

رفتار اکسیداسیون سیکی و همدمای پوشش نانوساختار MCrAlY اعمال شده به روش پاشش حرارتی

فرزین قدمی^{۱*}، علیرضا صبور روح اقدم^۲، سهیل قدمی^۱، بهنوش نوایی فرد^۳

۱ دکتري، بخش مهندسی مواد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۲ استاد، بخش مهندسی مواد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۳ دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

* نویسنده مسئول: فرزین قدمی f.ghadami@modares.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۲۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۱/۲۷

چکیده

در بررسی حاضر، ابتدا پودر نانوساختار MCrAlY با استفاده از روش آسیای مکانیکی تهیه شده و سپس پوشش نانوساختار با استفاده از روش پاشش حرارتی بر روی زیرلایه فولادی اعمال شد. سپس مشخصه‌های ساختاری و رفتار اکسیداسیون همدمای و سیکی پوشش‌های نانوساختار در مقایسه با پوشش‌های متداول مورد ارزیابی و تجزیه و تحلیل قرار گرفت. ارزیابی‌های ساختاری و فازی پودرها و پوشش‌های شکل گرفته از آنها توسط روش‌های میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM)، میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM)، آنالیز عنصری EDS و آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD) انجام شد. جهت بررسی اکسیداسیون دما بالای پوشش‌ها از روش‌های اکسیداسیون همدمای و سیکی در بترتیب در دماهای ۱۰۰۰ و ۱۱۰۰ درجه سانتیگراد استفاده شد. نتایج اکسیداسیون نشان داد که پوشش نانوساختار MCrAlY، مقاومت و پایداری در برابر اکسیداسیون همدمای و سیکی بالاتری را نسبت به پوشش متداول از خود نشان می‌دهد. بر همین اساس افزایش مقاومت به اکسیداسیون در پوشش نانوساختار MCrAlY به دلیل کنترل رشد لایه اکسیدی و با مورفولوژی ریزتر و افزایش چسبندگی آن به زیر لایه نسبت داده می‌شود.

کلیدواژه: آسیای مکانیکی، پوشش نانوساختار MCrAlY، پاشش حرارتی، رفتار اکسیداسیون

Isothermal and Cyclic Oxidation Behavior of the Nanostructured MCrAlY Coatings Deposited by Thermal Spraying Process

F. Ghadami^{1*}, A. Sabour Rouh Aghdam¹, S. Ghadami¹, B. Navaee Fard²

1. College of Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

2. School of Metallurgy and Materials Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

* Corresponding author: Email: f.ghadami@modares.ac.ir

Submission: 2021, 11, 19 Acceptance: 2022, 04, 16

Abstract

Conventional and nanostructured NiCoCrAlY coatings were deposited developed using the high-velocity oxy-fuel (HVOF) thermal spraying technique. The nanostructured NiCoCrAlY powder feedstock for the coatings was produced by the ball milling method. In this regard, the ball-milling method was used to produce the nanostructured NiCoCrAlY powder feedstock. The microstructures examinations of the as-received and nanostructured powders as well as their developed coatings were analyzed investigated by using X-ray diffraction (XRD), field emission scanning electron microscope (FESEM) equipped with energy-dispersive electron dispersed X-ray spectroscopy (EDS), and a transmission electron microscope (TEM). Due to the evaluation of the oxidation kinetics, the free-standing coating specimens were subjected to the isothermal and cyclic oxidation testing at 1000 and 1100 °C respectively, under a laboratory air atmosphere. The results indicated that the as-received NiCoCrAlY coating had a parabolic oxidation behavior in short- and long-term oxidation exposure tests. For the nanostructured NiCoCrAlY coating, in contrast, the long-term oxidation kinetics deviated from parabolic behavior and showed instead sub-parabolic rate behavior. The obtained results also exemplified revealed that the nanostructured NiCoCrAlY coating had a greater oxidation resistance for to both cases of isothermal and cyclic conditions on account of the formation of a dense and slow-growing Al₂O₃ layer on the coating surface.

Keywords: Ball milling; Nanostructured MCrAlY coating; Thermal spraying; Oxidation behavior

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر کاربرد پوشش‌های MCrAlY برای دستیابی به دماهای بالاتر توربین‌ها جهت بازدهی بیشتر، رشد چشمگیری داشته است. به‌طوری که در توربین‌های نسل جدید با توان بالا استفاده از پوشش‌های پیشرفته‌ای که بتوانند دماهای بالاتری را در مدت زمان‌های طولانی‌تری تحمل کنند از اهمیت بسیار بالایی برخوردار بوده است [۳-۱]. قبل از کشف پوشش‌های MCrAlY، پوشش‌های نفوذی آلومینیدی توانسته بودند بطور گسترده‌ای در قطعات داغ توربین‌ها مورد استفاده قرار بگیرند به نحوی که این پوشش‌ها همچنان در کاربردهای دما بالا بکار برده می‌شوند [۴ و ۵]. اما برخلاف پوشش‌های نفوذی (شیمیایی) که ترکیب شیمیایی ایجاد شده در آنها، علاوه بر عناصر خارجی، به ترکیب شیمیایی سوپر آلیاژ وابسته است، در پوشش‌های روکشی، پوشش‌ها از طریق واکنش با زمینه شکل نمی‌گیرد بلکه در این پوشش‌ها از یک ماده پیش آلیاژ مثل پودر استفاده می‌کنند که ترکیب شیمیایی این ماده اولیه ترکیب پوشش را مشخص می‌کند [۶ و ۷].

به طور مقایسه‌ای، پوشش‌های روکشی MCrAlY عملکرد بهتری را در تامین مقاومت به خوردگی داغ و اکسیداسیون نسبت به پوشش‌های نفوذی از خود نشان می‌دهند. البته بسته به درصد عناصر تشکیل دهنده پوشش (که می‌تواند علاوه بر نیکل، کبالت، کروم، آلومینیم و ایتیم و شامل عناصر افزودنی دیگر هم باشد) می‌توان گستره وسیعی از شرایط کاربردی با توجه به مقاومت به خوردگی دمای بالا، اکسیداسیون و یا هر دو را ایجاد کرد و همین امر عامل برتری پوشش‌های MCrAlY نسبت به پوشش‌های نفوذی محسوب می‌شود [۸].

در مقایسه، شایع‌ترین روش اعمال پوشش‌های MCrAlY، روش‌های پاشش حرارتی است. پوشش‌های MCrAlY را عموماً به وسیله فرآیندهای پاشش حرارتی مثل APS، LPPS و HVOF تولید می‌کنند. به دلیل اینکه حین فرآیند پاشش پلاسمایی در اتمسفر، در پودر و در نهایت در پوشش اکسید ایجاد می‌شود و پوشش‌های MCrAlY به اکسیداسیون حساس

هستند، عمدتاً از روش پاشش پلازما تحت خلأ یا تحت اتمسفر کنترل شده برای تولید این پوشش‌ها استفاده می‌شود [۹]. البته در سال‌های اخیر، روش HVOF جهت اعمال پوشش‌های MCrAlY بدلیل صرفه اقتصادی بالاتر بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. در این روش، به دلیل اینکه ذرات پودر، انرژی سینتیک بالایی را به دلیل سرعت بالا حین پاشش به دست می‌آورند و نیز دمای شعله پایین‌تری دارند، پوشش‌های ایجاد شده با این روش، چگالی و سختی بالاتر، تخلخل کمتر، استحکام چسبندگی بیشتر و پایداری حرارتی بهتری را نسبت به روش‌های پاششی اتمسفری از خود نشان می‌دهند [۱۲-۱۰].

