

تأثیر افزودن NiCr بر خواص ریزساختاری پوشش Fe_3TiO_4 اعمال شده به روش HVOF بر زیر لایه فولاد ساده کربنی

یوسف نعیمی، مهدی رئوفی، مرضیه زینعلی

دانشکده مهندسی، دانشگاه اراک

(دریافت مقاله: ۹۷/۰۸/۲۳ - پذیرش مقاله: ۹۸/۰۵/۱۶)

چکیده

امروزه پوشش‌های حاوی نیکل کروم برای بهبود خواص قطعات فولادی کم کربن در صنایع مختلف بطور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند. به همین خاطر در این پژوهش پوشش Fe_3TiO_4 با اضافه کردن نیکل کروم توسط فرآیند پاشش حرارتی (HVOF) بر روی زیرلایه فولاد کم کربن اعمال گردید. برای این منظور پودر نیکل کروم با نسبت یکسان به مقدار ۲۵ درصد وزنی به پودر Fe_3TiO_4 اضافه گردید. به منظور ارزیابی خواص ریزساختاری و فازی پوشش‌ها از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مجهز به EDS، آنالیز اشعه ایکس (XRD)، میکرو سختی سنج و زبری سنج استفاده شد. نتایج آزمایشی نشان داد که ریزساختار همگن و یکنواخت بوده که بصورت لایه لایه و متشکل از محلول جامد فلزی نیکل و آهن و محلول جامد نیکل کروم در اکسید تیتانیوم است. نتایج آنالیز پراش اشعه ایکس (XRD) بیانگر تشکیل فازهای Fe_2O_3 ، $FeNi_3$ ، TiO_2 ، Fe_2TiO_4 در پوشش‌ها ایجاد شده است. بر اساس یافته‌های آزمایشی در اثر اضافه کردن نیکل کروم سختی پوشش افزایش، زبری و تخلخل پوشش کاهش می‌یابد. واژه‌های کلیدی: Fe_3TiO_4 ، NiCr، پاشش حرارتی HVOF، ریزساختار.

Effect of Nicer Content on Microstructure Properties of Fe_3TiO_4 Coatings Prepared by HVOF Process on Low Alloy Steel

Yousef Naami, Mehdi Raofei, Marziyeh Zeynali

Engineering Department, Arak university

(Received 14 November 2018, accepted 7 August 2019)

Abstract

In this study, high-velocity oxygen-fuel (HVOF) process was applied to produce Fe_3TiO_4 coating on the low carbon steel by adding NiCr. For this purpose, NiCr powder with the same ratio of 25% was mixed with Fe_3TiO_4 . The structural and mechanical properties of the coatings were evaluated using scanning electron microscopy, X-ray diffractometry, micro hardness and roughness test. The results showed that the microstructure of the coatings is homogeneous and uniform, consisting of a nickel and iron solid metal solution with nickel chromium in titanium oxide. The XRD results indicated that the coatings included Fe_2O_3 ، $FeNi_3$ ، TiO_2 and Fe_2TiO_4 phases. It was also found that the hardness was increased, roughness and porosity was decreased by addition of NiCr.

Keywords: NiCr, Fe_3TiO_4 , HVOF thermal spraying, Microstructure.

E-mail of Corresponding author: Yousef.naami89@gmail.com.

مقدمه

ایجاد شده با روش HVOF صورت گرفته است. فرهپور و همکاران اثر نرخ تغذیه و نسبت سوخت به اکسیژن بر رفتار خوردگی پوشش‌های NiCr را مورد بررسی قرار دادند [۷]. آنها پی بردند که پارامترهای مختلف تأثیر بسزایی بر رفتار خوردگی داشته‌اند. بنابراین به دست آوردن شرایط بهینه پاشش جهت دستیابی به خواص مناسب پوشش امری ضروری است. طاهری و همکارانش به بررسی تأثیر سرعت سیلان گاز و نرخ تغذیه پودر بر ریزساختار و استحکام چسبندگی پوشش NiCrAlY را مورد مطالعه قرار دادند [۸]. پوشش‌های حاوی NiCr معمولاً خواص ریزساختاری خوبی را از خود بجایی می‌گذارند و از آنجایی که سختی قابل قبولی را از خود نشان می‌دهند، کاربرد وسیعی در صنایع مختلف دارند. هدف از این پژوهش تأثیر NiCr بر ارزیابی خواص پوشش Fe_3TiO_4 ایجاد شده به روش پاشش حرارتی (HVOF) بر زیرلایه فولاد کم‌کربن مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت. تا به حال تحقیقات زیادی بر روی این پوشش انجام نشده است.

