

تأثیر آماده‌سازی سطحی پوشش‌های پاشش حرارتی CoNiCrAlY بر رفتار اکسیداسیون این پوشش‌ها

مهدی صالحی

دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان

فرید نعیمی و محمد رضا رحیمی پور

پژوهشگاه سرامیک، پژوهشگاه مواد و انرژی

(دریافت مقاله : ۹۳/۱۱/۲۱ - پذیرش مقاله : ۹۴/۰۵/۱۸)

چکیده

در این پژوهش تأثیر فرآیندهای آماده‌سازی سطحی پوشش‌های CoNiCrAlY بر رفتار اکسیداسیون این پوشش‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور در ابتدا پوشش CoNiCrAlY به روش پاشش حرارتی HVOF بر روی زیرلایه اینکونل ۷۳۸ پوشش‌دهی شدند. به منظور بررسی تأثیر فرآیند آماده‌سازی سطحی و حذف لایه اکسیدی تشکیل شده بر سطح پوشش در حین فرآیند پاشش حرارتی، بر رفتار اکسیداسیون این پوشش‌ها، سطح یکی از نمونه‌ها با سنباده ۴۰ پولیش شد. سپس نمونه‌ها در دمای ۱۰۵۰ درجه سانتیگراد به مدت ۱۰۰ ساعت تحت آزمون اکسیداسیون قرار گرفتند. برای ارزیابی ریزساختاری، فازی و شرایط سطحی از میکروسکوپ الکترونی روبشی، آزمایش پراش پرتو ایکس و زبری سنج استفاده شد. نتایج نشان داد پولیش‌کاری سطحی پوشش و حذف لایه اکسیدی تشکیل شده بر سطح پوشش در حین پاشش حرارتی، منجر به بهبود رفتار اکسیداسیون پوشش CoNiCrAlY شده است. لایه اکسیدی تشکیل شده بر سطح این پوشش لایه متراکمی از $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ که از اکسیداسیون بیشتر پوشش جلوگیری کرده است و ثابت اکسیداسیون در این پوشش را به $(\text{gr}^2 \text{ cm}^{-4} \text{ h}^{-1}) \times 10^{-13} \times 0.84$ رسانده است. بررسی مورفولوژی سطحی لایه اکسیدی تشکیل شده بر سطح پوشش‌ها نشان داد که لایه اکسیدی تشکیل شده بر سطح نمونه پولیش‌شده، فازهای سوزنی شکل $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ هستند و فازهای تشکیل شده بر سطح نمونه پولیش نشده فازهای گلوله‌ای شکل اسپینل، NiO و CoO می‌باشند.

واژه‌های کلیدی: پوشش سد حرارتی، اکسیداسیون، HVOF

Effect of Surface Processing of CoNiCrAlY coatings on oxidation behavior of this coating

F. Naeimi, M. R. Rahimipour

Research Department of Ceramic Engineering, Materials and Energy Research Center

M. Salehi

Department of Materials Engineering, Isfahan University of Technology,

(Received 10 February 2015, accepted 9 August 2015)

Abstract

In this study, the effect of surface processing of CoNiCrAlY coatings on oxidation behavior of this coating has investigated. The HVOF method used for deposition of CoNiCrAlY coating on the Inconel 738 substrate. The surface of coatings polished with grand paper No. 40, For investigation effect of surface processing and removing of oxide layer that formed during thermal spray on oxidation behavior of CoNiCrAlY coating. Then the samples oxidized in 1050 °C for 100 hrs. The Scanning Electron Microscope (SEM), X-ray Diffraction and surface profilometer used for microstructure and topographical investigation. Results show that surface polishing of coatings caused to developing of oxidation behavior of CoNiCrAlY coatings. The formed oxide layer on the surface of this coating after 100 hrs oxidation is $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ that prevented of more oxidation of coating. The oxidation rate of coating with surface polishing calculated about $0.84 \times 10^{-13} (\text{gr}^2 \text{ cm}^{-4} \text{ h}^{-1})$. The oxide layer morphology formed on polished coating has globular-like morphology that researchers believed that this morphology related to $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ phase but in the non-polished coating, the surface morphology of oxide scale formed of polyhedral particles. This morphology related to spinel, CoO and NiO oxides.

Keywords: Thermal Barrier Coating, Oxidation, HVOF

E-mail of corresponding author: fnaeimi@merc.ac.ir

مقدمه

موثر است، بهبود شرایط سطحی لایه میانی است. به همین دلیل تاکنون تحقیقات زیادی در خصوص تاثیر تغییر پارامترهای سطحی لایه میانی بر رفتار اکسیداسیون و خوردگی دمای بالای این پوشش‌ها صورت گرفته است. از جمله این فرآیندها می‌توان به تاثیر فرآیند ساچمه‌زنی بر رفتار اکسیداسیون پوشش MCrAlY اشاره کرد [۶]. برخی از محققین معتقدند میزان زبری سطح و مورفولوژی زبری-ها نیز از عوامل موثر بر رفتار اکسیداسیون این پوشش‌ها هستند. تحقیقات برخی از آن‌ها نشان داده است که کاهش زبری سطحی، منجر به بهبود رفتار اکسیداسیون این پوشش‌ها شده است. برخی از آن‌ها نیز اعتقاد دارند، حذف اکسیدهای تشکیل شده بر سطح پوشش لایه میانی در حین پاشش حرارتی، باعث تشکیل یک لایه یکنواخت از α - Al_2O_3 بر سطح پوشش در حین فرآیند اکسیداسیون می‌شوند [۷ و ۸].

