به میزان ۱۵۶ HV_{0.3} و ۹۸ GPa افزایش یافت.

واژه‌های کلیدی:

Cr₃C₂-NiCr، عملیات حرارتی، ریزساختار، ترکیب فازی، خواص مکانیکی.

۱- مقدمه

اجزای فلزی دارند. ماکزیمم دما برای کاربرد پوشش‌های بر پایه WC، ۴۵۰°C است. در دماهای بالاتر این پوشش‌ها مناسب نیستند و به فازهای مختلف ناپایدار تجزیه می‌شوند [۱-۳]. ترکیب‌های سرمته Cr₃C₂-NiCr به طور عمده در اجزای داغ موتورهای هوایی، توربین‌های گازی و بخار و همچنین

پوشش‌های بر پایه‌ی کاربید کروم و کاربید تنگستن در ابتدا به عنوان جایگزین پوشش‌های آبکاری کروم به دلیل مسائل زیست‌محیطی (IV) Cr مطرح شدند. امروزه، در صنایع مختلف، پوشش‌های سرمته با ترکیب Cr₃C₂-NiCr و WC-Co بیشترین استفاده را برای افزایش سختی و مقاومت به فرسایش

گرفته است. در این خصوص، استفاده از پوشش‌های سخت^۴ کاربرد کروم اعمال شده با HVOF برای افزایش عمر این قطعات هدف گذاری شده است.

۲- مواد و روش تحقیق

زیرلایه‌ی مورد استفاده از جنس سوپر آلیاژ HX (Hastelloy X) بود. ترکیب اسمی آلیاژ HX در جدول ۱ آورده شده است. پودر پایه کاربرد کروم (Cr₃C₂-25%NiCr) با نام تجاری GTV80.81.1 جهت پوشش‌دهی زیرلایه‌ها تهیه شد. این پودر به روش آگلومره و زینتر تولید شده است. بازه توزیع اندازه پودر ۴۵-۱۵ میکرومتر بود. لازم به ذکر است که قبل از پوشش‌دهی، عملیات ذره‌پاشی با ذرات آلومینا مش ۲۴ جهت افزایش زبری روی سطح زیرلایه‌ها انجام شد. زبری میانگین سطح زیرلایه‌ها پس از عملیات ذره‌پاشی حدود ۸ تا ۹ میکرومتر بود. جهت تمیز کردن و چربی‌گیری، سطح زیرلایه‌ها قبل از پوشش‌دهی توسط HVOF با استون شست‌وشو شد. پوشش با ضخامت ۲۵۰-۳۰۰ میکرومتر روی زیرلایه‌ها اعمال شد [۱۳]. عملیات حرارتی در دمای ۷۲۵ درجه سانتی‌گراد به مدت یک ساعت در کوره (اتمسفر محیط) روی پوشش بهینه انجام شد.

جدول (۱): ترکیب اسمی سوپر آلیاژ X Hastelloy (درصد وزنی) بر

اساس ASME			
کروم	۲۲	منگنز	حداکثر ۱
آهن	۱۸	سیلیسیم	حداکثر ۱
مولیبدن	۹	بور	حداکثر ۰/۰۰۸
کبالت	۱/۵	نایوبوم	حداکثر ۰/۵
تنگستن	۰/۶	آلومینیوم	حداکثر ۰/۵
کربن	۰/۱	تیتانیوم	حداکثر ۰/۱۵

آماده‌سازی نمونه‌های متالوگرافی مطابق با ASTM E1920 انجام شد. از سطح مقطع نمونه‌های متالوگرافی پس از اچ شدن، تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی (FE-SEM) تهیه گردید. همچنین به منظور تعیین ترکیب شیمیایی فازهای مختلف

تجهیزات مبدل حرارتی و لوله‌های انتقال حرارت جهت افزایش مقاومت سطح در برابر فرسایش و خوردگی تا دماهای ۸۵۰°C استفاده می‌شوند [۴-۶].

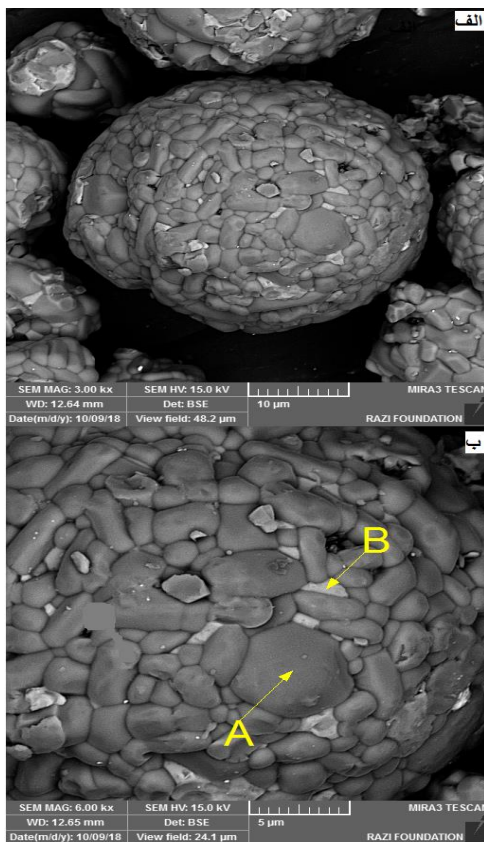
ترکیب Cr₃C₂-25(NiCr) معمولاً توسط فرایندهای پاشش حرارتی از قبیل سوخت اکسیژن سرعت بالا (HVOF)^۱ و پاشش پلاسما (APS)^۲ روی زیرلایه‌های فلزی اعمال می‌شود [۷-۹]. طی پاشش حرارتی تغییرات فازی و ریزساختاری در ترکیب‌های سرمته ناشی از قرار گرفتن ذرات در جریان گاز داغ رخ می‌دهند. تغییرات فازی پوشش (Cr₃C₂)، Cr₇C₃ و Cr₂₃C₆ نسبت به پودر اولیه (Cr₃C₂) به دلیل اکسیداسیون طی کربن‌دهی مرحله‌ای حین پاشش است. مطالعه جامع روی ریزساختار این پوشش‌ها توسط متیوس و همکاران^۳ [۵ و ۱۰] انجام شده است. آن‌ها گزارش کردند که مقدار چشمگیری از فازهای کاربرد پس از پوشش‌دهی دچار انحلال در فاز فلزی (NiCr) می‌شوند. پودر اولیه مورد استفاده در تحقیق متیوس و همکاران، حاوی ۷۵ درصد وزنی فاز کاربرد بود؛ اما میزان آن در پوشش توسط متیوس و همکاران ۳۶٪ محاسبه شده بود. انحلال بخش قابل توجهی از فاز سخت منجر به از دست رفتن خواص نهایی پوشش به خصوص سختی آن می‌شود. در عملیات حرارتی در دماها و زمان‌های متفاوت روی ریزساختار پوشش‌های Cr₃C₂-NiCr ایجاد شده به روش پاشش HVOF در تحقیقات مختلفی بررسی شده است [۱۱ و ۱۲]. متیوس و همکاران با بهینه‌سازی دما و زمان عملیات حرارتی، موفق به بازیابی چشمگیر فازهای کاربرد کروم در پوشش شده‌اند [۵]. هدف تحقیق حاضر، بررسی بازیابی فاز Cr₃C₂ توسط عملیات حرارتی و اثر آن روی ریزساختار، ترکیب فازی و خواص مکانیکی پوشش است.