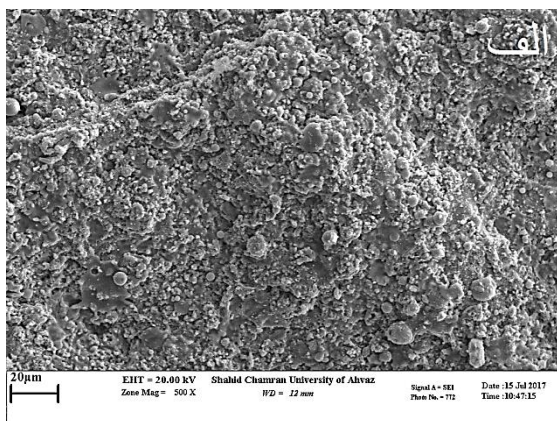
روش تحقیق

در این پژوهش از پودر Fe_3TiO_4 که بصورت ذرات درشت از یک کانه معدنی جدا شده، مورد استفاده قرار گرفت. در ابتدا پودر مورد نظر تحت عملیات آسیاکاری جهت ریز شدن قرار گرفته است. سپس مقدار ۷۰٪ از آن با ۳۰٪ پودر NiCr درون مخلوط‌کن به مدت ۴ ساعت مخلوط گردید. سرعت دیسک در آسیاکاری ۱۸۰ دور بر دقیقه و نسبت وزن گلوله به پودر در هر مرحله از آسیاکاری ۲۰ گرم در هر کاپ از مخلوط پودرها استفاده شد. پودرهای آسیاکاری شده با اندازه ۴۵-۱۵ μm جهت استفاده در فرآیند پاشش بکار برده شد. پوشش Fe_3TiO_4 و Fe_3TiO_4 -NiCr به روش پاشش حرارتی HVOF و با استفاده از دستگاه MJ5000 با سیستم رباتیک ۸ محوره توسط شرکت دانش‌بنیان پتروسازه میهن بر روی زیرلایه فولاد کم‌کربن با ابعاد $20 \times 20 \times 80 mm^3$ که

فولادهای کم‌کربن به دلیل در دسترس بودن و هزینه کم آنها بیشترین کاربرد در صنعت را به خود اختصاص داده‌اند. اما سطح این فولاد نسبت به مکانیزم تخریب خوردگی بسیار حساس است. خوردگی فولادها یکی از مشکلات اصلی صنایع ویژه نفت و گاز و پتروشیمی است. چراکه بیشترین کاربرد این صنایع از فولادها صورت می‌گیرد [۱]. پدیده خوردگی هیچ‌گاه متوقف نشده بلکه با استفاده از فرایندهای موجود مانند مقاوم‌سازی سطوح می‌توان رخداد این پدیده را به تعویق انداخت و تا حدی نرخ انجام آن را کاهش داد. لذا حفاظت و مقاوم‌سازی این سطوح در برابر عوامل مخرب بسیار حائز اهمیت است. سیستم پوشش‌دهی یکی از روش‌های پیشگری از تخریب زود هنگام به حساب می‌آید. این سیستم توسط فرایندهای مختلف بر روی زیرلایه اعمال می‌شود. یکی از این روش‌ها پاشش حرارتی است. پاشش حرارتی شامل فرایندهای مختلف پوشش‌دهی می‌باشد که امکان اعمال پوشش‌های فلزی و یا غیرفلزی را مهیا می‌سازد [۲]. یکی از مهم‌ترین و پرکاربردترین فرآیند پاشش حرارتی روش HVOF است که در دهه ۸۰ میلادی ابداع گردید [۳-۴]. فرآیند پاشش حرارتی (HVOF) یکی از پیشرفته‌ترین سیستم‌های پاششی است که داخل جت گازی ایجاد شده و با استفاده از موج انفجار در محفظه احتراق داخلی خود، قادر است ذرات پودر را با سرعت ۱۲۰۰ تا ۱۵۰۰ متر بر ثانیه بر روی سطوح مورد نظر اعمال کند. امروزه از این روش بطور گسترده در پوشش‌دهی قطعات صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۵]. این فرآیند پوشش‌دهی یکی از روش‌های سریع آماده‌سازی و کارآمد پوشش سطحی به ثبت رسیده است [۴]. با استفاده از فرآیند پاشش حرارتی (HVOF) می‌توان به پوشش‌هایی با چگالی بالا، سختی و استحکام باند قوی دست‌یافت [۶]. تاکنون تحقیقات زیادی در زمینه نوع مواد و پارامترهای پاشش همچون سرعت ذرات و نرخ تغذیه بر رفتار خوردگی و سایش پوشش‌های

بحث و نتایج

شکل (۱) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) جهت بررسی مورفولوژی سطح پوشش‌های ایجاد شده به روش پاشش حرارتی (HVOF) را نشان می‌دهد. پوشش‌های حاصل از فرآیند HVOF به دلیل برخورد ذرات به سطح در هنگام پاشش باعث تغییر شکل پلاستیک ذرات می‌شود. همچنین وجود کمترین میزان گرما در این فرآیند، ذرات را بصورت مذاب یا نیمه مذاب در آورده که باعث تشکیل لایه ورقه‌ای شکل با کمترین میزان عیوب شده است [۹-۱۰]. در اثر فرآیند پاشش ذرات بطور پیوسته به طرف سطح در حال حرکت هستند که لایه‌های پیوسته‌ای در اثر انجماد این ذرات بدست می‌آیند. در خصوص مورفولوژی سطح پوشش نمونه Fe_3TiO_4 شکل (الف) دیده می‌شود که میزان ذرات ذوب نشده در مقایسه با شکل (ب) که حاوی نیکل کروم است، بیشتر هستند. این ذرات ذوب نشده یا نیمه ذوب باعث ایجاد مناطق خشن در سطح پوشش شده است. اما میزان ذرات ذوب شده در پوشش حاوی نیکل کروم مطابق شکل ب به دلیل بالاتر بودن هدایت حرارتی آنها بیشتر می‌باشند. این ذرات به دلیل برخورد بر روی سطح زیرلایه یا بر روی لایه‌های پاس قبلی به شکل اسپلت بر روی سطح پهن شده‌اند و بصورت نواحی یکنواخت و تخت در ساختار پوشش به چشم می‌خورند [۱۱]. در اغلب پوشش‌های حاوی نیکل کروم چنین ساختاری مشاهده شده است [۱۲].