از دیگر پارامترهای موثر بر کیفیت پوشش‌های سد حرارتی، روش پوشش‌دهی آن است. امروزه نسل سوم سیستم‌های پاشش حرارتی سوخت-اکسیژن سرعت بالا (HVOF) به طور موفقیت آمیزی برای پاشش حرارتی مواد حساس به اکسیداسیون مانند MCrAlY استفاده می‌شوند. در این روش به دلیل انرژی کینتیکی بالای ذرات پودر، تغییر شکل پلاستیک شدیدی در آن‌ها اتفاق می‌افتد که این امر منجر به تشکیل پوششی کاملاً متراکم می‌شود. تراکم بالای این پوشش‌ها باعث شده است که برای پوشش‌دهی قطعات در معرض خوردگی کاربرد زیادی داشته باشد [۹ و ۱۰].

با توجه به مطالبی که ذکر شد، بررسی تاثیر تغییر پارامترهای سطحی بر رفتار اکسیداسیون پوشش‌های MCrAlY از اهمیت بالایی در افزایش طول عمر پوشش‌های سد حرارتی برخوردار است. اما با توجه به بررسی‌های انجام شده، تاکنون تحقیق جامعی بر روی تاثیر فرآیند سنباده‌زنی و حذف لایه اکسیدی تشکیل شده بر سطح پوشش، بر رفتار اکسیداسیون پوشش‌های ایجاد شده

استفاده از پوشش‌های سد حرارتی (TBC)، به منظور افزایش کارایی قطعاتی که در دمای بالا در قسمت‌های داغ توربین‌های گازی کار می‌کنند در سال‌های اخیر گسترش یافته است. پوشش سد حرارتی از جنس موادی با هدایت حرارتی کم هستند که وظیفه آن کاهش نرخ انتقال حرارت به سطح قطعات داغ است [۱ و ۲]. یک پوشش سد حرارتی از دو لایه اصلی تشکیل شده است. یک پوشش میانی MCrAlY که M در این پوشش‌ها نماینده Ni یا Co است و یک پوشش نهایی اکسید زیرکونیم پایدار شده با ایتریا (YSZ) با ماهیت سرامیکی، اجزای تشکیل‌دهنده این پوشش هستند [۳]. پوشش‌های TBC علاوه بر نقش سد حرارتی باعث افزایش مقاومت قطعات به پدیده‌های اکسیداسیون و خوردگی داغ نیز می‌شوند. همین امر باعث افزایش طول عمر سیستم‌های دمای بالا در شرایط کاری خشن شده است. محققین تاکنون مکانیزم‌های متعددی برای رفتار اکسیداسیون پوشش‌های MCrAlY ارائه داده‌اند. در تمامی این مکانیزم‌ها یک لایه اکسیدی حرارتی با چسبندگی مناسب به زیرلایه و پایداری ترمودینامیکی در دمای بالا بر سطح پوشش تشکیل می‌شود. تقریباً تمامی محققین بر این باورند تشکیل یک لایه اکسیدی α - Al_2O_3 بهترین شرایط را برای بیشترین طول عمر پوشش‌های سد حرارتی فراهم می‌آورد. اما تشکیل اکسیدهای دیگر مانند NiO، CoO، Cr_2O_3 و اکسیدهای اسپینل‌ها در لایه اکسید حرارتی منجر به ایجاد مکانیزم‌های تخریب و کندگی این پوشش‌ها می‌گردد [۴ و ۵].

یکی از مهمترین فاکتورهای موثر برای تعیین عمر کاری پوشش‌های سد حرارتی، پارامترهای آماده‌سازی پوشش است. به خصوص برای پوشش‌های سد حرارتی که به روش پاشش حرارتی تهیه می‌شوند، مقاومت به اکسیداسیون دمای بالا و خوردگی داغ به شدت به پارامترهای آماده‌سازی پوشش بستگی دارد. از جمله این پارامترها که به شدت بر رفتار دمای بالای این پوشش‌ها

جدول ۱. پارامترهای استفاده شده برای پوشش‌دهی به روش HVOF.

نرخ تغذیه پودر (g/min)	نرخ تزریق سوخت (mlit/min)	فاصله پاشش (cm)	نرخ تزریق اکسیژن (mlit/min)
۵۰	۲۵۰	۳۵	۸۳۰

برگشتی (BSE) مورفولوژی و ریزساختار نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. تخلخل سنجی پوشش‌ها با استفاده از استاندارد ASTM E2109 انجام شد. به منظور شناسایی فازهای موجود در محصول پس از پوشش‌دهی و آزمون اکسیداسیون از پراش پرتو ایکس (XRD) استفاده شد. آزمایش‌های پراش پرتوی ایکس با استفاده از دستگاه پراش پرتو ایکس مدل Philips X'Pert-MPD تحت ولتاژ ۴۰ kV و جریان ۳۰ mA انجام شد. در تمام آزمایش‌ها از پرتو ایکس Cu K α تکفام با طول موج ۱/۵۴۰۶ $^{\circ}$ A استفاده شد. اندازه گام ۰/۰۵ درجه، زمان توقف در هر گام ۱ ثانیه و محدوده روبش (2θ) بین ۱۰-۸۵ درجه انتخاب شد. فازیابی نمونه‌ها با استفاده از مقایسه زاویه پراش و شدت پیک الگوی پراش پرتو ایکس با مقادیر موجود در کارت‌های استاندارد انجمن آزمون و مواد آمریکا (ASTM) بوسیله نرم‌افزار X'pert مشخص و تعیین شد. در ادامه جزییات آزمایش‌های انجام شده آورده شده است.