ارتقاء اساسی توربین گازی تک‌شفت ۱۲۰ مگاواتی GE-Frame9 از پروژه‌های در حال اجرای شرکت توربوکمپرسور تک‌خاورمیانه (توربوتک) بوده که در آن علاوه بر افزایش راندمان، افزایش عمر قطعات داغی که در معرض سایش قرار دارند نیز به طور خاص مورد توجه قرار

ارزیابی‌های خواص مکانیکی (سختی و مدول الاستیک) مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۳-۱- بررسی‌های میکروسکوپی

تصاویر الکترون‌های برگشتی از پودر آگلومره زینتر شده‌ی کاربید کروم-نیکل کروم در شکل ۱ آورده شده‌اند. اتصال فیزیکی ذرات Cr₃C₂ و NiCr با اندازه‌های اولیه ۱-۵ μm به وضوح مشاهده می‌شود.



شکل (۱): تصویر میکروسکوپی الکترون برگشتی از پودر کاربید کروم-نیکل کروم مورد استفاده در این تحقیق.

در شکل ۲ ب، ذرات با دو رنگ روشن (A) و تیره (B) حاضر هستند. مطابق با آنالیز EDS انجام شده در شکل ۳، نقطه‌ی A حاوی ۸۴/۵٪ کروم، ۱۴/۳٪ کربن و ۱/۲٪ نیکل و نقطه‌ی B حاوی ۸۰/۳٪ نیکل و ۱۹/۷٪ کروم (درصد وزنی) هستند. در

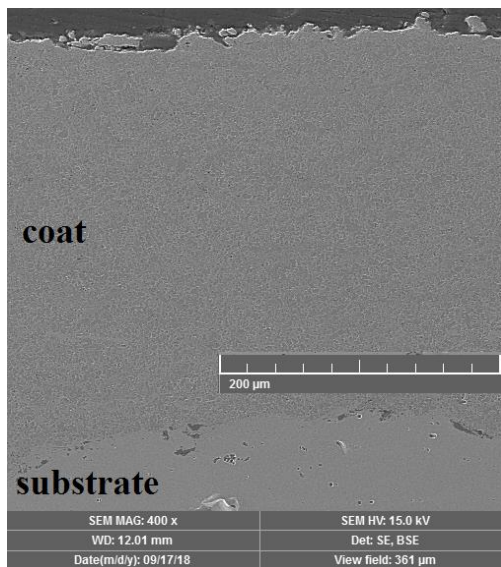
در پوشش، آنالیز توزیع عناصر EDS نیز روی سطح مقطع اچ شده پوشش‌ها انجام شد. روش آنالیز تصویر (IA) با استفاده از نرم‌افزار Image Tool برای محاسبه درصد کاربید بازیابی شده در پوشش عملیات حرارتی شده استفاده شد. در هر نمونه، ۱۰ تصویر مقطع عرضی پوشش انتخاب شد و سرانجام میانگین آن‌ها به عنوان درصد کاربید گزارش شد. به منظور شناسایی و بررسی میزان فازهای کاربیدی موجود در پودر اولیه و پوشش قبل و بعد از عملیات حرارتی، آنالیز پراش سنجی اشعه ایکس با تابش CuKα با طول موج ۱/۵۴ آنگستروم در زوایای ۶۰-۱۰ انجام شد. داده‌های حاصل از آنالیز XRD توسط نرم‌افزار Xpert high score plus تحلیل شد. آزمایش ریز سختی مطابق با استاندارد ASTM E 384 با استفاده از فرورونده ویکرز تحت بارگذاری ۳۰۰g روی سطح رو و مقطع عرضی پوشش‌ها قبل و بعد از عملیات حرارتی انجام شد. در هر نمونه، ۴ الی ۶ اثر ایجاد شد و سرانجام میانگین آن‌ها به عنوان عدد ریزسختی گزارش شد. برای جلوگیری از تأثیر میدان‌های تنشی هر اثر روی نتایج، اثر بعدی در فاصله‌ای بیش از ۳ برابر قطر اثر قبلی اعمال گردید. برای محاسبه مدول الاستیک پوشش‌ها از آزمایش فروروندگی نوپ استفاده شد. این روش بر اساس اندازه‌گیری بازیابی الاستیک اثر وجه فرورونده نوپ است. بازیابی الاستیک مستقل از نیرو است و مطابق با رابطه (۱)، با سختی پوشش (H) در ارتباط است. بدین منظور بار ۳۰۰ گرم توسط فرورونده نوپ روی سطح مقطع پولیش شده پوشش اعمال شد. قطر اثر کوچک (b') و بزرگ (a') توسط میکروسکوپ نوری اندازه‌گیری شدند.

$$b'/a' = b/a - \alpha H/E \quad (1)$$

در این رابطه، $\alpha=0.45$ و $b/a=0.141$ است [۱۴].