در دهه‌های اخیر، بحث بهینه‌سازی پوشش‌های دما بالا توجه بسیاری از محققان را به خود معطوف کرده است. پوشش‌های MCrAlY که عموماً به روش‌های پاشش حرارتی روی سطح اعمال می‌شوند نیز از این قاعده مستثنی نبوده‌اند. برخی از محققان به مقوله بهینه‌سازی پوشش‌های با ترکیب مختلف MCrAlY با استفاده از عوامل افزودنی به صورت پودر یا محلول پرداخته‌اند [۱۳ و ۱۴]. دسته‌ای دیگر به تاثیر فرآیندهای مختلف پاشش حرارتی و پارامترهای وابسته به آن به کیفیت پوشش‌های MCrAlY اشاره کرده‌اند [۱۵ و ۱۶]. در نهایت، بعضی از محققین در خصوص نانوساختار کردن ترکیب پودر پوشش‌دهی و همچنین پوشش تشکیل شده از آن تحقیقاتی را به انجام رسانیده‌اند [۲۰-۱۷]. آژدلس‌تاین و همکاران [۱۲ و ۲۲] با ایجاد پوشش‌های نانوساختار NiCrAlY با روش پاشش حرارتی روی سطح زیرلایه‌ای از جنس سوپرآلیاژ پایه نیکل، نشان دادند مقاومت به اکسیداسیون پوشش نانوساختار در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد، بسیار بالاتر از پوشش معمول NiCrAlY است. ایشان با استفاده از روش آسیای مکانیکی در دماهای پایین (کرایومیلینگ) به مدت ۱۲ ساعت توانستند به ترکیبات پودر پوشش‌دهی HVOF نانوساختار NiCrAlY دست یابند. مهمترین دلیل ارتقای اکسیداسیون پوشش‌های نانوساختار، تشکیل پوسته اکسیدی Al_2O_3 با ساختار بسیار متراکم‌تر از پوشش‌های معمول NiCrAlY است. به نحوی که با رشد آهسته و کنترل شده پوسته اکسیدی Al_2O_3 احتمالاً به

صورت α -Al₂O₃ شکل گرفته که دارای خواص برتری از حفاظت قلمداد می‌شود. این درحالی است که در زمان قرارگیری پوشش‌های معمول NiCrAlY در شرایط اکسیداسیون، پوسته‌های غیر پیوسته‌ای از اکسید آلومینیم شکل گرفته به نحوی که بخش قابل توجهی از پوسته رویی محافظ، ترکیبات اکسیدهای NiO و اسپینل‌های Ni(CrAl)₂O₄ خواهند بود. البته حضور این اسپینل‌ها باعث افزایش سرعت رشد لایه اکسیدی و بدنبال آن کاهش مقاومت به اکسیداسیون آن خواهد شد.

در زمینه بررسی پوشش‌های نانوساختار MCrAlY، مرسی‌یر و همکاران [۱۹] نیز ارزیابی‌هایی را روی پوشش‌های MCrAlY نانوساختار انجام داده‌اند. آنها نیز از روش آسیای مکانیکی در دماهای پایین برای ساخت پودر نانوساختار برای پوشش‌دهی استفاده کردند. روش پاشش حرارتی برای ایجاد پوشش‌های نانوساختار به کار گرفته شد. برای دستیابی به پایداری نسبی، پوشش‌ها بعد از پاشش در دماهای مختلف به مدت یکسان یک ساعت تحت عملیات حرارتی در اتمسفر آزاد قرار گرفتند. نتایج حاکی از افزایش اندازه دانه پودر نانوساختار پس از عملیات حرارتی در خلأ در دمای ۷۰۰ درجه سانتیگراد به میزان متوسط ۶۳ نانومتر است در حالیکه عملیات حرارتی در خلأ در زمان مشابه در دمای ۹۰۰ درجه سانتیگراد، اندازه دانه پودر نانوساختار را تا میزان متوسط ۲۵۱ نانومتر افزایش می‌دهد. پوشش‌های نانوساختار پس از جداکردن از زیرلایه به صورت پوسته جداگانه تحت آزمون اکسیداسیون هم دما در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد به مدت ۴۸ ساعت قرار گرفتند. پس از آزمون ذکر شده، مشاهده شد که پوسته محافظ اکسیدی به صورت دولایه و کاملاً چسبنده به سطح بوده است. این پوسته‌ها عموماً شامل لایه‌های درونی متراکم Al₂O₃ آلفا و لایه‌های بیرونی عموماً اکسیدهای ترکیبی و اسپینل‌ها با ترکیبات NiO، Cr₂O₃، CoAl₂O₄ و NiAl₂O₄ هستند که در مقایسه با لایه درونی، تراکم کمتر و رشد سریعتری داشته است. نتایج همچنین نشان می‌دهد که جدایش آلومینیم و تغییرات ساختاری در زمان انجام آسیای مکانیکی روی تشکیل زود هنگام پوسته اکسیدی Al₂O₃ نوع آلفا کمک شایانی کرده است.

با توجه به مباحث مطرح شده در منابع علمی مختلف، نانوساختار کردن باعث بهبود ساختار و خواص اکسیداسیون دما بالای پوشش‌های MCrAlY شده است. لذا هدف از این تحقیق، ابتدا آماده سازی پودر نانوساختار MCrAlY با روش آسیاکاری مکانیکی به‌عنوان مواد اولیه برای پوشش‌دهی و سپس اعمال آنها بر روی سطح به‌روش پاشش حرارتی است. بدنبال آن، ارزیابی‌های ساختاری و فازی پوشش‌های متداول و نانوساختار مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفته و پس از آن رفتار اکسیداسیون هم‌دما و سیکلی دما بالای آنها ارزیابی و با یکدیگر مقایسه شده است.

۲- مواد و روش آزمایش

۲-۱- مواد اولیه پوشش دهی

پودر تجاری کد AMDRY 365-1 ساخت شرکت Oerlikon-MetcoTM ساخت کشور ایالات متحده امریکا با ترکیب NiCoCrAlY به‌عنوان ماده اولیه انتخاب شد. این پودر ساخته شده به روش اتمیزه گازی بوده و توزیع دانه بندی آن در محدوده ۱۵ تا ۴۵ میکرون است. مشخصات پودر تجاری مورد استفاده در جدول ۱ نمایش داده شده است. ضمناً آنالیز EDS از پودر تجاری جهت تعیین دقیق ترکیب شیمیایی آن (میانگین سه آنالیز) انجام گرفته است. مشخصات آنالیزگر EDS در بخش ۲-۳ آورده شده است.