زبری سنجی

برای بررسی تاثیر فرآیند سنباده‌زنی و حذف لایه اکسیدی بر روی رفتار پوشش‌های MCrAlY دو نمونه تهیه شد. برای حذف لایه اکسیدی تشکیل شده در حین پاشش، سطح نمونه با سنباده شماره ۴۰ سنباده‌زنی شد. برای حذف تاثیر زبری سطحی بر رفتار اکسیداسیون، پوشش به گونه ای سنباده‌زنی شد که زبری سطحی دو نمونه یکسان باشد. برای اندازه‌گیری زبری سطحی و رسم پروفیل زبری سطحی، از دستگاه زبری‌سنج MarSurf مدل PS1 استفاده شد.

به روش HVOF انجام نشده است. به همین دلیل در این تحقیق سعی شده است تا تاثیر فرآیند سنباده‌زنی و حذف لایه اکسیدی، بر رفتار اکسیداسیون پوشش‌های MCrAlY مورد بررسی قرار گیرد.

مواد و روش تحقیق

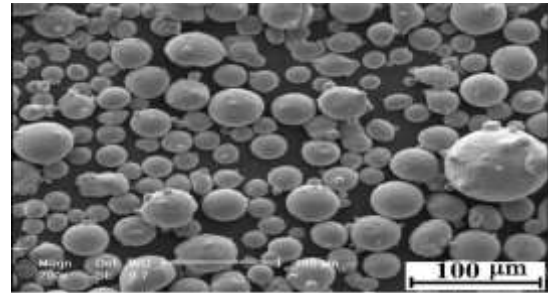
در این پژوهش از سوپر آلیاژ پایه نیکل اینکونل ۷۳۸ که در ساخت پره‌های توربین‌های گازی استفاده می‌شود به عنوان زیرلایه استفاده شد. پودر CoNiCrAlY گرید 4700 DIAMALLOY ساخت شرکت SuzerMetco به عنوان پودر اولیه استفاده شد. پوشش مورد نظر به روش HVOF و با استفاده از دستگاه تجاری MET JET III و ساخت شرکت Metallisation از سیستم‌های نسل سوم با قطر نازل ۱۰ میلیمتر و سوخت کروزن در شرکت پودرافشان بر روی زیرلایه اعمال شد. پارامترهای پاشش که در جدول ۱ آمده است براساس پارامترهای مورد استفاده برای پوشش‌های تجاری انتخاب شد. تخلخل سنجی پوشش‌ها و بررسی سطوح اکسیداسیون با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل SEM Philips M130 مجهز به سیستم آنالیز طیف‌سنج انرژی (EDS) تحت ولتاژ ۴۰kV و جریان ۳۰mA صورت گرفت. به منظور بررسی ذرات پودر و پوشش‌ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی باید نمونه رسانا باشد تا الکترون‌های جمع شده بر روی سطح از آنجا خارج شود. به همین دلیل نمونه‌ها قبل از قرار گرفتن در محفظه خلأ میکروسکوپ، به وسیله دستگاه پوشش‌دهی پراکنشی، روکشی از طلا بر روی آن‌ها داده می‌شود. سپس به کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی و با استفاده از آشکارگرهای الکترون‌های ثانویه (SE) و الکترون‌های

جدول ۲. ترکیب شیمیایی پودرهای مورد استفاده به عنوان مواد اولیه.

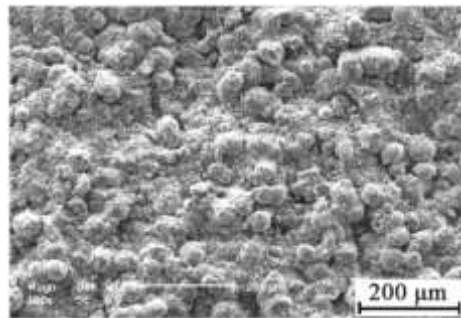
Y	Al	Cr	Ni	Co	
۰.۵	۸	۲۱	۳۲	باقیمانده	CoNiCrAlY

پودر است. پودرهای با مورفولوژی کروی معمولاً بهترین کیفیت را ارائه می دهند و هرچه توزیع ذرات پودر یکنواخت تر باشد کیفیت پوشش بهبود می یابد [۱۱]. تصاویر میکروسکوپ الکترونی پودر مورد استفاده در شکل ۱ و ترکیب شیمیایی آن در جدول ۲ آورده شده است.

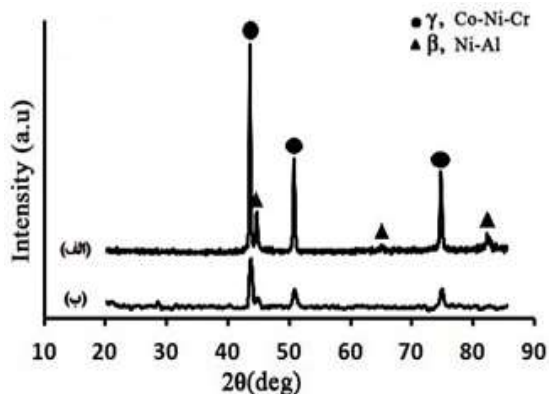
مشاهده می شود پودرهای مورد استفاده دارای ابعاد (۱۵-۵۰ μm) و مورفولوژی کاملاً کروی که برای پاشش حرارتی HVOF مناسب هستند، است. پودرهای مورد نظر با پارامترهای ذکر شده در قسمت روش تحقیق، بر روی



شکل ۱. مورفولوژی پودر MCrAlY استفاده شده.