۳- نتایج و بحث

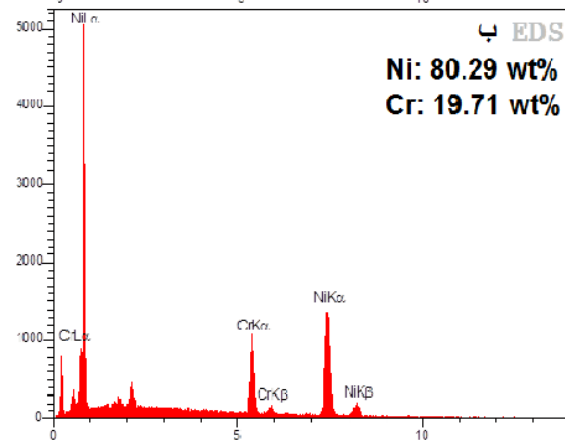
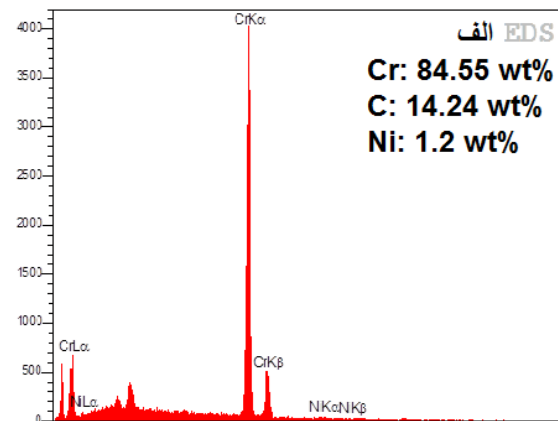
در این بخش، ابتدا به بررسی‌های میکروسکوپی از سطح مقطع پوشش Cr₃C₂-NiCr ایجاد شده بدون/با عملیات حرارتی پرداخته می‌شود. سپس نتایج حاصل از آنالیز ترکیب فازی و



شکل (۳): تصویر میکروسکوپی الکترون‌های ثانویه از سطح مقطع پولیش شده پوشش بهینه $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-}25\%\text{NiCr}$.

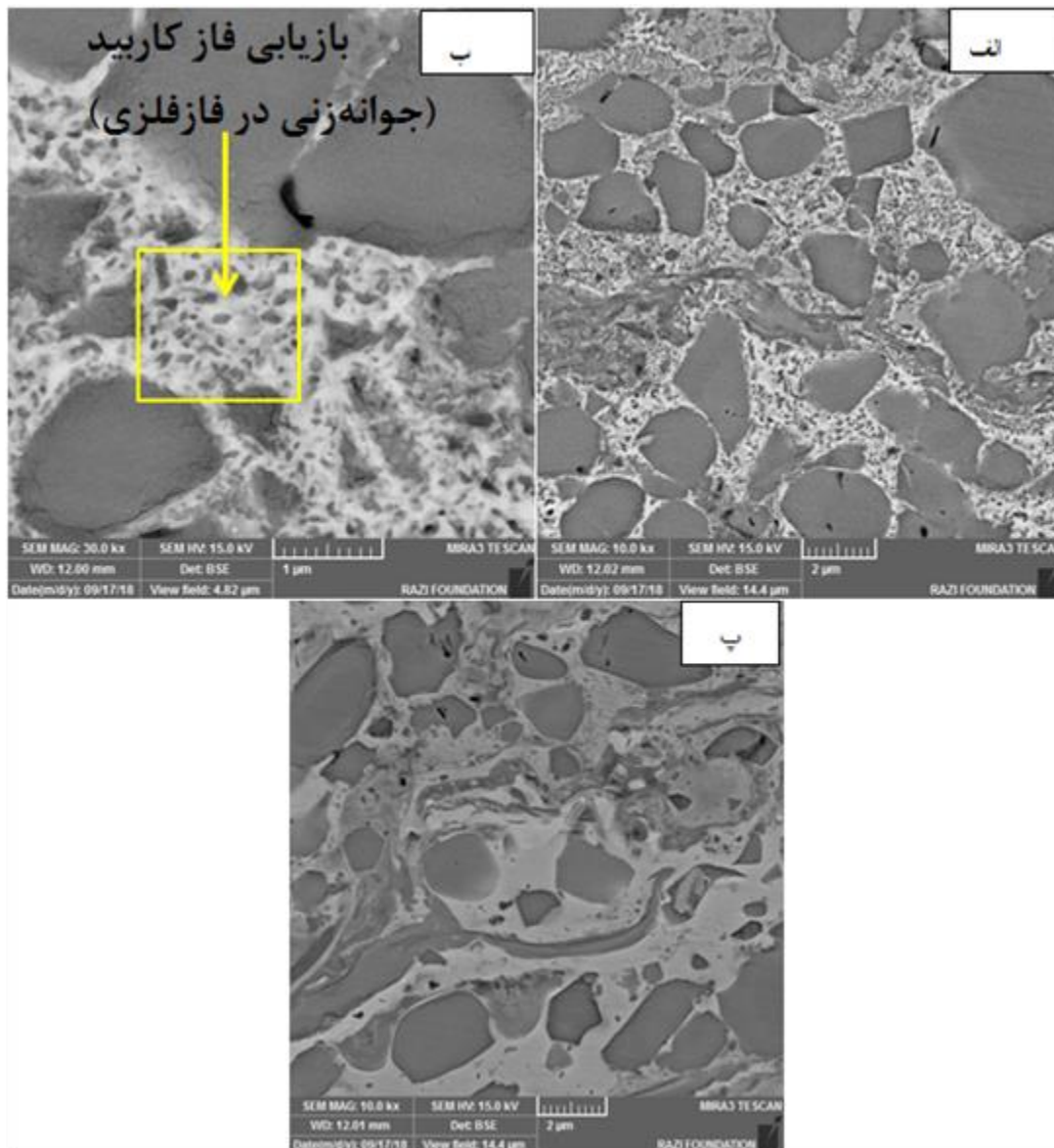
در فرایند پاشش حرارتی نرخ انجماد اسپلت‌ها به دلیل اختلاف دمای زیادشان با زیرلایه تا 10^6 k/s می‌رسد. پودر اولیه $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ با فرایند کلوخه شدن و سپس عملیات زینترینگ تولید شده‌اند؛ در نتیجه به انحلال کاربید در فاز NiCr ، تغییر در ترکیب کاربید و تنوع وسیعی در غلظت Cr آلیاژ NiCr مستعد هستند. سرمایه‌ش سریع، این بی‌نظمی ریزساختاری و ترکیبی را درون پوشش حبس می‌کند. وضعیت شبه‌پایدار پیچیده در پوشش پس از پاشش، به معنای حضور یک نیرو محرکه قوی برای استحاله ریزساختاری و ترکیبی طی عملیات حرارتی بعدی است [۱۶-۱۸]. شکل ۴ الف، تصویر BSE از سطح مقطع پوشش پس از عملیات حرارتی را نشان می‌دهد. بازیابی کاربیدها در زمینه فلزی قابل مشاهده است. در شکل ۴ ب (بزرگنمایی بالاتر) جوانه‌زنی و بازیابی کاربیدها (نقاط تیره) در زمینه فلزی مشخص هستند. آنالیز توزیع عناصر از ناحیه مشخص شده در شکل ۴ ب، درصد وزنی عناصر Ni ، Cr ، C و O را به ترتیب 80.29% ، 19.71% ، 3.5% و 22.3% نشان دادند. برای مقایسه، در شکل ۴ پ تصویر پوشش بدون عملیات حرارتی آورده شده است. اثری از جوانه‌های تیره کاربیدی در پوشش بدون عملیات حرارتی در شکل ۴ پ، مشاهده نمی‌شود.