۲-۲- تهیه پودر و پوشش‌های نانوساختار

پودر اولیه MCrAlY با استفاده از آسیای گلوله‌ای سیاره‌ای و با سرعت ۲۵۰ دور بر دقیقه در مدت زمان‌های ۵، ۱۵ و ۲۵ ساعت به همراه ۱ درصد اسید استتاریک به‌عنوان عامل کنترل کننده فرآیند، تحت آسیاکاری قرار گرفت. جهت پیش‌گیری از اکسیداسیون پودر حین آسیاکاری، محفظه‌های آسیاکاری با گاز آرگون خلوص بالا پر شده و لذا فرآیند آسیاکاری مکانیکی تحت اتمسفر خنثی صورت گرفت. جهت اطمینان از محافظت محیط آسیاکاری از اتمسفر خنثی، محفظه آسیاکاری در مدت زمان معین و مساوی برای تمامی نمونه‌ها با آرگون مجدداً شارژ می‌شد. برای به حداقل رساندن افزایش دما حین

پوشش دهی با سیستم HVOF که با سوخت گازی (پروپان) طراحی شده است انجام شد. سیستم پاشش، ساخت شرکت MEC هندوستان و تفنگ خنک شونده با هوا از نوع Hypojet 2700 بود. پارامترهای بهینه پاشش برای هر دونوع پوشش متداول و نانوساختار در جدول ۲ آورده شده است. بدین منظور از دو جت هوا برای خنک کنندگی نمونه در پشت آن در زمان پوشش دهی بهره گرفته شد. پس از فرآیند پاشش حرارتی، پوشش ها به روش خمش مکانیکی زیرلایه، از روی سطح جدا شدند تا بررسی ها با دقت بالا بر روی پوشش های مستقل (فاقد زیرلایه) انجام گیرد.

آسیاکاری، فرایند آسیاکاری به صورت متناوب (یک ساعت روشن و ۱۵ دقیقه استراحت) و در دمای محیط انجام شد. بعد از تهیه پودر نانوساختار بر اساس مشخصات مطلوب جهت اعمال پوشش، فرآیند پاشش حرارتی با روش HVOF برای پودرهای متداول و نانوساختار MCrAlY بر زیرلایه های فولادی کم کربن (۰/۱۲ درصد کربن) به صورت ورقه ای شکل انجام شد (شکل ۱). سطوح تمامی زیرلایه های فولادی ابتدا توسط سمباده با شماره ۱۰۰۰ صیقل کاری شده و سپس توسط محلول پایه الکلی به خوبی تمیزکاری شد. هدف از این امر جداسازی پوشش پس از انجام فرآیند پاشش بود. فرآیند

جدول ۱- ترکیب شیمیایی و مشخصات تجاری پودر MCrAlY مورد استفاده جهت پاشش حرارتی.

ترکیب شیمیایی (درصد وزنی)					
عنصر دیگر*	Y	Al	Cr	Co	Ni
اطلاعات شرکت تامین کننده	۰/۸ الی ۰/۱	۱۱ الی ۱۴	۱۴ الی ۲۰	۲۰ الی ۲۶	بالانس
نتایج آنالیز EDS	۰/۵	۱۱/۹	۱۷/۹	۲۳/۶	۴۵/۹
مشخصات تجاری					
روش تولید پودر: اتمیزه گازی			اندازه ذرات پودر: ۴۵-۱۵+ میکرومتر		
کد معادل PWA 1365-1			کد تجاری AMDRY 365-1		

* عناصر دیگر عمدتاً شامل ناخالصی آهن و سیلیسم است که توسط تولید کننده گزارش شده است.

ICDD صحه گذاری شدند.

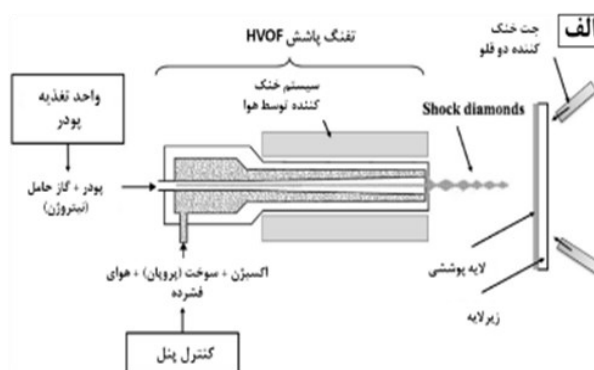
سپس نمونه های پوششی مستقل از زیرلایه بعد از پاشش، برش در ابعاد مساوی ۱۰×۵ میلیمتر مربع و آماده سازی تحت آزمون اکسیداسیون قرار گرفتند. جهت بررسی رفتار اکسیداسیون تمامی پوشش ها و حذف تاثیر آلودگی ها، ناخالصی ها و ناهمواری های (زبری) سطحی، سطح و لبه های تمامی پوشش ها با استفاده از کاغذ سمباده به شماره ۱۰۰۰ با دقت و حساسیت بالایی سمباده کاری شدند. بدین منظور جهت انجام آزمون اکسیداسیون دما بالا از یک کوره بوت ای استفاده شده و نمونه های پوششی در بازه های زمانی مختلف مورد مطالعه قرار گرفتند. آزمون اکسیداسیون در دو بخش هم دما و سیکی بر روی پوشش ها انجام گرفت. در آزمون هم دما، پوشش ها تا ۱۰۰۰ ساعت در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد نگهداری و

۲-۳- ارزیابی و مشخصه یابی پوشش های نانوساختار

مورفولوژی پودر آسیاشده نانوساختار و سطح مقطع پوشش های متداول و نانوساختار با استفاده از میکروسکوپ الکترونی عبوری آزمایشگاهی (TEM, Philips, CM300, 150 kV) و میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM, MIRA-3 TESCAN) مجهز به آنالیز تفکیک انرژی پرتو ایکس (EDS, Inca OXFORD) بررسی شدند. ساختار فازی پوشش ها نیز با استفاده از پراش سنجی پرتو ایکس (XRD, Philips X'Pert, CuK α) با طول موج $\lambda=1/7749$ نانومتر و ولتاژ اسمی ۴۰ کیلوولت و جریان ۴۰۰ میلی آمپر صورت گرفت. جهت دریافت تمامی پراش ها و افزایش دقت، سرعت روبش دستگاه ۰/۰۲ درجه بر ثانیه تنظیم شد. فازهای موجود در طیف های پراش توسط الگوهای مرجع

در آزمون اکسیداسیون سیکلی در دمای ۱۱۰۰ درجه سانتیگراد تا ۳۰۰ سیکل که هر سیکل شامل ۱ ساعت نگهداری در دمای ۱۱۰۰ درجه سانتیگراد و ۱۵ دقیقه توقف در دمای محیط (۲۵)

درجه سانتیگراد) قرار گرفتند. جهت حصول نتیجه مطلوب، نمونه برداری در فواصل زمانی مشخص از داخل کوره انجام شد.



شکل ۱-الف) شماتیک تفنگ پاشش جهت اعمال پوشش های تجاری و نانو ساختار به روش پاشش حرارتی و ب) فرآیند پوشش دهی به روش پاشش حرارتی.

جدول ۲- پارامترهای پوشش دهی پاشش حرارتی برای پوشش های متداول و نانو ساختار MCrAlY.