شکل ۲. مورفولوژی سطحی پوش اعمال شده به روش HVOF



شکل ۳. الگوی پراش پرتو ایکس پودر (الف) پودر MCrAlY (ب) پوشش MCrAlY

زیرلایه پوشش دهی شد که مورفولوژی سطحی پوشش به دست آمده در شکل ۲ نشان داده شده است. ذرات پودر در حین پاشش حرارتی، بسته به شرایط و پارامترهای پاشش، مانند اندازه و مورفولوژی پودر، سختی زیرلایه، دما، سرعت و انرژی سنیتیکی ذرات پودر، به صورت مذاب،

تخلخل

برای ارزیابی تاثیر پارامترهای پاشش حرارتی بر تخلخل پوشش از تصاویر میکروسکوپ الکترونی و روش آنالیز تصویری استفاده شد. تصاویر میکروسکوپ الکترونی از سطح مقطع پوشش و با بزرگنمایی ۵۰۰ برابر تهیه شدند. اساس کار روش آنالیز تصویر درجه تفکیک تصویر است. به همین منظور از یک منطقه خاص هم تصاویر الکترون برگشتی و هم الکترون ثانویه تهیه شد تا با مقایسه آنها تخلخل های واقعی شناسایی شوند. با اندازه گیری میزان تخلخل در ۱۰ ناحیه مختلف، تخلخل پوشش گزارش شد.

اکسیداسیون

برای ارزیابی تاثیر فرآیند آماده سازی سطحی پوشش ها بر مقاومت به اکسیداسیون آنها، آزمون اکسیداسیون دمای بالا در اتمسفر محیط و در دمای ۱۰۵۰ درجه سانتیگراد بر روی پوشش ها انجام شد. نمونه ها پس از گذشت مدت زمان های معین، از کوره بیرون آورده شده و پس از خنک شدن در هوا با ترازیوی با دقت ۰/۱ mgr توزین شدند.

نتایج و بحث

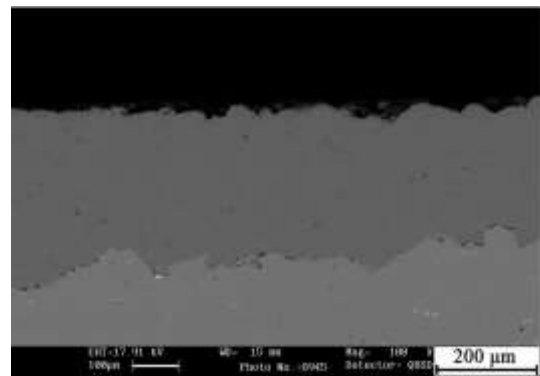
یکی از مهمترین پارامترهای مؤثر بر کیفیت پوشش های حاصل از فرآیند HVOF مورفولوژی، توزیع و اندازه ذرات

شکل ۴ تصویر سطح مقطع پوشش به دست آمده را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود پوشش ضخامتی می تواند پارامترهای مؤثر بر اندازه دانه پوشش ها باشند. همانطور که مشاهده می شود، پوشش ضخامتی در حدود ۲۰۰ میکرومتر دارد که برای پوشش های پاشش حرارتی ضخامتی بهینه است. در ناحیه فصل مشترک، مشاهده می شود پوشش و زیرلایه از چسبندگی مناسبی به زیرلایه برخوردار است و قفل های مکانیکی بین پوشش و زبری های زیرلایه به خوبی با یکدیگر اتصال برقرار کرده اند. با استفاده از نرم افزار آنالیز تصویری، آزمون تخلخل سنجی انجام شد که نشان داد تخلخل پوشش کمتر از ۱٪ است. این میزان تخلخل برای پوشش های پاشش حرارتی به دست آمده از روش HVOF، بسیار ایده آل است. تحقیقات محققان نشان می دهد که مورفولوژی پودر پاشش حرارتی تاثیر زیادی بر میزان تخلخل پوشش دارد. به طور معمول پودرهای با مورفولوژی کروی کمترین میزان تخلخل و بهترین کیفیت پوشش را ایجاد می نمایند [۱۱]. به منظور بررسی زبری سطح پوشش ها قبل از اکسیداسیون، از سطح پوشش ها پروفیل زبری سطحی به دست آمد. تصاویر پروفیل زبری سطحی این پوشش ها در شکل ۵ نشان داده است. همانطور که مشاهده می شود هر ۲ نمونه تقریباً زبری یکنواختی دارند. برای بیان زبری سطوح از مولفه های متفاوتی استفاده می شود. با توجه به اینکه زبری نمونه ها در پژوهش حاضر، تقریباً یکنواخت بود، تصمیم بر آن شد تا از معیار Ra استفاده شود. این معیار بیانگر زبری میانگین در سطح مورد بررسی است. مقادیر به دست آمده برای زبری پوشش ها پس از آماده سازی سطحی در جدول ۳ گزارش شده است. پس از آماده سازی سطوح پوشش ها، آزمون اکسیداسیون مطابق فرآیند توضیح داده شده در قسمت روش تحقیق بر روی پوشش ها انجام شد.

نیمه مذاب و ذوب نشده، در پوشش ظاهر می شوند [۱۲] و [۱۳]. همانطور که مشاهده می شود ذرات پودر تقریباً شکل اولیه خود را حفظ کرده اند و ذرات نسبتاً کروی بر روی سطح پوشش قرار گرفته اند.