نتیجه می‌توان گفت فازهای روشن آلیاژ NiCr و ذرات تیره Cr_3C_2 هستند.



شکل (۲): آنالیز عنصری مربوط به نقاط A و B مشخص شده در شکل ۱. الف) نقطه A و ب) نقطه B.

بررسی‌های ریزساختاری و مقدار استحکام پیوند پوشش بهینه در مقاله‌ای جداگانه توسط گروه تحقیقاتی حاضر، گزارش شده‌اند [۱۵]. درصد تخلخل و استحکام پیوند پوشش بهینه به ترتیب 0.9% و $< 6 \text{ MPa}$ اندازه‌گیری شدند. تصویر میکروسکوپی الکترون‌های ثانویه از سطح مقطع پولیش شده پوشش بهینه در شکل ۳ آورده شده است.

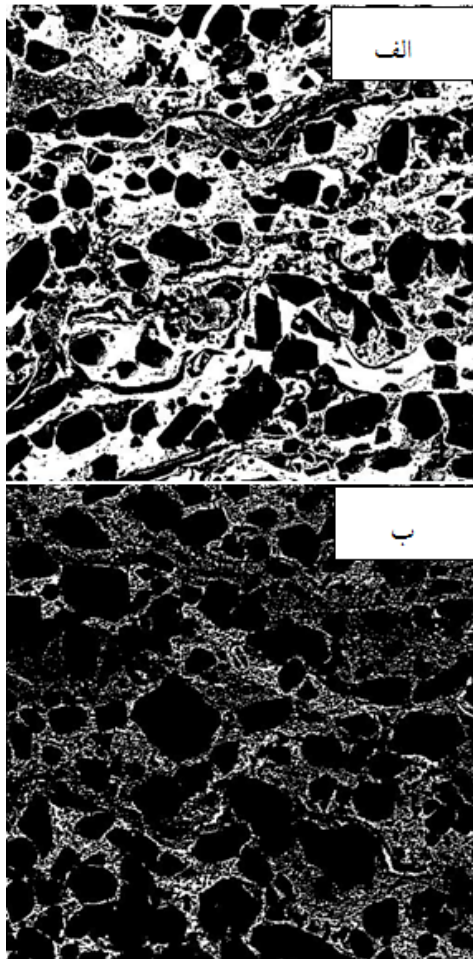


شکل (۴): (الف) تصویر الکترون‌های بازگشتی از سطح مقطع پوشش پس از عملیات حرارتی به مدت ۱ ساعت در دمای 725°C ، (ب) بزرگنمایی بیشتر از الف و (پ) نمونه قبل از عملیات حرارتی.

کاربید پس از عملیات حرارتی درشت‌تر هستند. زیرا کاربیدهای حل شده به طور ترجیحی روی ذرات کاربید باقیمانده در ساختار رسوب می‌کنند [۴]. در نتیجه، عملیات حرارتی تأثیر بسزایی روی بازیابی فازهای سخت (کاربید کروم) دارد.

آنالیز تصویر از تصاویر BSE پوشش‌ها مطابق با شکل ۵ نشان داد که درصد فاز کاربیدی (نواحی تیره‌رنگ) از 62 ± 5 درصد برای پوشش بدون عملیات حرارتی (شکل ۵ الف) به 73 ± 4 درصد برای پوشش پس از عملیات حرارتی (شکل ۵ ب) افزایش یافت. همچنین مشاهده می‌شود که اندازه دانه‌های

البته مقادیر کمی Cr_7C_3 نیز پیدا شد که مقدار آن برای تفکیک از دیگر پیک‌های هم‌پوشانی کننده کم بود. تمام پیک‌ها به‌خصوص در زاویه 43° پهن هستند که نشان‌دهنده محلول جامد فوق اشباع آمورف/نانوساختار یا کریستالی است.