حاوی ترکیب شیمیایی مندرج در جدول ۱ است، انجام گرفت. پارامترهای پوشش دهی در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۱. درصد عناصر موجود در زیر لایه

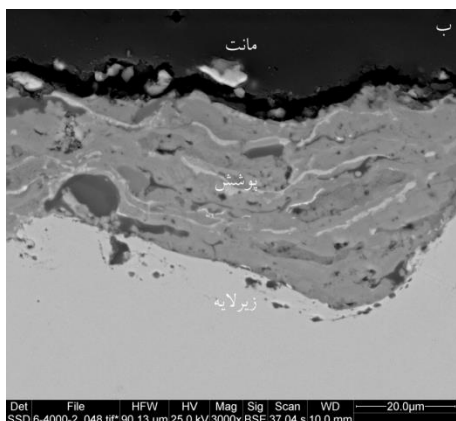
C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Fe
۰/۱۲	۰/۵۸	۰/۰۱	۰/۰۰۶	۰/۰۰۴	۰/۰۰۶	۰/۰۰۲	۰/۰۴	۰/۰۳۴	فلز پایه

جدول ۲. پارامترهای پاشش حرارتی (HVOF)

جریان سوخت (ml/min)	فاصله پاشش (cm)	سایز ذرات μm	فشار گاز حامل (KPa)	گاز حامل
۳۸۰	۳۰	۱۵-۴۵	۶۰۰	N ₂

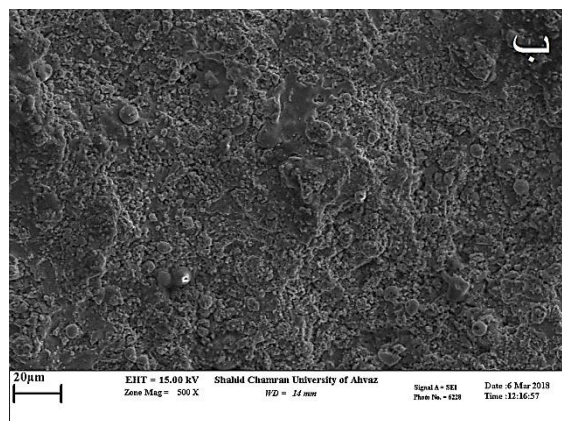
جهت بررسی فازهای موجود در پودرها و پوشش‌های بدست آمده از پراش اشعه ایکس (XRD) توسط دستگاه ASEWARE مدل AW-XDM300 تحت ولتاژ 40KV و جریان 30mA استفاده شد که در نهایت فازبندی نمونه‌ها بوسیله نرم‌افزار X-Pert High Score مشخص و تعیین شدند. برای مشاهده ریزساختار از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل LE 1455VP مجهز به EDS استفاده شد. برای ارزیابی زبری پوشش از روش تماسی توسط دستگاه زبری سنج و کیفیت سنج سطوح پوشش Tim Group مدل TR200 استفاده شده است. به همین منظور دو نمونه از هر پوشش انتخاب شده که زبری از نواحی مختلف سطح پوشش اندازه‌گیری و میانگین آنها ثبت گردید.

آزمون سختی سنجی توسط دستگاه ریز سختی سنج ویکرز تحت شرایط بار اعمالی 100gr و زمان ۱۵ ثانیه انجام شد. به همین منظور مقاطع عرضی از پوشش‌ها تهیه شد. این مقاطع نیاز به سنباده‌زنی و متالوگرافی دارند که قبل از سنباده‌زنی برای جلوگیری از کنده شدن پوشش و سنباده‌زنی مناسب لبه‌های نمونه، از مانت استفاده شد. جهت بررسی تخلخل پوشش‌ها از تصاویر میکروسکوپ الکترونی استفاده شد. بعد از مقایسه تصاویر با یکدیگر و شناسایی تخلخل‌ها، میزان آنها توسط نرم‌افزار Image J تعیین گردید.