شکل ۳ الگوی پراش اشعه ایکس مربوط به پوشش را نشان می دهد. برای بررسی بهتر تأثیر حرارت جذب شده توسط ذرات پودر بر ساختار آنها، الگوی پراش پرتو ایکس مربوط به پودر مورد استفاده، نیز در این شکل آورده شده است.

مقایسه الگوی پراش پرتو ایکس مربوط به پودر و پوشش نشان می دهد که پهنای پیک های مربوط به فاز ۷ در الگوی پراش پوشش بیشتر از پودر است. بعضی از محققان مانند ریچر و ژانگ [۱۴، ۱۵] در تحقیقاتی که بر روی پاشش حرارتی پودر تجاری CoNiCrAlY به روش پاشش سرد گاز دینامیکی^۱ (CGDS) انجام دادند به نتایج مشابهی دست یافتند. آنها بر این باورند که ریز شدن دانه ها و ایجاد

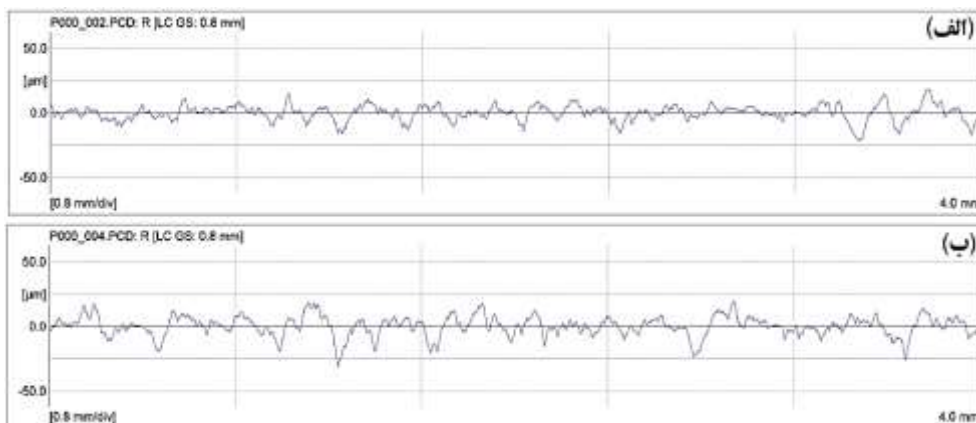


شکل ۴. تصویر میکروسکوپ الکترونی از سطح مقطع پوشش

MCrAlY

کرنش های داخلی باعث پهن شدن پیک ها شده است. با توجه به نتایج به دست آمده مشخص است که دما، سرعت و انرژی سینتیکی ذرات پودر، ذوب یا عدم ذوب شدن ذرات پودر در حین پاشش را تحت تأثیر قرار می دهد.

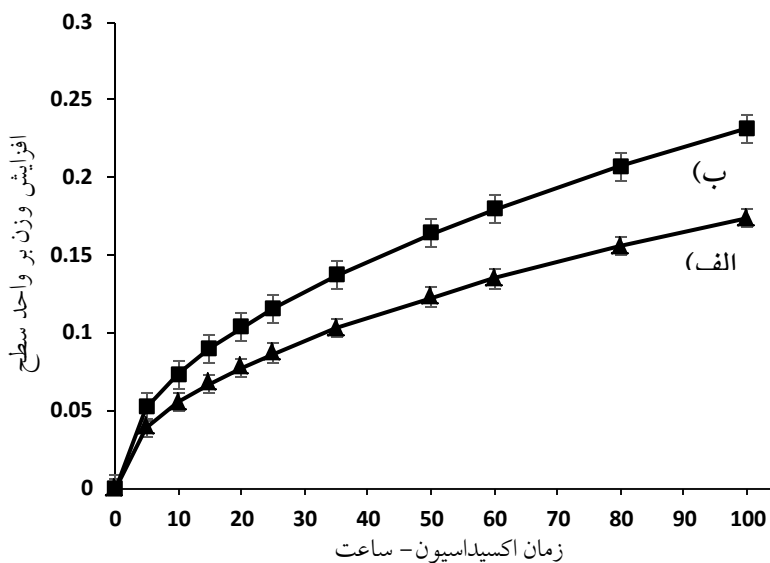
^۱Cold Gas Dynamic Spraying



شکل ۵. تصاویر پروفیل زبری سطحی (الف) پوشش سنباده‌زنی شده (ب) پوشش فاقد آماده‌سازی سطحی.

جدول ۳. مقادیر زبری پوشش‌ها پس از آماده‌سازی سطحی.