شکل (۵): آنالیز تصویر از تصاویر میکروسکوپی الکترونی برگشتی (۵۰۰۰X). الف) پوشش پس از پاشش. ب) پوشش پس از عملیات حرارتی.

تصاویر میکروسکوپی BSE از سطح مقطع پولیش شده پوشش‌ها نشان دادند که انحلال کاربرد زیادی در آلیاژ NiCr اتفاق افتاده است که منجر به کاهش غلظت کاربیدها شد. به همین علت، رنگ‌های خاکستری متنوع در فازهای آلیاژی مشاهده شد (شکل ۴ ب). دانه‌های کاربیدی باقیمانده به احتمال زیاد در مرکز اسپلت‌های بزرگ‌تر حضور دارند؛ بنابراین،

آنالیز توزیع عناصر در فازهای مختلف پوشش، میزان ۳ تا ۷ درصد وزنی اکسیژن را نشان داد. ثابت شده است که در دمای $700^\circ C$ فازهای آلیاژ NiCr و کاربرد کروم در ابتدا مستقل از هم اکسید می‌شوند. کاربرد کروم برای تشکیل Cr_2O_3 از طریق مکانیزم کربن‌زدایی مطابق با واکنش‌های (۲) تا (۵) اکسید می‌شود [۱۹]:

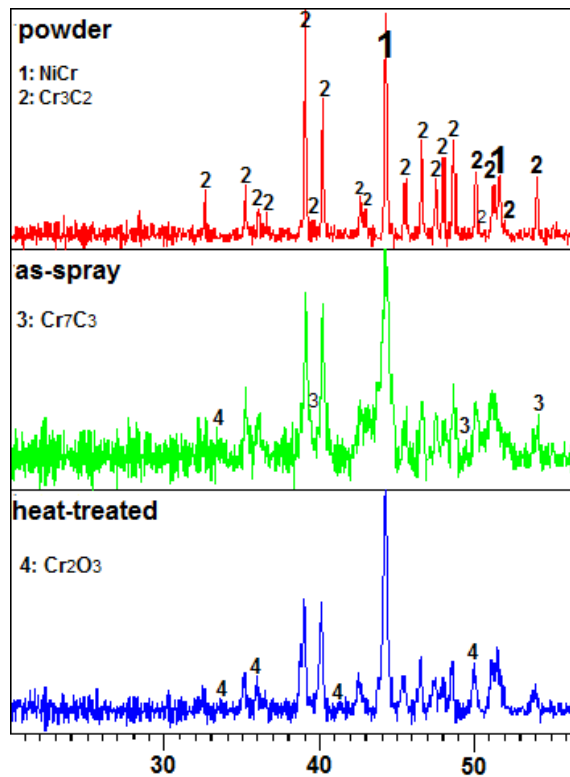


بنابراین، کاهش کربن (کربن‌زدایی) در هنگام اکسیداسیون کاربرد کروم با تصاعد CO/CO_2 رخ می‌دهد. مراحل بالا در زمان‌های نسبتاً کوتاهی انجام می‌شوند. بر اساس آنالیز XRD روی پوشش‌های عملیات حرارتی شده به مدت ۱۰ دقیقه اثری از Cr_7C_3 و $Cr_{23}C_6$ مشاهده نشده است. این نشان می‌دهد که این فازها یک‌لایه بسیار نازک سطحی پیش از تشکیل Cr_2O_3 ایجاد می‌کنند [۱۸].

۳-۲- آنالیز ترکیب فازی

الگوهای XRD پودر $Cr_3C_2-25wt\%(NiCr)$ (GTV 80.81.1)، پوشش پس از پاشش (as-spray) و پوشش عملیات حرارتی شده در شکل ۶ آورده شده‌اند. فازهای پیداشده در پودر اولیه، عمدتاً NiCr و Cr_3C_2 بودند که به ترتیب با نشانه‌های ۱ و ۲ روی الگوی XRD مشخص شده‌اند. مرجع [۱۹] نیز گزارش کرده است که تنها فازهای موجود در پودرهای آگلومره زینتر شده $Cr_3C_2-25NiCr$ همان NiCr و Cr_3C_2 هستند.

شکل ۶ وسط، الگوی XRD پوشش را بلافاصله پس از پاشش (بدون عملیات بعدی) نشان می‌دهد. انحلال کاربرد در زمینه فلزی و ایجاد یک زمینه فوق اشباع از C و Cr منجر به یک زمینه آمورف در طیف NiCr در روبش XRD پوشش می‌شود. تنها فازهای کریستالی قابل تشخیص، NiCr و Cr_3C_2 بودند.



شکل (۶): الگوهای XRD پودر Cr₃C₂-25%NiCr (بالا)، پوشش Cr₃C₂-25%NiCr ایجاد شده به روش HVOF (وسط) و پوشش عملیات حرارتی شده در دمای ۷۲۵°C به مدت ۱ ساعت (پایین).

۳-۳- ارزیابی سختی و مدول الاستیک

مقادیر سختی با اعمال فرورونده ویکرز روی سطح مقطع پولیش شده پوشش بهینه در جدول ۲ گزارش شده‌اند. عدد میانگین سختی مقطع پوشش‌ها $HV_{0.3} = 138 \pm 935$ به دست آمد. بازه سختی پوشش‌های کاربید کروم در مقالات مختلف $HV_{0.3} = 800-1000$ اندازه‌گیری شده است که این مقادیر عمدتاً به فرایند پوشش‌دهی و نسبت فاز کاربید کروم به نیکل کروم بستگی دارند. در تحقیق حاضر، سختی سطح مقطع پوشش حاصل در بازه ۸۰۹ تا ۱۰۷۳ ویکرز قرار دارد. در تصاویر الکترون‌های برگشتی، فازهای مختلفی در ساختار پوشش مشاهده شدند و آنالیز XRD حضور فازهای نرم و سخت مختلف را در پوشش تأیید کرد. همچنین تخلخل‌های موجود در ساختار پوشش سبب بازه وسیعی از مقادیر سختی شده‌اند.