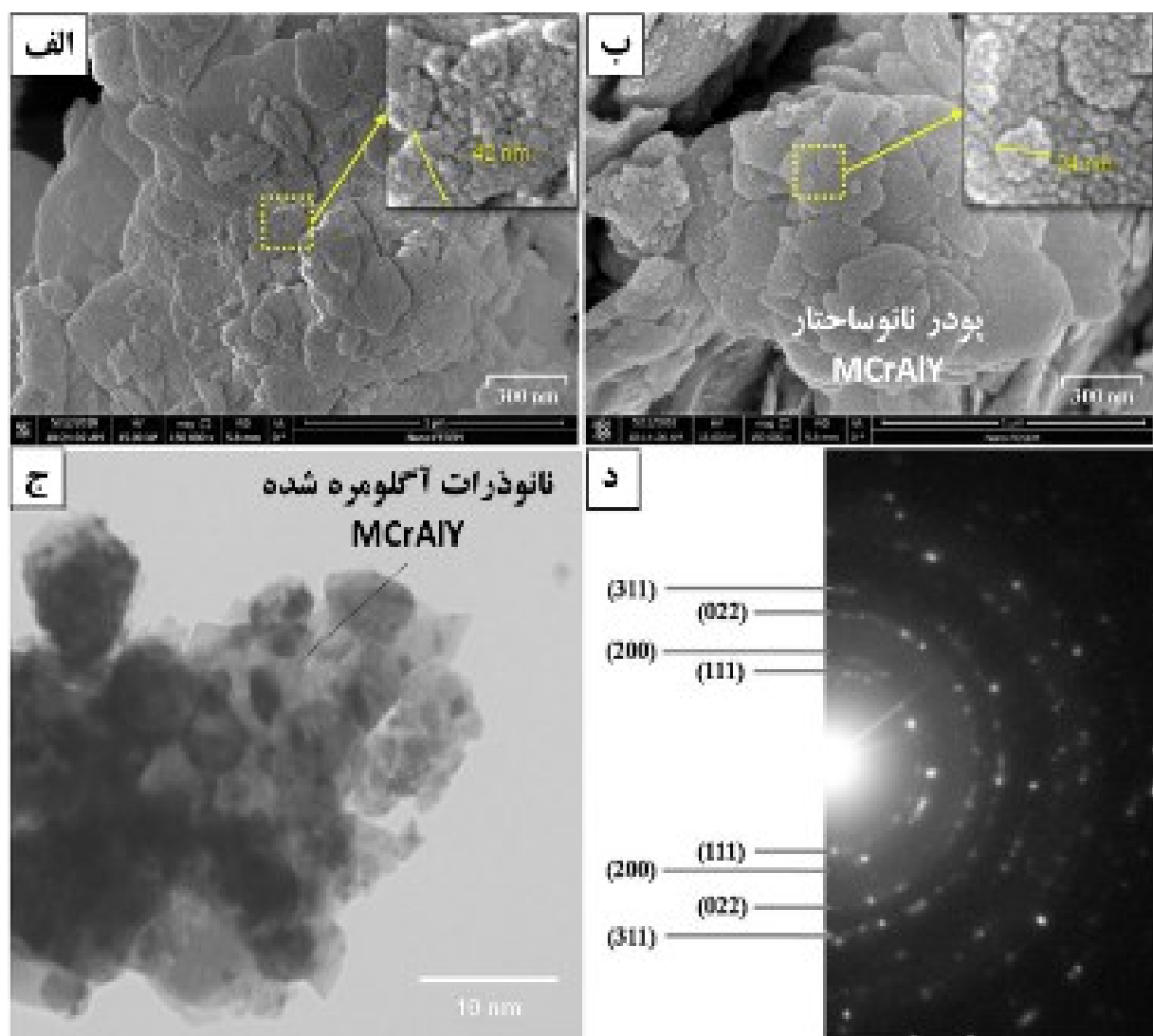
پارامترهای پوشش دهی	پوشش متداول	پوشش نانو ساختار
سیستم خنک کننده	هوا خنک	هوا خنک
نوع سوخت	گاز پروپان (C_3H_8)	گاز پروپان (C_3H_8)
فلوی سوخت (لیتر بر دقیقه)	۴۰	۵۰
فلوی اکسیژن (لیتر بر دقیقه)	۱۹۰	۲۰۰
سرعت تزریق پودر (لیتر بر دقیقه)	۶۰۰	۵۰۰
گاز حامل پودر	N_2	N_2
فلوی گاز حامل (لیتر بر دقیقه)	۲۵	۲۵
فاصله پاشش (میلیمتر)	۲۵۰	۲۵۰

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی خواص ساختاری

شکل ۲ تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری از پودر نانو ساختار تهیه شده به روش آسیای مکانیکی پس از ۵ و ۲۵ ساعت را نشان می دهد. همانطور که از شکل مشخص است، پس از ۵ ساعت آسیاکاری، ساختار و مورفولوژی پودر متشکل از ذرات ریز کریستالی MCrAlY است. مطابق شکل ۲-الف، اندازه این نانوذرات اکسیدی کوچکتر از ۸۰ نانومتر است ذرات پودر بدلیل زمان کوتاه آسیاکاری (۵ ساعت)، تحت

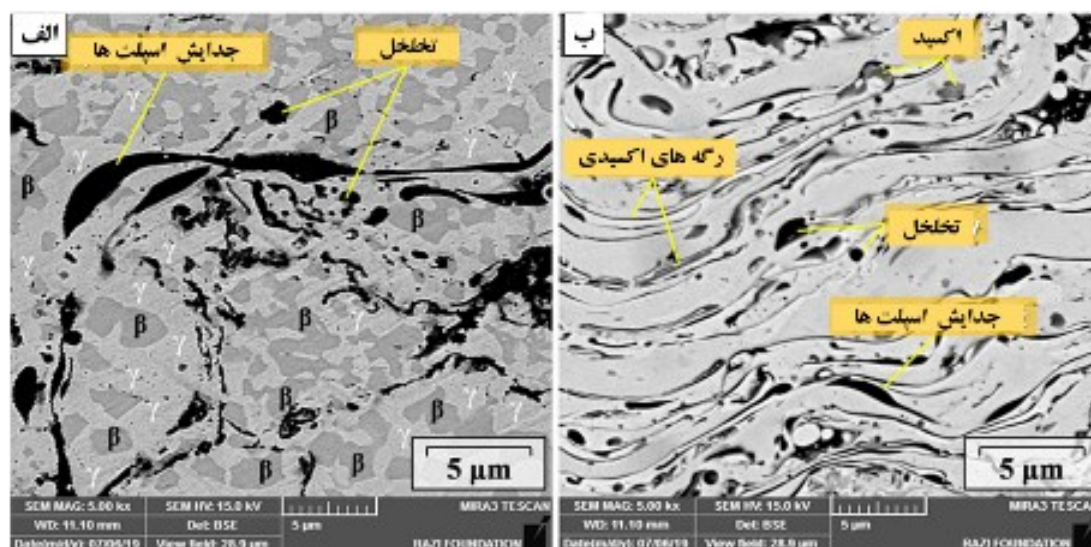
تغییر شکل پلاستیک شدید قرار نگرفته است. شکل ۲-ب، مورفولوژی یک ذره نانو ساختار MCrAlY پس از ۲۵ ساعت آسیاکاری را نمایش می دهد. بطور دقیق تر برای پودر آسیاکاری شده به مدت ۲۵ ساعت، تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری مطابق شکل ۲-ج، نشان دهنده نانوذرات MCrAlY آگلومره شده در کنار یکدیگر است و البته ساختار این پودر دچار تغییر شکل پلاستیک شدید قرار گرفته و مطابق شکل ۲-د الگوی SAD آن به شکل دایر متحدالمرکز متمایل گشته که بیانگر نانو ساختار شدن آن پس از ۲۵ ساعت است.