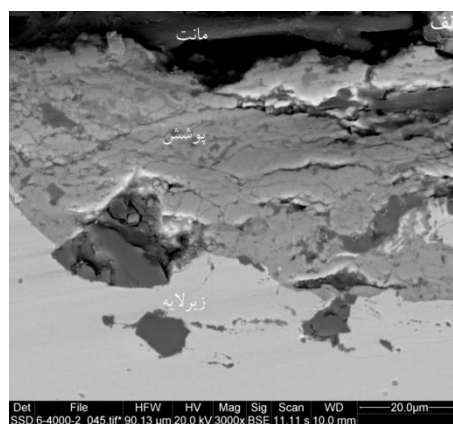
شکل ۲. تصاویر SEM از مقطع عرضی پوشش الف) Fe_3TiO_4 (ب) Fe_3TiO_4 -NiCr

در شکل (۳) الگوی پراش اشعه ایکس پودر Fe_3TiO_4 به همراه پوشش ایجاد شده به روش پاشش حرارتی (HVOF) را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود هر دو نمونه حاوی فازهای غنی از هماتیت (Fe_2O_3) و اکسید آهن تیتانیوم ($Fe_{2.5}O_4Ti_{0.52}$) است فازهای ایجاد شده در پودر با استوکیومتری یکسان در پوشش حضور دارند و باعث انتقال کامل فازهای موجود در پودر پاششی شدند. در حالیکه با افزودن نیکل و کروم به پودر Fe_3TiO_4 مطابق با الگوی پراش اشعه ایکس (XRD) شکل (۴) فازهای متعددی مانند محلول جامد فلزی نیکل و آهن، محلول جامد نیکل و کروم در اکسید تیتانیوم و همچنین فازهای دیگر مانند Fe_2O_3 , Fe_2TiO_4 , Fe_2TiO_5 , $FeNi_3$, TiO_2 ایجاد شدند. فازهای ایجاد شده در حضور نیکل و کروم باعث متراکم کردن پوشش و افزایش سختی آن خواهند شد. مقایسه الگوی پراش مربوط به پودر و پوشش حاصل از آن پس از پاشش حرارتی نشان می‌دهد که پهنای پیک پس از پوشش دهی افزایش و از طرفی شدت پیکها نیز کاهش یافته است. دلیل آن بر اساس نظریات محققین بالا بودن انرژی سنتتیک ذرات نیمه مذاب در هنگام پاشش و برخورد با سطح زیر لایه، باعث تغییر فرم پلاستیکی شدیدی در آنها بوجود آمده که منجر به کاهش اندازه دانه‌ها و افزایش انرژی کرنشی داخلی شده است [۱۳-۱۴].



شکل ۱. تصویر Sem مربوط به پوشش الف) Fe_3TiO_4 (ب) Fe_3TiO_4 -NiCr

با توجه به شکل (۲-الف) پیوند نامناسب پوشش Fe_3TiO_4 به زیر لایه را می‌توان مشاهده کرد. در این پوشش به دلیل وجود مقدار آهن زیاد مطابق با نتایج EDS باعث تشکیل لایه‌های اکسیدی متخلخل شده است. در حالیکه با اضافه کردن نیکل و کروم از تماس زیاد ذرات Fe با شعله HVOF که باعث تشکیل لایه اکسیدی شده جلوگیری کرده است. همانگونه که در شکل (۲-ب) مشاهده می‌شود هیچ گونه آثاری از نجسیدن پوشش به زیر لایه دیده نشده و همچنین خلل و فرج در حضور نیکل و کروم بطور شدیدی کاهش یافته است. فضاها خالی و حفرات بوجود آمده در حین پاشش معمولاً به عواملی مانند فرآیند پاشش، فاصله پاشش، میزان ذوب شدن و نیز سرعت ذرات وابسته است [۱۲].

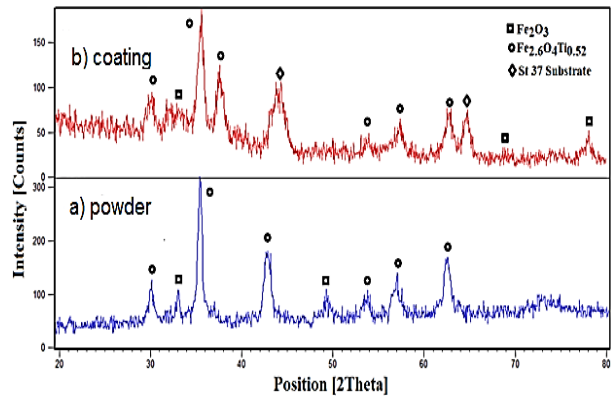


برای هر دو فاز هماتیت و $Fe_{2.6}O_4Ti_{0.52}$ افزایش یافت به طوری که اندازه بلورک برای دو فاز هماتیت و $Fe_{2.6}O_4Ti_{0.52}$ به ترتیب $۳۰/۲۶$ و $۲۱/۴۸$ نانومتر تخمین زده شد. همانطور که مشاهده می‌شود در پوشش‌های Fe_3TiO_4 -NiCr و همچنین Fe_3TiO_4 پوشش دارای ساختار نانومتری است. بنابراین می‌توان گفت در هر دو مورد، نانو پوشش‌های اکسید آهن تیتانیوم با استفاده از روش پاشش حرارتی بدست آمدند.