مشاهدات میکروسکوپی و آنالیز ترکیب فاز در توافق با یکدیگر هستند.

الگوی XRD پوشش عملیات حرارتی شده در شکل ۶ نشان می‌دهد که استحاله‌های ریزساختاری پس از عملیات حرارتی پیشروی خوبی داشته‌اند. نواحی آمورف الگوی پوشش as spray محو شدند و پیک‌های NiCr باریک و با شدت بیشتری در الگوی فاز زمینه مشاهده شدند. پیک‌های کاربید نیز مشخص‌تر شدند.

تصاویر BSE نشان دادند که پس از عملیات حرارتی، رسوبات ریز تیره در آلیاژ زمینه تشکیل شدند. Cr₂O₃ پیدا شده در برخی طیف‌های XRD با شدت بسیار کم نشان می‌دهد که این فاز در مقادیر بسیار کمی وجود دارد. در نتیجه رسوبات ریز تشکیل شده طی عملیات حرارتی به احتمال زیاد Cr₃C₂ هستند و مطابق با [۲۰ و ۲۱] Cr₂O₃ نیستند. به عنوان پیشنهاد، تأثیر عملیات حرارتی در محیط خلأ نیز می‌تواند بررسی و با نتایج تحقیق حاضر مقایسه شود.

آنالیز تصاویر الکترون‌های برگشتی در این آزمایش، افزایش چشمگیر میزان فازهای تیره رنگ در ساختار پوشش عملیات حرارتی شده را به طور کمی نشان داد. آنالیز فازی XRD تأیید کرد که فازهای تیره رنگ کاربید کروم‌های بازیابی شده بودند. در نتیجه با استناد بر مشاهدات میکروسکوپی و آنالیز فازی می‌توان گفت عملیات حرارتی منجر به بازیابی کاربید کروم در ساختار پوشش سرمته Cr₃C₂-NiCr شده است.

به ماده بالک به دست می‌آیند. مقدار مدول الاستیک میانگین اندازه‌گیری شده توسط فرورونده نوب برای پوشش کاربرد قبل و بعد از عملیات حرارتی به ترتیب 261 ± 36 و 359 ± 15 گیگا پاسکال بود. جزئیات داده‌های آزمایش در جدول ۳ آورده شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود مدول الاستیک پس از عملیات حرارتی به طور چشمگیری افزایش پیدا کرده است که به بازیابی کاربرد در ساختار پوشش مربوط می‌شود. این نتایج با داده‌های حاصل از آزمایش سختی سنجی و بررسی‌های ریزساختاری و فازی مطابقت دارند. نکته مهمی که باید به آن اشاره شود این است که مدول الاستیک این پوشش‌ها در مقایسه با ماده بالک بسیار کمتر به دست آمده است. مقدار مدول الاستیک ماده بالک $373/13$ GPa گزارش شده است [۲۳]. این کاهش مدول الاستیک در پوشش‌ها به علت حضور ۲۵ درصد وزنی فاز نرم‌تر نیکل-کروم و همچنین ریزساختار لایه‌ای و فصل مشترک ضعیف بین اسپلت‌ها در پوشش‌های پاشش حرارتی نسبت به ماده بالک کاربرد کروم است.

۴- نتیجه‌گیری

هدف از تحقیق حاضر، بررسی تأثیر عملیات حرارتی بر ریزساختار، ترکیب فازی، سختی و مدول الاستیک پوشش Cr_3C_2-NiCr ایجاد شده توسط فرایند HVOF بود. بدین منظور، پوشش پس از پاشش در دمای $725^\circ C$ به مدت ۱ ساعت تحت عملیات حرارتی قرار گرفت. نتایج استخراج شده به صورت زیر هستند:

(۱) طی پاشش حرارتی ترکیب Cr_3C_2-NiCr ، انحلال بخشی از فاز کاربیدی در آلیاژ NiCr رخ داد که منجر به تغییرات ترکیب فازی پوشش نسبت به پودر اولیه شد.

(۲) انجام عملیات حرارتی روی پوشش منجر به بازیابی بخش قابل توجهی از کاربیدهای حل شده (حدود ۱۱ درصد) در آلیاژ NiCr شد.

میانگین سختی ویکرز از سطح روی پوشش قبل و بعد از عملیات حرارتی نیز به دست آمد. همان‌طور که از داده‌های جدول ۲ مشاهده می‌شود، بازیابی فاز کاربرد پس از عملیات حرارتی دلیل اصلی سختی بیشتر پوشش کاربرد کروم عملیات حرارتی شده است؛ بنابراین مشاهده می‌شود که عملیات حرارتی تأثیر چشمگیری روی افزایش سختی پوشش‌های کاربرد کروم ایجاد شده به روش پاشش HVOF دارد. این اثر توسط گیلمانی [۲۲] نیز نشان داده شد، بدین گونه سختی پوشش پس از عملیات حرارتی تا 150 ویکرز افزایش یافت. شایان‌ذکر است که عملیات حرارتی می‌تواند با کاهش تنش‌های پسماند و رهاسازی کرنش‌های شبکه به کاهش سختی پوشش منجر شود. از سوی دیگر، به واسطه بازیابی کاربیدها در پوشش Cr_3C_2-NiCr ، سختی افزایش می‌یابد که برآیند رقابت بین دو حالت ذکر شده برای پوشش کاربرد کروم در این پژوهش به صورت افزایش سختی نمایان شده است. به گونه‌ای که سختی پوشش پس از عملیات حرارتی 156 ویکرز افزایش یافت.