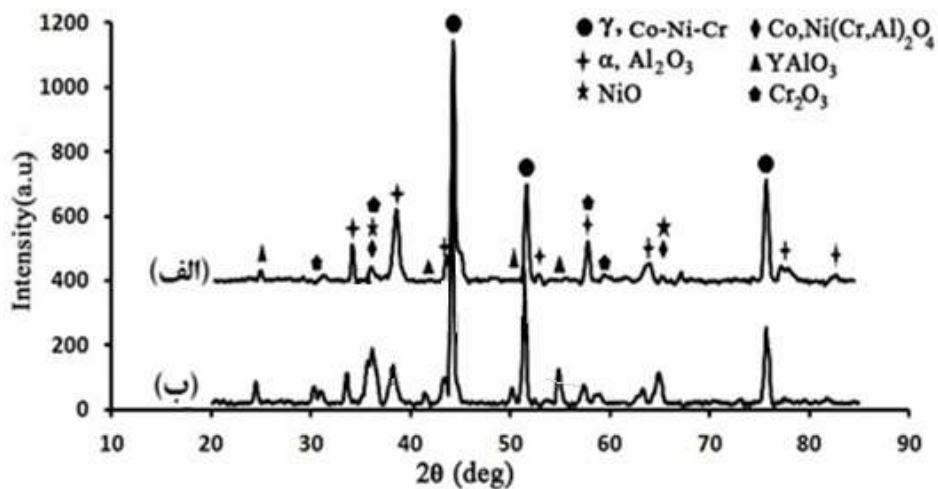
پوشش	مولفه سطح Ra (μm)
پوشش آماده‌سازی سطحی شده	۶.۱
پوشش بدون آماده‌سازی سطحی	۶.۹



شکل ۶. نمودار افزایش وزن برحسب زمان اکسیداسیون پوشش در دمای ۱۰۵۰°C به مدت ۱۰۰ ساعت (الف) پوشش آماده‌سازی سطحی شده، (ب) پوشش بدون آماده‌سازی سطحی.

جدول ۴. مقادیر ثابت اکسیداسیون (kp) برای اکسیداسیون پوشش در دمای ۱۰۵۰°C به مدت ۱۰۰ ساعت.

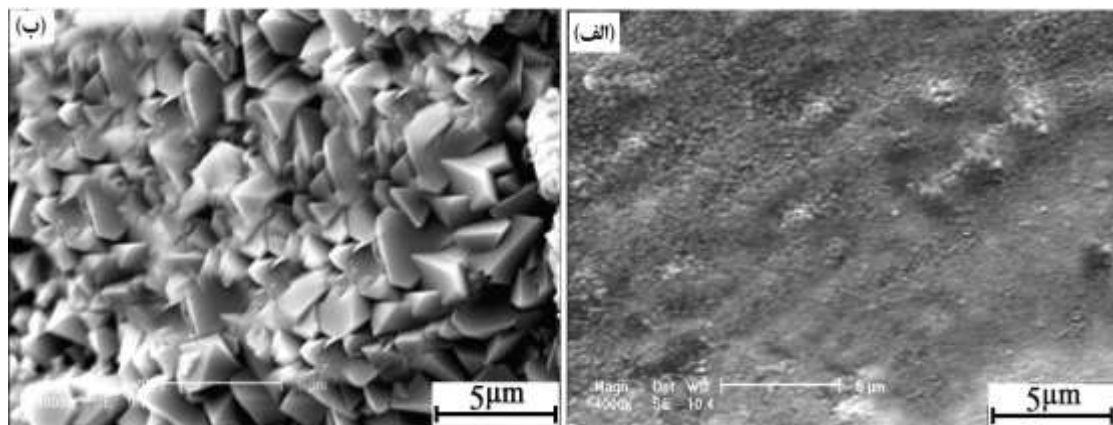
پوشش	نرخ اکسیداسیون (kp) (gr ² cm ⁻⁴ h ⁻¹)
پوشش آماده سازی سطحی شده	0.84×10^{-13}
پوشش بدون آماده سازی سطحی	1.65×10^{-13}



شکل ۷. الگوی پراش پرتو ایکس پوشش‌ها (الف) پوشش آماده‌سازی سطحی شده (ب) پوشش بدون آماده‌سازی سطحی، پس از اکسیداسیون در دمای 1050°C به مدت ۱۰۰ ساعت.

محققان نشان می‌دهد پوشش‌های مورد بررسی نرخ اکسیداسیون بسیار کمی را از خود نشان داده‌اند [۱۸]. کای و همکاران معتقدند که وجود تخلخل در پوشش باعث افزایش نرخ اکسیداسیون می‌شود. بر اساس نظر ایشان تخلخل یک مسیر آزاد برای نفوذ اکسیژن و یون‌های خورنده به درون پوشش هستند. به همین دلیل پوشش‌های متخلخل معمولاً نرخ اکسیداسیون زیادی از خود نشان می‌دهند [۱۹]. اما چون در پوشش مورد بررسی میزان تخلخل بسیار کمی مشاهده شد، نرخ اکسیداسیون بسیار پایین است. برای بررسی بیشتر بر روی سطح نمونه‌هایی که تحت اکسیداسیون قرار گرفتند، آزمون XRD انجام شد که نتایج آن در شکل ۷ آورده شده است. از مقایسه الگوی پراش اشعه ایکس مربوط به دو نمونه، مشخص است در نمونه آماده‌سازی سطحی شده شدت پیک‌های مربوط به $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ شدت بالاتری دارند و در مقابل پیک‌های مربوط به فازهای اسپینل در نمونه بدون آماده‌سازی سطحی از شدت بالاتری نسبت به نمونه‌های آماده‌سازی سطحی شده برخوردار هستند. شکل ۸ مورفولوژی سطحی لایه‌های اکسیدی تشکیل شده بر سطح پوشش‌های آماده‌سازی