شکل ۲- تصویر میکروسکوپ الکترونی FESEM از پودر نانوساختار تهیه شده به روش آسپای مکانیکی پس از الف) ۵ ساعت و ب) ۲۵ ساعت و ج و د) تصویر میکروسکوپ عبوری TEM زمینه روشن به همراه الگوی SAD از پودر از پودر نانوساختار تهیه شده به روش آسپای مکانیکی پس از ۲۵ ساعت.

نانوساختار دارای لایه هایی متراکم تر و تخلخل کمتری است. ارزیابی های مشابهی توسط دیگر محققین در خصوص پوشش های نانوساختار MCrAlY گزارش شده است [۱۹]. لازم به ذکر است که هر دو نوع پوشش از فاز غنی از نیکل-کبالت (γ) و فاز NiAl یا β (بصورت فازی مستقل یا محلول) تشکیل شده اند که نتایج فازی در ادامه آورده شده است.

شکل ۳، تصویر میکروسکوپی الکترونی FESEM از پوشش های متداول و نانوساختار MCrAlY اعمال شده به روش پاشش حرارتی را نشان می دهد. مطابق شکل ۳-الف، پوشش MCrAlY دارای ساختار لایه ای است که در آن تخلخل های ساختاری، جدایش های بین اسپلت ها و رگ های اکسیدی مشهود است. همچنین مطالب شکل ۳-ب، پوشش



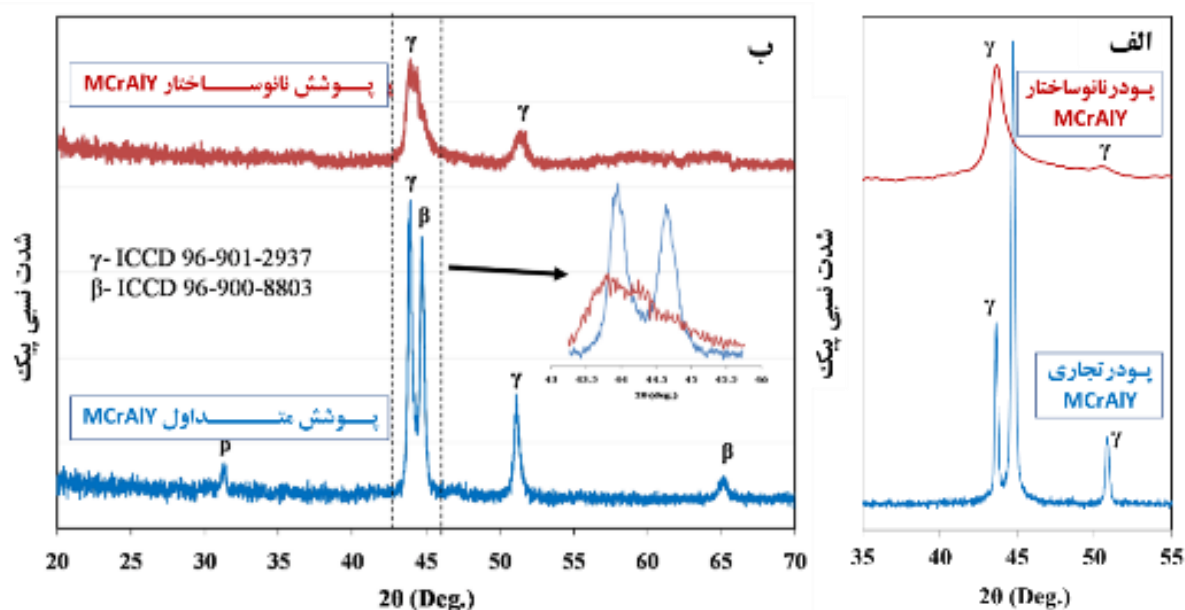
شکل ۳- تصویر میکروسکوپ الکترونی FESEM از (الف) پوشش متداول MCrAlY و (ب) پوشش نانوساختار MCrAlY اعمال شده از پودر نانوساختار آسیاکاری مکانیکی شده به مدت ۲۵ ساعت.

تشکیل شده از آن علاوه بر دارا بودن پهن شدگی پیک ها ناشی از نانوساختار بودن آن، بطور معکوس دارای مقادیر بیشتری از فاز محلول جامد غنی از نیکل - کبالت γ و مقادیر کمتری از فاز β است.

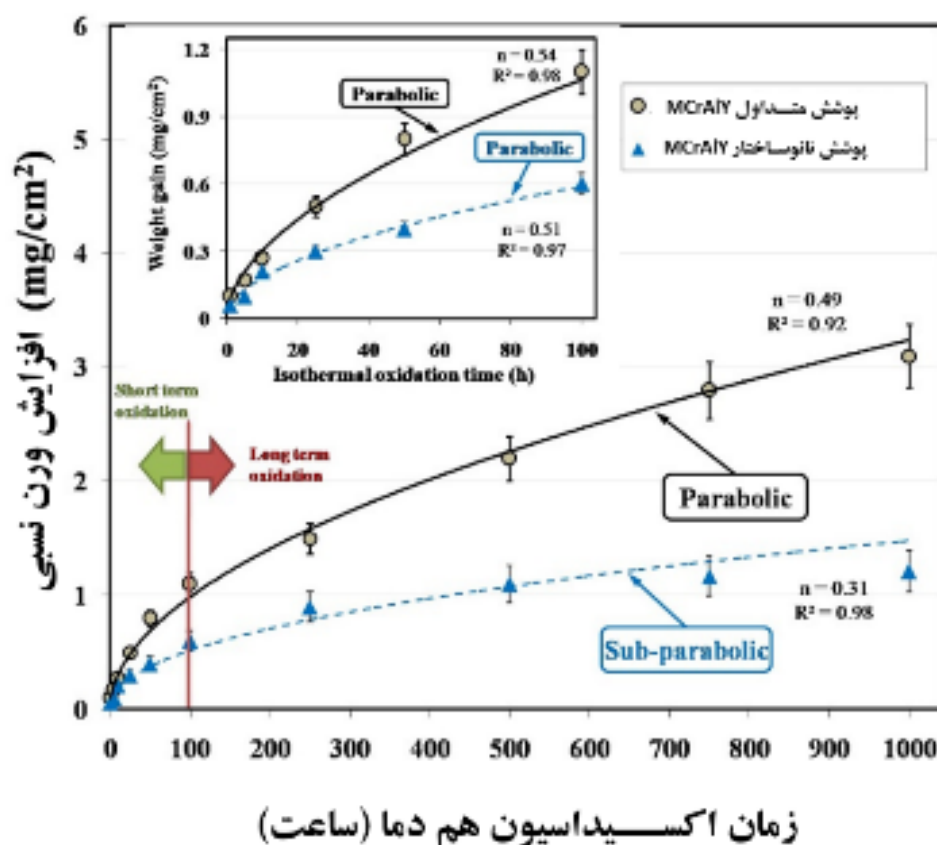
۳-۲- رفتار اکسیداسیون پوشش ها

نتایج حاصل از اکسیداسیون پوشش های متداول و نانوساختار MCrAlY تحت آزمون اکسیداسیون همدمای ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد پس از گذشت ۱۰۰۰ ساعت، در شکل ۵ نشان داده شده است. در تطابق با بررسی های مخفنین دیگر، پوسته اکسیدی تشکیل شده شامل لایه رویی اسپینل با لایه زیرین آلومینای آلفا است [۱۱]. همانطور که ملاحظه می شود افزایش وزن نسبی برای پوشش متداول پس از ۱۰۰۰ ساعت، حدوداً ۱/۵ میلی گرم بر سانتیمترمربع است و این در حالی است که مقدار افزایش وزن نسبی برای پوشش متداول (حدود ۳/۰ میلی گرم بر سانتیمترمربع) حدوداً دو برابر پوشش نانوساختار است. لذا بیشترین نرخ اکسیداسیون مربوط به پوشش متداول بوده و از طرف دیگر بیشترین مقاومت به اکسیداسیون مربوط به پوشش نانوساختار است. نتایج مشابهی برای رفتار اکسیداسیون پوشش NiCoCrAlY نانوساختار در دمای ۱۰۵۰ درجه سانتیگراد توسط مرسی و همکاران [۱۹] گزارش شده است.