سختی پوشش‌های حاصل از فرایندهای پاشش حرارتی به سختی پودرهای اولیه و ریزساختار پوشش بستگی دارد. نکته مهمی که باید به آن اشاره شود این است که ریزسختی و مدول الاستیک این پوشش‌ها در مقایسه با ماده بالک کاربرد کروم بسیار کمتر به دست آمده است. مقدار ریزسختی ماده بالک 1834 ویکرز [۲۳] گزارش شده است. این کاهش سختی در پوشش‌ها به علت حضور ۲۵ درصد وزنی فاز نرم‌تر نیکل-کروم و همچنین ریزساختار لایه‌ای و فصل مشترک ضعیف بین اسپلت‌ها در پوشش‌های پاشش حرارتی نسبت به ماده بالک کاربرد کروم است. در مورد پوشش کاربرد کروم قبل از عملیات حرارتی یک عامل دیگر نیز در کاهش سختی پوشش سهم دارد که انحلال بخشی از فازهای سخت کاربیدی در زمینه فلزی است. از طرفی مکان‌های اثر فرورونده نیز مهم هستند؛ زیرا درون لایه پوشش انواع نواقص وجود دارند؛ بنابراین، بسته به محل اندازه‌گیری سختی مقادیر پراکنده و در بازه مقادیر بزرگ‌تری نسبت

HVAF-sprayed WC-10Co-4Cr coatings." Surface Engineering, vol. 33, no. 1, pp, 63-71, 2017.

[4] S. Matthews, B. James & M. Hyland. "The role of microstructure in the mechanism of high velocity erosion of Cr₃C₂-NiCr thermal spray coatings: Part 1—as-sprayed coatings." Surface and Coatings Technology, vol. 203, no. 8, pp, 1086-1093, 2009.

[5] S. Matthews, M. Hyland & B. James. "Microhardness variation in relation to carbide development in heat treated Cr₃C₂-NiCr thermal spray coatings." Acta Materialia, vol. 51, no. 14, pp, 4267-4277, 2003.

[۶] ا. امیرکاوئی و ع. سعیدی، "تولید پودر کاربید کروم (Cr₃C₂) به روش‌های سنتز احتراقی و مکانوشیمیایی"، فرایندهای نوین در مهندسی مواد، شماره اول، ۱۳۸۹.

[7] W. Żórawski & S. Kozerski, "Scuffing resistance of plasma and HVOF sprayed WC12Co and Cr₃C₂-25 (Ni20Cr) coatings." Surface and Coatings Technology, vol. 202, no. 18, pp, 4453-4457, 2008.

[8] V, Matikainen & et al. "Sliding wear behaviour of HVOF and HVAF sprayed Cr₃C₂-based coatings." Wear, vol. 388, pp, 57-71, 2017.

[9] A. S. M. Ang, H. Howse, S. A. Wade & et al. "Manufacturing of nickel based cermet coatings by the HVOF process." Surface Engineering, vol. 32, no. 10, pp, 713-724, 2016.

[10] S. Matthews, M. Hyland & B. James. "Long-term carbide development in high-velocity oxygen fuel/high-velocity air fuel Cr₃C₂-NiCr coatings heat treated at 900 C." Journal of Thermal Spray Technology, vol. 13, no. 4, pp, 526-536, 2004.

[11] J. M. Guilemany & et al. "Role of heat treatments in the improvement of the sliding wear properties of Cr₃C₂-NiCr coatings." Surface and Coatings Technology, vol. 157, no. 2-3, pp, 207-213, 2002.

[12] O. Fumitaka & et al. "Properties of Cr₃C₂-NiCr cermet coating sprayed by high power plasma and high velocity oxy-fuel processes." Journal of thermal spray technology, vol. 9, no. 4, pp, 499-504, 2000.

[۱۳] م. حاجیلو و ض. والفی، بررسی تأثیر دما و زمان فرآیند گداخت بر ریزساختار و عملکرد سایشی پوشش‌های NiCrBSi پاشش پلاسمایی، فرایندهای نوین در مهندسی مواد، سال ۱۳، شماره ۲، ۱۳۹۸.

(۳) بازیابی فاز سخت کاربیدی پس از عملیات حرارتی نقش چشمگیری در افزایش سختی تا ۱۵۶ HV_{0.3} و افزایش مدول الاستیک تا ۹۸GPa پوشش سرمتی داشت.

جدول (۲): میکروسختی سطح رو و سطح مقطع پوشش‌ها با استفاده از فرورونده میکرو ویکرز در بار ۳۰۰g

موقعیت فرورونده	نمونه	۱	۲	۳	میانگین
سطح مقطع	As-sprayed	۸۰۹	۱۰۷۳	۸۶۵	۹۳۵
	As-sprayed Heat-treated	۱۷۶۰	۱۶۶۳	۱۶۸۴	۱۶۸۰
سطح رو	As-sprayed Heat-treated	۱۶۵۹	۲۱۳۹	۱۸۳۹	۱۸۱۶

جدول (۳): داده‌های آزمایش نوب برای محاسبه مدول الاستیک پوشش Cr₂C₃ قبل و بعد از عملیات حرارتی

نمونه	قطر کوچک (b)	قطر بزرگ (a)	سختی (KHN)	مدول الاستیک (GPa)
As-sprayed Cr ₂ C ₃	۸/۸۸	۷۱/۱۷	۸۴۱	۲۹۷
	۸/۵۱	۶۶/۵۱	۹۶۴	۲۷۳
	۸/۴۳	۶۴/۵	۱۰۲۵	۲۲۹
	۸/۵۹	۶۶/۳۸	۹۶۸	۲۴۴
Heat-treated Cr ₂ C ₃	۷/۹۸	۶۳/۶۱	۱۰۷۱	۳۶۲
	۷/۹۸	۶۳/۶۱	۱۰۷۱	۳۶۲
	۸/۲۸	۶۷/۲۵	۹۴۳	۳۶۷
	۸/۲۵	۶۶/۰۹	۹۷۷	۳۴۴

۵- مراجع

[1] T. Sahraoui & et al. "Alternative to chromium: characteristics and wear behavior of HVOF coatings for gas turbine shafts repair (heavy-duty)." Journal of Materials Processing Technology, vol. 152, no. 1, pp, 43-55, 2004.