نتایج نشان داد که نمونه‌ها در حین اکسیداسیون با افزایش وزن مواجه بودند و در نهایت میانگین افزایش وزن آنها به عنوان افزایش وزن پوشش گزارش شد. شکل ۶ نمودار افزایش وزن برحسب زمان اکسیداسیون را نشان می‌دهد. در این شکل مشاهده می‌شود برای هر دو نمونه‌ها، نرخ اکسیداسیون که همان شیب نمودار است، در ابتدا سریع بوده و با مرور زمان این مقدار کاهش یافته است. ماهش و همکاران معتقدند که در اثر اکسیداسیون سطح پوشش که هیچ لایه اکسیدی محافظی ندارد، این پدیده به وجود می‌آید [۱۶]. در حقیقت این نوع اکسیداسیون مربوط به موادی است که در اثر اکسیداسیون، یک لایه اکسیدی یکنواخت و متراکم بر سطح آنها تشکیل می‌شود که مانع از نفوذ بیشتر اکسیژن می‌شود. با گذشت زمان، چون ضخامت این لایه اکسیدی افزایش می‌یابد، نفوذ اکسیژن سخت‌تر می‌گردد، در نتیجه نرخ اکسیداسیون کاهش می‌یابد [۱۷]. به این نوع از منحنی‌ها، منحنی پارابولیک می‌گویند. به منظور بررسی بیشتر فرآیند اکسیداسیون، ثابت اکسیداسیون که معیار مناسب‌تری برای مقایسه نرخ اکسیداسیون پوشش‌ها است، در زمان ۱۰۰ ساعت محاسبه شد و در جدول ۴ ارائه گردید. مقایسه مقادیر Kp به دست آمده با نتایج دیگر



شکل ۸. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح (الف) پوشش آماده‌سازی سطحی شده (ب) پوشش بدون آماده‌سازی سطحی، پس از اکسیداسیون در دمای 1050°C به مدت ۱۰۰ ساعت.

پتزو و همکاران [۱۹] معتقدند که این مورفولوژی هرمی شکل مربوط به فازهای اکسیدی غنی از Al است. اما لاوناردو و همکاران [۲۰] در پژوهشی که بر روی پوشش تجاری MCrAlY انجام دادند، نشان دادند این بلورهای چند وجهی که پس از ۱۰۰ ساعت اکسیداسیون در دمای 1050°C بر روی پوشش آماده‌سازی سطحی نشده تشکیل شده است، لایه اکسیدی فازهای اسپینل هستند. از مقایسه نتایج XRD و نتایج افزایش وزن در حین اکسیداسیون به خوبی می‌توان فهمید لایه اکسیدی $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ که بر سطح نمونه پولیش شده بوجود آمده است، به خوبی توانسته است از اکسیداسیون بیشتر پوشش جلوگیری کند. بعضی از محققین معتقدند که ماهیت و جنس اکسیدهای تشکیل شده بر سطح پوشش در طی فرآیند پاشش حرارتی، بر رفتار اکسیداسیون پوشش‌ها تأثیر زیادی دارد [۲۱]. تانگ و همکاران [۲۰] معتقدند وجود اکسیدهای سطحی که در حین پاشش حرارتی، بر سطح پوشش بوجود می‌آیند منشاء جوانه‌زنی اکسیدهایی از قبیل اکسیدهای اسپینل و اکسیدهای نیکل، کبالت و کروم می‌شوند. شاید در اینجا نیز لایه اکسیدی سطحی تشکیل شده در حین پاشش،

سطحی شده پس از ۱۰۰ ساعت اکسیداسیون را نشان می‌دهد. بر اساس تحقیقات انجام شده توسط دیگر محققان، لایه اکسیدی تشکیل شده بر سطح پوشش‌های MCrAlY که مقاومت به اکسیداسیون مناسبی از خود نشان می‌دهند، معمولاً از انواع اکسیدهای آلومینیم مانند θ و به ویژه α تشکیل شده است که لایه α پایدارترین اکسید، در بین اکسیدهای آلومینیم است. مادر پوشش‌هایی که مقاومت به اکسیداسیون آن‌ها ضعیف اعلام شده است، لایه اکسیدی مخلوطی از اکسیدهای نیکل، کروم، آلومینیم و اکسیدهای اسپینل است. در شکل ۸ که مربوط به مورفولوژی لایه اکسیدی تشکیل شده بر سطح پوشش آماده‌سازی سطحی شده است، مشاهده می‌شود پس از ۱۰۰ ساعت اکسیداسیون ذراتی گلوله‌ای شکل بر سطح پوشش جوانه‌زنی و رشد کرده‌اند. محققین این مورفولوژی را مربوط به $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ دانسته‌اند [۱۹]. اما در پوشش‌های آماده‌سازی سطحی نشده، اکثریت سطح را لایه اکسیدی با مورفولوژی چند وجهی تشکیل داده است. مشاهده می‌شود که تیغه‌های هرمی شکل بر سطح پوشش جوانه‌زنی و رشد کرده‌اند.