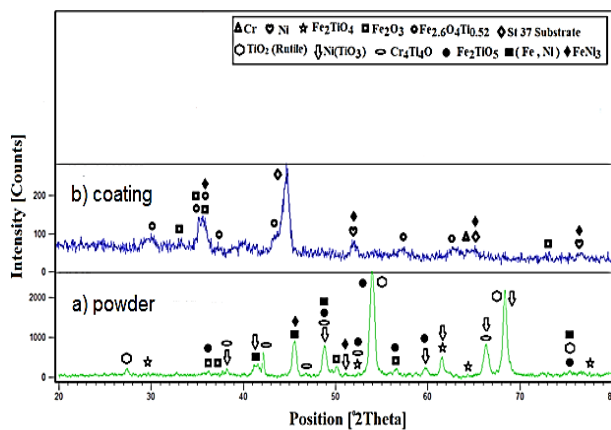
جدول ۳. اندازه میانگین بلورک (برحسب نانومتر) و کرنش شبکه (برحسب درصد) فازهای موجود در پوشش

پوشش پاشش حرارتی	فاز هماتیت (Fe_2O_3)		فاز اکسید آهن تیتانیوم ($Fe_{2.6}O_4Ti_{0.52}$)	
	کرنش شبکه (درصد)	اندازه بلورک (نانومتر)	کرنش شبکه (درصد)	اندازه بلورک (نانومتر)
Fe_3TiO_4	۴۰/۴	۲۰/۲	۵۹/۸	۲۱/۱
Fe_3TiO_4 -NiCr	۴۲/۷۳	۳۰/۲۶	۶۳/۵۶	۲۱/۴۸

جهت بررسی دقیق نواحی ایجاد شده در ساختار پوشش از آنالیز EDS استفاده گردید. شکل (۵) آنالیز پوشش Fe_3TiO_4 و Fe_3TiO_4 -NiCr را نشان می‌دهد. مناطق A, B و C نواحی مختلف ایجاد شده در ساختار پوشش هستند که آنالیز آنها در جدول (۴) و (۵) آورده شده است. با توجه به نتایج EDS ناحیه A که ناحیه ذوب کامل هست حاوی درصد بالایی از عنصر Fe است. چرا که مقدار Fe موجود در پودر نسبت به Ti بیشتر است پس بنابراین طبیعی است که بیشترین ذرات حرارت دیده شده در پوشش Fe_3TiO_4 ، ذرات Fe می‌باشند که در هنگام پاشش بصورت ذوب کامل بر زیر لایه قرار گرفته‌اند. در حالی که با افزودن ذرات NiCr، مقدار Fe و Ti ذوب شده در ناحیه A شکل (۴-۱-ب) کاهش یافته است. بیشترین ذرات حرارت دیده شده در پوشش Fe_3TiO_4 -NiCr، ذرات Cr می‌باشند. دلیل آن این است که توزیع مناسب ذرات NiCr مانع از گرم شدن بیش از اندازه ذرات Fe و Ti در محفظه احتراق شده‌اند. پس می‌توان نتیجه گرفت که Fe و مقداری Ti از ناحیه ذوب کامل در ساختار پوشش Fe_3TiO_4 -NiCr پس زده شده که بیشتر به صورت ترکیبات نیمه ذوب و یا



شکل ۳. الگوهای پراش اشعه ایکس (الف) پودر Fe_3TiO_4 مورد استفاده برای پاشش حرارتی (ب) پوشش Fe_3TiO_4



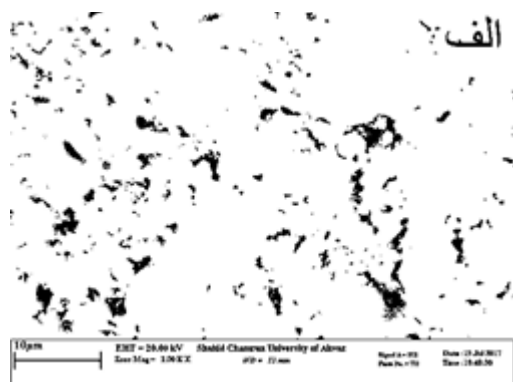
شکل ۴. الگوهای پراش اشعه ایکس (الف) پودر Fe_3TiO_4 -NiCr (ب) پوشش Fe_3TiO_4 -NiCr

در جدول (۳) اندازه بلورک و کرنش شبکه پوشش‌های پاشش حرارتی شده با پودر Fe_3TiO_4 و Fe_3TiO_4 -NiCr آمده است. در محاسبه‌ی اندازه بلورک و کرنش شبکه از فازهای یکسان هماتیت و اکسید آهن تیتانیوم در دو پوشش پاشش حرارتی شده انجام داد. اندازه بلورک فاز هماتیت و فاز $Fe_{2.6}O_4Ti_{0.52}$ در پوشش بدون نیکل و کروم به ترتیب $۲۰/۲$ و $۲۱/۱$ نانومتر اندازه‌گیری شد. همچنین میزان کرنش شبکه برای دو فاز هماتیت و $Fe_{2.6}O_4Ti_{0.52}$ به ترتیب در حدود $۴۰/۲$ و $۵۹/۸$ درصد بدست آمد. با افزودن NiCr به پودر Fe_3TiO_4 و پوشش دهی آن بر روی فولاد St37، اندازه بلورک و کرنش شبکه