شکل ۴، نتایج آزمون پراش اشعه ایکس برای پودر تجاری و نانوساختار آسیای مکانیکی شده (۲۵ ساعت) و پوشش های متداول و نانوساختار MCrAlY را نشان می دهد. مطابق شکل ۴ الف، فازیتا در پودر آسیاکاری شده بدلیل تغییر شکل های مکانیکی شدید حین آسیاکاری در ساختار حل شده و مشاهده نمی شود. از طرف دیگر پهن شدن پیک های گاما نشان دهنده نانوساختار شدن پودر مورد نظر پس از ۲۵ ساعت است. همچنین، همانطور که از شکل ۴ ب مشاهده می شود، پیک های مربوط به فاز γ بعد از آسیاکاری مکانیکی به مدت زمان ۲۵ ساعت پهن تر شده و در همین زمان پیک های مربوط به β نیز ناپدید شده اند. لذا به نظر می رسد زمان ۲۵ ساعت، فرصت کافی را برای انحلال فاز بین فلزی در فاز زمینه محلول جامد فراهم نموده است. این پدیده را می توان به انرژی بالای وارد شده به ذرات پودری در اثر آسیاکاری مکانیکی مربوط دانست که منجر به تغییر شکل پلاستیک شدید می گردد به نحوی که انرژی قابل توجهی به سیستم وارد شده و با انجام تغییر شکل پلاستیک منجر به تولید کرنش های شبکه ای در ساختار پودر آسیاکاری شده می شود [۱۵، ۲۳، ۲۴]. بر اساس نتایج پراش پوشش های متداول و نانوساختار مطابق شکل ۴- الف و ب، حضور فازهای γ و β در ترکیب پودر متداول MCrAlY با مقادیر بالاتر β مشهود بوده و این در حالی است که پوشش



شکل ۴- الگوی پراش پرتو ایکس مربوط به (الف) پودر متداول و نانوساختار MCrAlY ایجاد شده به روش آسای مکانیکی (۲۵ ساعت) و (ب) پوشش‌های متداول و نانوساختار MCrAlY اعمال شده به روش پاشش حرارتی.



شکل ۵- رفتار اکسیداسیون همدمای پوشش‌های متداول و نانوساختار MCrAlY اعمال شده به روش پاشش حرارتی بعد از ۱۰۰۰ ساعت در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد.

برای درک بهتر رفتار اکسیداسیون، ثوابت پارابولیک (k_p) و اندیس توانی (n) اکسیداسیون پوشش متداول و نانوساختار MCrAlY در جدول ۳ آورده شده است. همانطور که از داده‌های جدول مشاهده می‌شود، رفتار اکسیداسیون همدمای پوشش‌ها با نزدیک بودن اندیس توانی به ۰/۵، رفتاری پارابولیک و یا شبه پارابولیک است [۲۵]. این امر نشان‌دهنده کنترل رشد لایه‌های اکسیدی با فرآیند نفوذی در پوشش‌ها است [۲۶]. آنگل و همکاران [۲۷] و رانا و همکاران [۲۰] نیز همچنین نشان دادند که کنترل رشد لایه اکسیدی بوسیله فرآیند نفوذ در حالتی که اندیس توانی تقریباً برابر با ۰/۵ بدست می‌آید، اتفاق می‌افتد. ضمناً همانطور که مشاهده می‌شود، مطابق پیش‌بینی، کمترین ثابت پارابولیک در اکسیداسیون تحت دمای ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد مربوط پوشش به نانوساختار با مقدار $k_p = 3/38 \times 10^{-12} \text{ g}^2\text{cm}^{-4}\text{s}^{-1}$ که کاهش حدود ۹ برابری

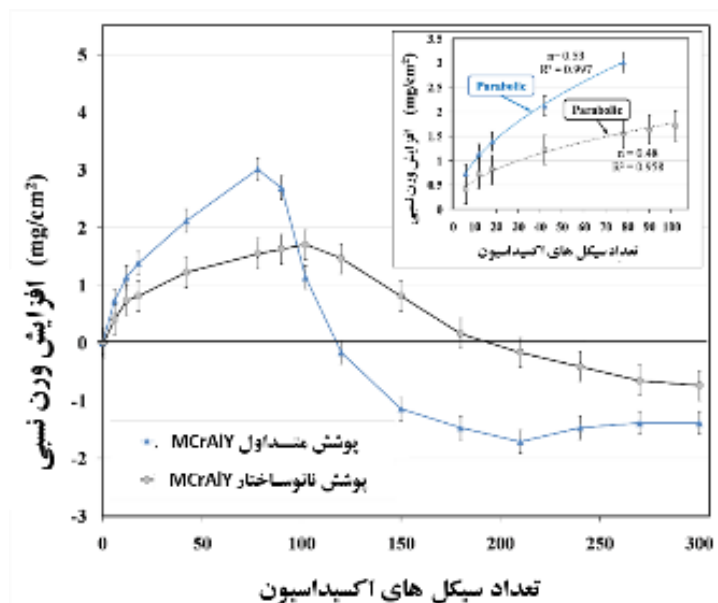
نسبت به پوشش متداول MCrAlY را خود نشان می‌دهد. بطور مقایسه‌ای، میزان ثابت پارابولیک برای پوشش متداول MCrAlY حدوداً $k_p = 1/41 \times 10^{-11} \text{ g}^2\text{cm}^{-4}\text{s}^{-1}$ بدست آمده است. داده‌های تقریباً مشابهی برای اکسیداسیون پوشش‌های متداول و یا بهینه شده MCrAlY توسط محققین دیگر ارایه شده است. بعنوان نمونه، سعیدی و همکاران [۲۵] ثابت پارابولیک را برای پوشش CoNiCrAlY در دمای اکسیداسیون ۱۱۰۰ درجه سانتیگراد در محدوده $k_p = 4/16 \times 10^{-10} \sim 4/16 \times 10^{-10} \text{ g}^2\text{cm}^{-4}\text{s}^{-1}$ اندازه‌گیری کردند. ماهش و همکاران [۲۸] نیز برای پوشش NiCrAlY حاوی ۰/۴ درصد نانوذرات اکسید سرب در شرایط اکسیداسیون ایزو ترم در دمای ۹۰۰ درجه سانتیگراد، ثابت پارابولیک را در محدوده $k_p = 4/6 \times 10^{-11} \sim 7/3 \times 10^{-11} \text{ g}^2\text{cm}^{-4}\text{s}^{-1}$ محاسبه و گزارش کردند.