4. Q. Zhang, C. J. Li, C. X. Li, G. J. Yang, and S. C. Lui, *Study of oxidation behavior of nanostructured NiCrAlY bond coatings deposited by cold spraying*, Surface & Coatings Technology, 202(2008)3378–3384.
5. D. Mercier, C. Kaplin, G. Goodall, G., Kim, and M. Brochu, *Parameters influencing the oxidation behavior of cryomilled CoNiCrAlY*, Surface & Coatings Technology, 205(2010)2546–2553.
6. Z. Hui, G. S. Kaia, L. H. Fei, X. H. Bin, Z. C. Gang, and W. Lu, *Effects of Shot Peening Process on Thermal Cycling Lifetime of TBCs Prepared by EB-PVD*, Chinese Journal of Aeronautics, 20(2007)145-147.
7. W. Brandl, G. Marginean, D. Maghet, and D. Utu, *Effects of specimen treatment and surface preparation on the isothermal oxidation behaviour of the HVOF-sprayed MCrAlY coatings*, Surface & Coatings Technology, 188–189 (2004)20–26.
8. D. Zhang, S. Gong, H. Xu, and Z. Wu, *Effect of bond coat surface roughness on the thermal cyclic behavior of thermal barrier coatings*, Surface & Coatings Technology 201(2006)649–653.
9. L. A. F. Tang, G. E. Kim, *Improvement in oxidation behavior of nanostructured CoNiCrAlY bond coat dispersed with nonosized alumina particles*, University of California Energy Institute's (UCEI) Energy Policy and Economics Working Paper Series, 2002.
10. L. A. F. Tang, J. M. Schoenung, *Characterization of oxide scales formed on HVOF NiCrAlY coatings with various oxygen contents introduced during thermal spraying*, Scripta Materialia, 51(2004)25-29.
11. C. J. Li, W. Ya. Li, *Effect of sprayed powder particle size on the oxidation behavior of MCrAlY materials during high velocity oxygen-fuel deposition*, Surface and Coatings Technology, 162(2002)31-41.
12. S. Brossard, P. R. Munroe, and M. M. Hyland, *Study of the Splat Formation for*

باعث شده است که شرایط برای رشد لایه اکسیدی تشکیل شده از اکسیدهای غیرمترکم مساعد باشد [۲۰].

نتیجه‌گیری

- ۱- ایجاد کرنش‌های داخلی در ذرات پودر در حین پاشش باعث شده است که پیک‌های اصلی MCrAlY پس از پوشش‌دهی دچار پهن‌شدگی شوند.
- ۲- پوشش آماده‌سازی سطحی شده، نسبت به پوشش دیگر نرخ اکسیداسیون کمتری را از خود نشان داده است.
- ۳- برخلاف پوشش آماده‌سازی نشده، لایه اکسیدی تشکیل شده بر سطح پوشش سنباده زده شده، متشکل از یک لایه مترکم از $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ است. حذف ذرات اکسیدی تشکیل شده در حین پوشش از تشکیل فازهای اکسیدی ناخواسته در پوشش جلوگیری کرده است.
- ۴- مورفولوژی لایه اکسیدی تشکیل شده بر سطح پوشش آماده‌سازی نشده، مربوط به فازهای اسپینل است. همچنین مورفولوژی لایه اکسیدی تشکیل شده بر سطح پوشش سنباده زده شده به فاز $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ نسبت داده شده است.

منابع

1. K. Bobzin, T. Schlafer, K. Richardt, and M. Bruhl, *Development of oxide dispersion strengthened MCrAlY coatings*, Thermal Spray Technology, 17(2008)853.
2. L. Zhao, M. Parco, and E. Lugscheider, *Wear behaviour of Al₂O₃ dispersion strengthened MCrAlY coating*, Surface and Coatings Technology, 184(2004)298-306.
3. L. Ajdelsztajn, D. Hulbert, A. Mukherjee, and J. M. Schoenung, *Creep deformation mechanism of cryomilled NiCrAlY bond coat material*, Surface & Coatings Technology, 201(2007)9462-9467.

21. D. Mercier, B. D. Gauntt, and M. Brochu, *Thermal stability and oxidation behavior of nanostructured NiCoCrAlY coatings*, Surface & Coatings Technology, 205(2011)4162–4168.
22. D. Mercier, B. D. Gauntt, and M. Brochu, *Thermal stability and oxidation behavior of nanostructured NiCoCrAlY coatings*, Surface & Coatings Technology, 205(2011)4162–4168.
13. S. W. Myoung, Z. Lu, Y.G. Jung, B. Jang, U. Paik, *Control of bond coat microstructure in HVOF process for thermal barrier coatings*, Surface & Coatings Technology, 203(2014)65-74
14. P. Richer, A. Zúñiga, M. Yandouzi, B. Jodoin, *CoNiCrAlY microstructural changes induced during Cold Gas Dynamic Spraying*, Surface & Coatings Technology, 203(2008)364-371.
15. J. Lee, *Grain Growth of Nanocrystalline Ni Powders Prepared by Cryomilling*, Metallurgical and Materials Transactions A, 32(2001)3109-3115.
16. R. A. Mahesh, R. Jayaganthan, and S. Prakash, *A study on the oxidation behavior of HVOF sprayed NiCrAlY–0.4 wt.% CeO₂ coatings on superalloys at elevated temperature*, Materials Chemistry and Physics, 119(2010)449–457.
17. T. Kai, Z. Xiang, C. Hua, and Z. J. Shan *Oxidation and hot corrosion behaviors of HVOF-sprayed conventional and nanostructured NiCrC coatings*, trans. Nonferrous met. Soc. China, 19(2009)1151-1160.
18. W. Brandle, D. Toma, J. Kruger, H. J. Grabke and G. Matthaus, *The Oxidation behaviour of HVOF thermal sprayed MCrAlY coatings*, Surface and Coatings Technology, 94(1997)21-26.
19. P. Puetz, X. Huang, R. S Lima, Q. Yang, and L. Zhao, *Characterization of transient oxide formation on CoNiCrAlY after heat treatment in vacuum and air*, Surface & Coatings Technology, 205(2010)647–657.
20. M. Shibata, S. Kuroda, H. Murakami, M. Ode, M. Watanabe, Y. Sakamoto, *Comparison of Microstructure and Oxidation Behavior of CoNiCrAlY Bond Coatings Prepared by Different Thermal Spray Processes*, Materials Transactions, 47(2006)1638-1642.