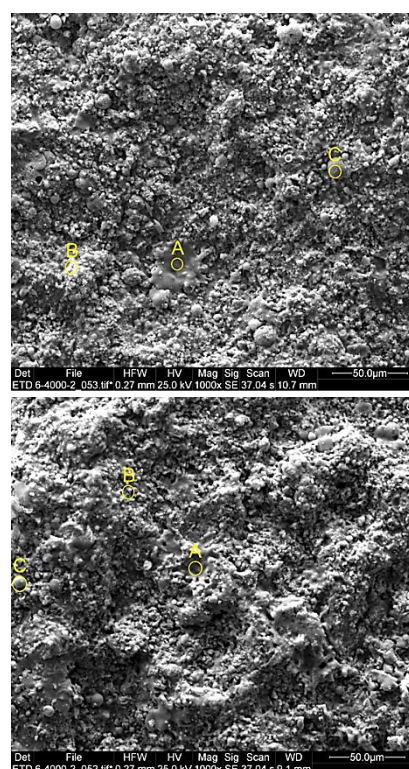
جدول ۵. عناصر پوشش Fe_3TiO_4 -NiCr

	%Fe (wt)	%Ti (wt)	%Mn (wt)	%O (wt)	%Cr (wt)	%Ni (wt)
A	۳۷/۸	۴/۰۹	۱/۰۴	۶/۱۹	۴۳/۸۸	۷/۳۵
B	۵۸/۹۲	۶/۸۱	۱/۱۲	۲۴/۰۱	۵/۶۹	۳/۳۵
C	۶۱/۴۶	۳/۱۲	۱/۵۶	۱۵/۱	۹/۴۷	۹/۰۲

تخلخل یکی دیگر از پارامترهای مورد ارزیابی در ساختار پوشش‌های پاشش حرارتی است. فضای خالی ایجاد شده در بین ذرات قرار گرفته روی هم عامل ایجاد تخلخل است. فضاهای خالی و حفرات بوجود آمده در هنگام پاشش معمولاً به عواملی مانند فرآیند پاشش، فاصله پاشش، میزان ذوب شدن و همچنین سرعت ذرات وابسته است [۱۲]. بهینه بودن هریک از این عوامل باعث کنترل تخلخل ساختار پوشش می‌شود [۱۵]. میزان تخلخل موجود در ساختار به شدت بر خواص خوردگی و سایشی مؤثر است [۱۶]. میانگین تخلخل پوشش Fe_3TiO_4 که بصورت نقاط تیره رنگ نشان داده شده در شکل (۶-الف) که توسط آنالیز تصویری انجام شد، برابر ۳/۱ درصد است. این در حالی است که با افزودن ذرات NiCr این مقدار به ۴/۰ درصد در شکل (۶-ب) کاهش یافته است. همچنین اندازه تخلخل‌ها در اثر اضافه کردن NiCr نسبتاً کاهش یافته است و این نشان از چگال و متراکم بودن پوشش Fe_3TiO_4 -NiCr است. اضافه کردن نیکل و کروم عامل کاهش سطح تماس Fe با شعله HVOF شده که مانع تشکیل لایه اکسیدی متخلخل شده است.



ذوب نشده در پوشش عمل کرده‌اند. اکسیژن مناطق B در هر دو پوشش بیشتر از دیگر نواحی است. دلیل آن می‌تواند به اکسیداسیون پودر در هنگام پاشش نسبت داد که بصورت ذرات نیمه ذوب باقی مانده‌اند. بیشترین درصد ناحیه C که بصورت ذره ذوب نشده است متعلق به Fe است. با مقایسه مناطق C هر دو پوشش می‌توان نتیجه گرفت که در اثر افزودن ذرات NiCr از مقدار Fe کاسته شده اما Ti تغییر چندانی نکرده و بصورت ثابت باقی مانده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که ذرات NiCr مطابق آنالیز EDS به صورت مناسب در تمام نقاط پوشش توزیع شده که باعث بهبود خواص پوشش می‌شود.

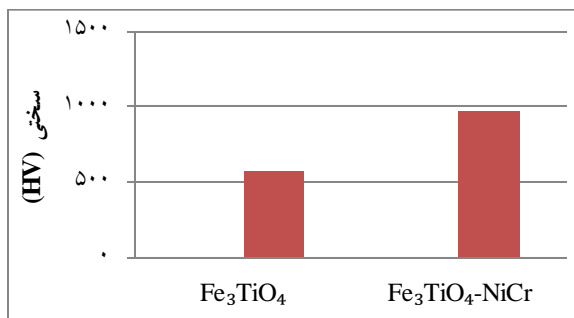


شکل ۵. تصاویر EDS گرفته شده از پوشش الف) Fe_3TiO_4 (ب)

Fe_3TiO_4 -NiCr

جدول ۴. عناصر پوشش Fe_3TiO_4

	% Fe (wt)	% Ti (wt)	% Mn (wt)	% O (wt)
A	۸۱/۸۳	۷/۱۵	۱/۷۹	۹/۲۳
B	۶۷/۴۶	۵/۸۵	۱/۱۹	۲۵/۵۱
C	۷۴/۹۵	۳/۶۱	۳/۱۸	۱۸/۲۶

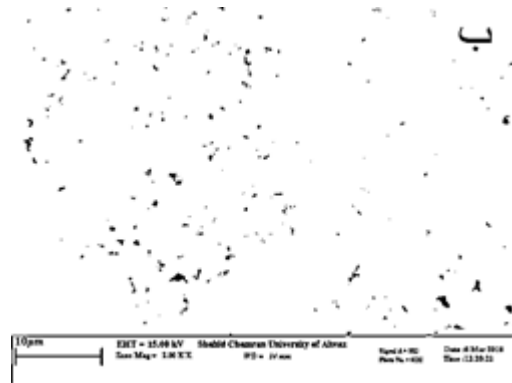


شکل ۷. میانگین سختی پوشش‌ها.