جدول ۳- مقادیر محاسباتی ثوابت پارابولیک k_p و اندیس‌های توانی n برای پوشش متداول و نانوساختار MCrAlY بعد از اکسیداسیون هم‌دمای در ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد به مدت ۱۰۰۰ ساعت.

نوع پوشش MCrAlY	R^2	ثابت پارابولیک ($k_p \text{ (g}^2\text{cm}^{-4}\text{s}^{-1}\text{)}$)	اندیس توانی n
پوشش متداول	۰/۹۸	$1/41 \times 10^{-11}$	۰/۵۴
پوشش نانوساختار	۰/۹۷	$3/38 \times 10^{-12}$	۰/۳۱

شکل ۶، افزایش نسبی وزن ناشی از اکسیداسیون سیکلی نسبت به سیکل‌های حرارتی اعمال شده را برای پوشش‌های متداول و نانوساختار در دمای ۱۱۰۰ درجه سانتیگراد را نشان می‌دهد. در مراحل اولیه اکسیداسیون سیکلی همانطور که انتظار می‌رود، برای هر دو نوع پوشش، افزایش نسبی وزن ناشی از اکسیداسیون بطور همزمان ولی با نرخ متفاوت اتفاق می‌افتد. همانطور که از شکل ملاحظه می‌شود، وزن نسبی پوشش‌ها تا میزان ۸۰ تا ۱۰۰ سیکل بترتیب برای پوشش متداول و نانوساختار ۱/۸ میلی گرم بر سانتیمتر مربع و برای پوشش نانوساختار حدود ۳ میلی گرم بر سانتیمتر مربع می‌باشد. در این مرحله هر دو نوع پوشش از رفتار اکسیداسیون پارابولیک تبعیت می‌کنند به نحوی که ثابت پارابولیک برای پوشش

متداول ۰/۵۳ و برای پوشش نانوساختار ۰/۴۸ تخمین زده می‌شود. همانطور که از نتایج اکسیداسیون سیکلی پوشش‌ها مشاهده می‌شود، با افزایش تعداد سیکل بیشتر از ۸۰، برای پوشش متداول، روند کاهشی وزن نسبی مشاهده می‌شود و این رفتار کاهشی با نرخ قابل توجهی تا حدود ۲۰۰ سیکل ادامه دارد. این در حالی است که برای پوشش نانوساختار، فرآیند کاهش وزن پس از عبور از ۱۰۰ سیکل، با نرخ کمتر و تا حدود ۳۰۰ سیکل ادامه پیدا می‌کند. لذا نتایج اکسیداسیون سیکلی برای هر نوع پوشش بیانگر پایداری بیشتر پوشش نانوساختار در سیکل‌های انجام شده نسبت به پوشش متداول خواهد بود که در تطابق با یافته‌های هجرانی و همکاران [۱۱] در خصوص اکسیداسیون سیکلی پوشش‌های MCrAlY است.



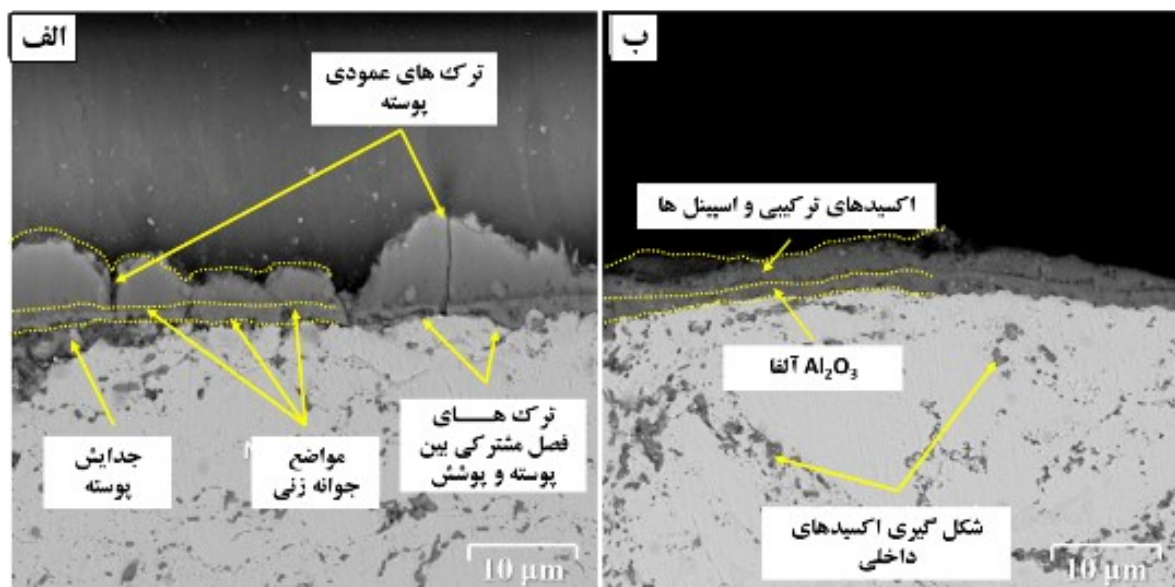
شکل ۶- رفتار اکسیداسیون سیکلی پوشش های پوشش های متداول و نانوساختار MCrAlY اعمال شده به روش پاشش HVOF بعد از ۳۰۰ سیکل حرارتی در دمای ۱۱۰۰ درجه سانتیگراد.

پوشش نانو ساختار نسبت به پوشش متداول است. همچنین به دلیل وجود سرعت رشد نسبتاً بالای لایه اکسیدی و ایجاد مواضع تنشی، ترک های ساختاری در لایه اکسیدی پوشش متداول به چشم می خورد. بطور معکوس، برای پوشش و نانوساختار، لایه اکسیدی شکل گرفته نازک تر، متراکم تر و عاری از ترک های ساختاری بوده و لذا محافظت بیشتری را در برابر اکسیداسیون سیکلی دما بالا به دنبال خواهد داشت [۱۱].