[2] J. M. Guilemany, S. Dosta & J. R. Miguel. "The enhancement of the properties of WC-Co HVOF coatings through the use of nanostructured and microstructured feedstock powders." Surface and Coatings Technology, vol. 201, no. 3-4, pp, 1180-1190, 2006.

[3] Y. Liu, W. Liu, Y Ma & et al. "A comparative study on wear and corrosion behavior of HVOF-and

effect of particle morphology and spraying parameters on the microstructure, properties, and high temperature wear performance." *Journal of thermal spray technology*, vol. 22, no. 2-3, pp, 280-289, 2013.

[20] P. Sahoo & R. Raghuraman. "Chromium-carbide-reinforced composite coatings for high-temperature hard-coat applications." *Thermal Spray Coat: Res., Design Appl., Proc. Natl. Spray Conf.* 1993.

[21] J. He & E. J. Lavernia. "Precipitation phenomenon in nanostructured Cr_3C_2 -NiCr coatings." *Materials Science and Engineering: A*, vol. 301, no. 1, pp, 69-79, 2001.

[22] J. M. Guilemany & et al. "Role of heat treatments in the improvement of the sliding wear properties of Cr_3C_2 -NiCr coatings." *Surface and Coatings Technology*, vol. 157, no. 2-3, 207-213, 2002.

[23] CRC Materials Science and Engineering Handbook. p.472.

[14] J. P. Singh, "Use of Indentation Technique to Measure Elastic Modulus of Plasma-Sprayed Zirconia Thermal Barrier Coatings." *Ceramic Engineering & Science Proceedings*. 1997.

[۱۵] پ. زمانی مقدم، ر. قاسمی، ب. سعیدی و ح. دهاقین، بررسی ریزساختار، سختی و استحکام پیوند پوشش سرمته Cr_3C_2 -NiCr ایجادشده روی اجزای محفظه احتراق توربین گازی توسط فرایند HVOF. نوزدهمین کنگره ملی مهندسی سطح، بهمن ماه ۱۳۹۷.

[16] D. Ghosh & S. K. Mitra, "Plasma sprayed Cr_3C_2 -Ni-Cr coating for oxidation protection of 2·25Cr-1Mo steel." *Surface Engineering*, vol. 31, no. 5, pp, 342-348, 2015.

[17] H. Singh, T. S. Sidhu, J. Karthikeyan & et al. "Development and characterization of Cr_3C_2 -NiCr coated superalloy by novel cold spray process." *Material Manufacturing Processes*, vol. 31, no. 11 pp, 1476-1482, 2016.

[18] S. Matthews, "Doctoral Thesis – Erosion-corrosion of Cr_3C_2 -NiCr high velocity thermal spray coatings", Department of Chemical and Materials Engineering, Vol. Doctoral Thesis, The University of Auckland, Auckland, 2004.

[19] P. Dominique, J. G. Legoux & R. S. Lima, "Engineering HVOF-sprayed Cr_3C_2 -NiCr coatings: the

۶- پی نوشت

- [1] High Velocity Oxy-Fuel
[2] Atmospheric Plasma Spraying
[3] Matthews et al
[4] Hard Face

Influence of Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of HVOF Sprayed Cr₃C₂-NiCr Coating

Pejman Zamani Moghadam^{1*}, Reza Ghasemi¹, Behnaz Saeedi¹, Hamid Dahaghin², Farhad Shahriari³, Mahmood Memari⁴

1- Coating development expert, Turbotec Co., Tehran, Iran.

2- Coating development manager, Turbotec Co., Tehran, Iran.

3- Coating development adviser, Shiraz Industrial University, Shiraz, Iran.

4- Technology development manager, Turbotec Co., Tehran, Iran

*Corresponding author: p.zamani@turbotec-co.com

Abstract

Deposition of the Cr₃C₂-NiCr cermet by the HVOF process results in the dissolution of Cr₃C₂ in the NiCr metal phase and decreasing the hardness and the elastic modulus of the resulting coating. In this study, Cr₃C₂-25wt% (Ni-20Cr) powder was applied to Hastelloy X super alloy substrates by high velocity oxy-fuel (HVOF) process. Influence of heat treatment on Cr₃C₂ phase recovery and improvement of hardness and elastic modulus of coatings was investigated. For this purpose, microstructural examination performed by field emission scanning electron microscopy and phase composition analysis by X-ray diffraction (XRD) analysis on the coating before and after heat treatment. Analysis of back scattered electron microscopy images showed that up to 11% of the dissolved carbide phases in the NiCr alloy recovered during heat treatment. In the XRD patterns of the heat-treated coatings, the amorphous regions disappeared and the NiCr peaks pronounced more in the background phase pattern. Also, the hardness and elastic modulus of coating after heat treatment increased by 156 HV0.3 and 98 GPa, respectively.

Keywords: Cr₃C₂-NiCr, Heat Treatment, Microstructure, Phase Composition, Mechanical Properties.

Journal homepage: ma.iaumajlesi.ac.ir

Please cite this article using:

Pejman Zamani Moghadam, Reza Ghasemi, Behnaz Saeedi, Hamid Dahaghin, Farhad Shahriari, Mahmood Memari, Influence of Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of HVOF Sprayed Cr₃C₂-NiCr Coating, New Process in Material Engineering, 2020, 14(4), 53-63.