میزان زبری در پوشش‌های پاشش حرارتی به دلیل گرم شدن به هنگام پاشش و پهن شدن در اثر برخورد با سطح قیرلایه که باعث تشکیل لایه نازک یکنواخت شده، معمولاً پایین است. عوامل مختلفی همچون فاصله پاشش، زبری سطح زیر لایه، نسبت اکسیژن به سوخت می‌تواند بر زبری سطح تأثیرگذار باشند [۲۰]. از نواحی مختلف سطح پوشش Fe_3TiO_4-NiCr و Fe_3TiO_4 آزمون زبری سنجی به عمل آمد که میانگین زبری سطح پوشش Fe_3TiO_4 برابر $7/21 \mu m$ و برای پوشش Fe_3TiO_4-NiCr برابر $4/26 \mu m$ اندازه‌گیری شده است. نتایج حاصل از زبری سنجی پوشش‌ها بیانگر این است که پوشش Fe_3TiO_4-NiCr به دلیل توزیع مناسب ذرات ذوب شده و پر شدن حفرات و جاهای خالی منجر به کاهش تخلخل شده که دارای زبری کمی نسبت به پوشش Fe_3TiO_4 می‌باشد. بنابراین پوشش‌های ایجادشده از طریق فرآیند پاشش حرارتی از میزان زبری کمی برخوردار هستند [۲۱]. زبری سطح برای حفاظت در برابر خوردگی مهم است. زبری سطح پایین منجر به قرار گرفتن مساحت سطح کمتری در معرض محیط خورنده می‌شود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که زبری سطح پایین استعداد ابتلا به خوردگی را کاهش می‌دهد [۲۲].

نتیجه‌گیری

۱- خواص پوشش در اثر اضافه نمودن NiCr به پوشش Fe_3TiO_4 ارتقا پیدا نمود که تصاویر



شکل ۶. تصاویر برگرفته از آنالیز تصویری پوشش (الف Fe_3TiO_4 ب)

Fe_3TiO_4-NiCr

شکل (۷) میانگین میکرو سختی محاسبه شده برای پوشش Fe_3TiO_4-NiCr و Fe_3TiO_4 را نشان می‌دهد. تفاوت در سختی پوشش‌ها کاملاً مشهود است. این تفاوت می‌تواند متأثر از عواملی مانند تخلخل و جهت‌گیری آنها، ذرات ذوب شده و سریع منجمد شده، ذرات اکسیدی، اندازه دانه و مورفولوژی آنها باشد که بر سختی پوشش‌های پاشش حرارتی تأثیر بسزایی دارند [۱۷-۱۸]. بنا بر نتایج حاصل از تخلخل، مشاهده می‌شود که با افزایش ذرات سخت NiCr [۱۹] به پودر Fe_3TiO_4 که باعث کاهش تخلخل شده، سختی آن نیز افزایش یافته است. گرم شدن مناسب ذرات پودر حاوی NiCr باعث ایجاد لایه‌های ذوبی متراکم به همراه ذرات نیمه ذوب شده است. همچنین ذوب کمتر ذرات NiCr و حضور در خلل و فرج، از رشد بیشتر دانه‌ها جلوگیری کرده که در نتیجه باعث افزایش سختی نسبت به پوشش فاقد ذرات NiCr شده است. عامل دیگر بالا بودن سختی را می‌توان به ساختار لایه‌ای و چگال بودن پوشش‌های پاشش حرارتی مرتبط دانست که با افزودن ذرات نیکل کرم و قرار گرفتن در میان لایه‌های مذاب باعث متراکم شدن پوشش و بهبود چسبندگی شده است.

6. ک. ش. حموله، م. صالحی، توسعه پوشش‌های پاشش حرارتی HVOF کامپوزیتی استلایت ۶- کاربرد کروم و ارزیابی خواص آنها، علوم و مهندسی سطح ۲۶ (۱۳۹۴) ۴۸-۳۵.
۷. پیمان فرهپور، محمد مهدی خیر خواه، سید حامد میرطالب، حسین ادریس، اثر نرخ تغذیه پودر و نسبت اکسیژن در فرآیند HVOF بر رفتار خوردگی الکتروشیمیایی پوشش‌های NiCr، علوم و مهندسی سطح ۱۶ (۱۳۹۱) ۷۱-۸۵.
۸. م. طاهری، ک. زنگنه مدار، ض. والفی، بررسی تأثیر پارامترهای فرآیند HVOF بر ریزساختار و استحکام چسبندگی پوشش‌های پاششی NiCrAlY، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ۱۳۸۷.
۹. م. ا. اشکفتکی، م. عطارپور، ح. ادریس، ارزیابی مشخصه‌های ریزساختاری پوشش Stellite 6-WC/12%Co تولید شده به روش HVOF، علوم و مهندسی سطح ۳۱ (۱۳۹۶) ۲۶-۱۳.

10. Puetzp, Huangx, Limars, et al, *Characterization of transient oxide formation on CoNiAlY after heat treatment in vacuum and air*[j]. surface and coating Technology 205 (2012) 647-657.
11. H. S. Sidhu, B. S. Sidhu, S. Prakash, *Solid particle erosion of HVOF sprayed NiCr and Stellite coating*, Surface and coatings Technology 202 (2007) 232-238.
12. Li-Yong NI, Zi-Long Wu, Chun-gen Zhou, *Effects of surface modification on isothermal oxidation behavior of HVOF-sprayed NiCrAlY coatings*, Materials International 21 (2011) 173-179.
13. Q. Zhang, C. J. Li, C. X. Li, G. J. Yang, S. C. Lui, *Study of oxidation behavior of nanostructured NiCrAlY bond Coatings deposited by cold spraying*, Surface and coatings Technology 202 (2008) 3378-3384.
14. J. Gang, J. P. Morniroli, Grosdidier, *Nanostructures in thermal spray coatings*, Scripta Materialia 48 (2003) 1599-1606.
15. R. F. Bunshah, *Handbook of Hard coatings, Deposition Technologies*, 16. *Proprties and Applications*, Noyes Publications, (2001) New York, USA.
17. W. M. Zhao, Y. Wang, L-X. Dong, K-Y. Wu, J. Xue, *Corrosion mechanism of NiCrBSi*

- سطح مقطع حاکی از ایجاد پوششی یکنواخت و همگن را نشان میدهد.
- ۲- تخلخل یکی از مهمترین پارامترها در پاشش حرارتی است که از ۱/۴ درصد در پوشش Fe_3TiO_4 به ۰/۴ درصد در نمونه حاوی NiCr کاهش یافت.
- ۳- نتایج فازیابی نشان داد که در اثر اضافه نمودن NiCr منجر به تشکیل فازهای سخت مانند TiO_2 , Fe_2O_3 , $FeNi_3$ که باعث بهبود خواص پوشش از جمله سختی شدند.
- ۴- وجود مقادیر زیاد ذرات نیمه ذوب و ذوب نشده در پوشش Fe_3TiO_4 باعث افزایش میزان زبری شده که این میزان زبری با اضافه نمودن NiCr کاهش یافته است.

منابع:

1. I. Bregmann, *Corrosion inhibitors*, Macmillan, New York (1983).
۲. ایمان سلیمی نژاد، محسن صفوی، مهدی صالحی، جایگزینی پوشش کرم سخت با پوشش Cr_3C_2-NiCr پاشش حرارتی HVOF جهت بهبود مقاومت سایش قالب‌های بزرگ صنعتی، علوم و مهندسی سطح ۲۵ (۱۳۹۴) ۳۵-۴۷.
3. B. Wielage, A. Wank, H. Pokhmurska, T. Grund, C. Rupprecht, G. Reisel, E. Friesen, *Development and trends in HVOF spraying technology*, Surface & Coatings Technology 201(2006) 2032-2037
4. Jifu Zhang, Minliu, Jinobing Song, Chunming Deng, Changguang Deng, *Microstructure and corrosion behavior of Fe-based amorphous coating prepared by HVOF*, Journal of Alloy and compounds, (2017).
5. M. Jones, A. J. Horlock, P. H. Shipway, D. G. McCartney, J. V. Wood, *A comparison of the abrasive wear behavior of HVOF sprayed titanium carbide- and titanium boride cermet coating*, wear, 251 (2001) 1009-1016.

coatings deposited by HVOF, surf. Coat. Technol, 190(2005) 293-298.

18. S. Kamal, R. Jayaganthan, S. Prakash, *Mechanical and microstructural characteristics of detonation gun sprayed NiCrAlY+0.4wt% CeO₂ coatings on superalloys*, Materials chemistry and Physics, 122 (2010) 262-268.

19. R. A. Mahesh, R. Jayaganthan, S. Prakash, *Oxidation behavior of HVOF sprayed Ni-5Al coatings deposited on Ni-and Fe-based superalloys under cyclic condition*, Materials Science and Engineering A, 475 (2008) 327-335.

۲۰. مصطفی طهری، مرتضی شمعیان، مهدی صالحی، ارزیابی

خواص مکانیکی و اکسیداسیون پوشش کامپوزیتی نانوساختار

MCrAlY/YSZ تولید شده به روش HVOF، علوم و

مهندسی سطح ۱۵ (۱۳۹۱) ۲۳-۳۱.

21. J. Sturgeon, *ASM Handbook, Surface Engineering, Thermal spray Coatings*, 5 (2001) 1149.

22. C. Karaoglanli, H. Caliskan, M. Oge, K. M. Doleker, M. Hotamis, *Comparison of tribological properties of HVOF sprayed coating with different composition*, Surface and coatings Technology, Sct (2017), Doi: 10.1016/ J. Surf Coat.

23. S. M. Lee, W. G. Lee, Y. H. Kim, H. Jang, *Surface roughness and the corrosion resistance of 21Cr ferritic stainless steel*, corros. Sci. 63(2012) 404-409.