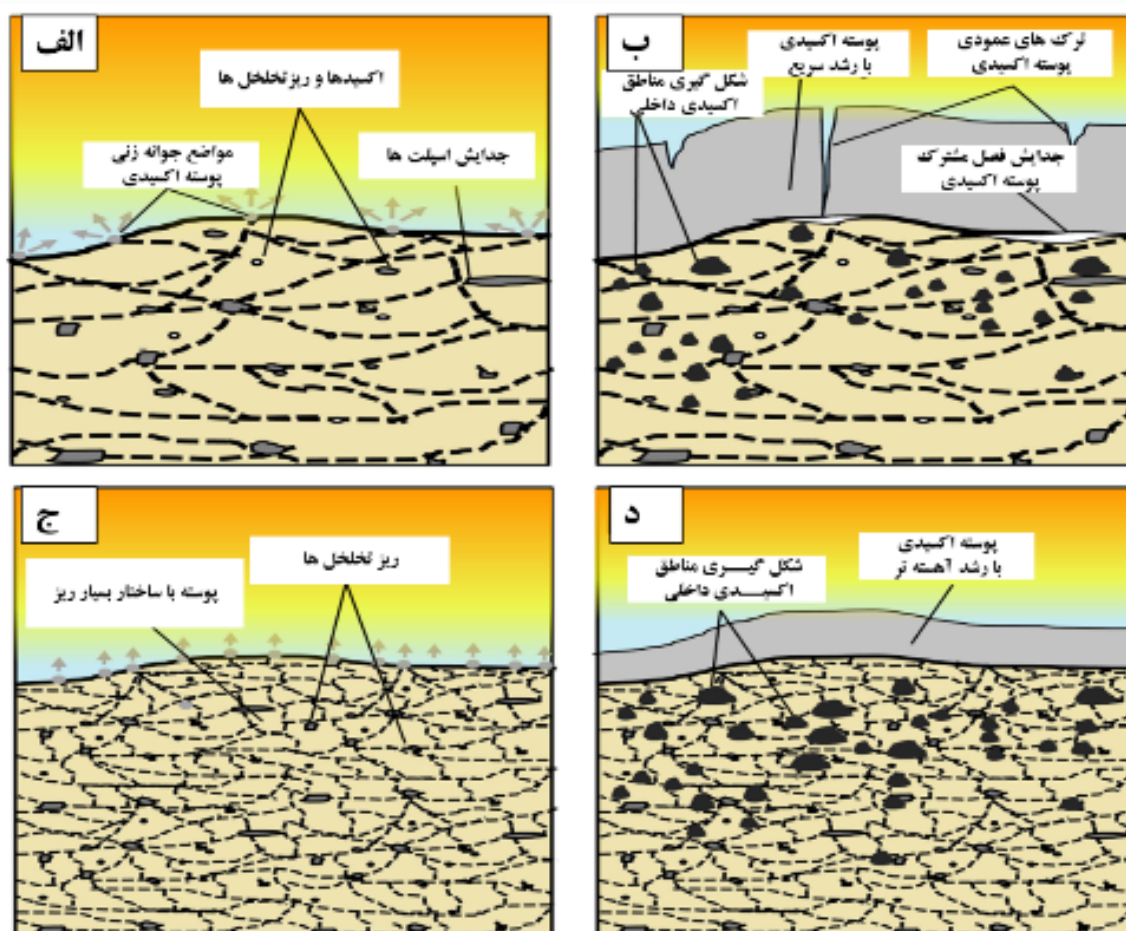
۳-۳- مکانیزم پیشنهادی تشکیل لایه اکسیدی در پوشش نانوساختار MCrAlY

مورفولوژی تشکیل لایه اکسیدی بر روی سطح پوشش ها نیز می تواند به عنوان معیاری بمنظور ارتباط آن با نرخ رشد مدنظر قرار گیرد [۲۹]. شکل ۸، مورفولوژی لایه اکسیدی محافظ آلومینا تشکیل شده بر روی سطح پوشش های متداول و نانوساختار را پس از اکسیداسیون هم دما در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد به مدت ۱۰۰۰ ساعت نمایش می دهد. لایه اکسیدی آلومینای نسبتاً ضخیم با دانه بندی درشت روی سطح پوشش متداول تشکیل شده است (شکل ۸ الف و ب). اما برای پوشش نانوساختار، لایه اکسیدی با ضخامت کمتر روی سطح تشکیل شده که دانه بندی آن ریزتر است (شکل ۸ ج و د).

تصویر میکروسکوپ الکترونی از سطح مقطع پوشش های MCrAlY متداول و نانوساختار که تحت آزمایش اکسیداسیون سیکلی در دمای ۱۱۰۰ درجه سانتیگراد به تعداد ۳۰۰ سیکل قرار گرفته اند در شکل ۷ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود، اکسیداسیون داخلی برای هر دو نوع پوشش پس از ۳۰۰ سیکل شکل گرفته است، البته بطور مقایسه ای میزان اکسیداسیون داخلی برای پوشش نانوساختار کمی بیشتر از پوشش متداول است. این افزایش به دلیل بالابودن دانسیته مرزهای دانه در پوشش نانوساختار نسبت به پوشش متداول است. به همین دلیل، مواضع ورود اکسیژن به داخل پوشش نانوساختار بیشتر فراهم شده و اکسیداسیون داخلی را در مراحل اولیه اکسیداسیون افزایش می دهد [۱۱]. همچنین همانطور که در شکل ۷-الف مشاهده می شود، لایه اکسیدی نسبتاً ضخیمی بر روی پوشش متداول پس از اکسیداسیون سیکلی شکل گرفته است و این در حالی است که لایه اکسیدی نازکتری در پوشش نانو ساختار پس از ۳۰۰ سیکل مشاهده می شود. همچنین مطابق شکل ۷-الف، لایه اکسیدی شکل گرفته بر روی پوشش متداول از نظر ساختاری درشت تر از لایه اکسیدی تشکیل شده بر روی پوشش نانو ساختار است. این امر به دلیل شکل گیری مواضع بیشتر جوانه زنی و رشد لایه اکسیدی بر روی



شکل ۷- تصویر سطح مقطع پوشش های متداول و نانوساختار MCrAlY بعد از آزمون اکسیداسیون سیکلی در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد بعد از ۳۰۰ سیکل حرارتی.



شکل ۷- شماتیک جوانه زنی و رشد لایه اکسیدی در زمان اکسیداسیون همدمای برای پوشش های متداول MCrAlY (الف و ب) و همچنین جوانه زنی و رشد لایه اکسیدی پوشش های نانوساختار MCrAlY (ج و د).

لایه متراکم و چسبنده آلومینا، مسیرهای آسان نفوذ اکسیژن برای پوشش نانوساختار فراهم نمی‌باشد. بهبود اکسیداسیون هم‌دما و سیکلی پوشش‌های NiCrAlY تقویت شده با نانوذرات اکسیدی توسط چن و همکاران [۳۰] و سان و همکاران [۳۱] گزارش شده است. هر دوی این محققین، بر کاهش دانه‌بندی ساختاری و افزایش تراکم پوشش پس از افزودن مقادیر کم نانوذرات افزودنی (بترتیب ۰/۹ و ۰/۲ درصدوزنی) اتفاق نظر داشته و بیان کرده‌اند که همراه با بهبود مقاومت به اکسیداسیون سیکلی پوشش‌ها (که بترتیب ۲۱/۲ و ۱۵ درصد بالاتر از نتایج اکسیداسیون سیکلی پوشش‌های NiCrAlY فاقد نانوذرات افزودنی افزایش نشان می‌دهد) مقادیر کمتری از ترکیبات دیگر اکسیدی به جز آلومینا (اسپینل‌ها) در ترکیب لایه اکسیدی مشاهده شده است.

با طولانی تر شدن فرآیند اکسیداسیون، اکسیدهای کبالت و نیکل بر روی سطح می‌توانند تا حد قابل توجهی رشد کرده و کریستال‌های درشت‌تری را بر روی سرعت ایجاد نمایند. در نتیجه مصرف یون آلومینیوم جهت تشکیل لایه اکسیدی آلومینیم بر روی سطح پوشش، اکسیژن نیز می‌تواند از این مسیرهای نفوذ آسان مانند ترک‌ها و مرزهای دانه به سمت لایه‌های داخلی پوشش نفوذ کرده و با یون‌های فلزی (آلومینیم) داخل پوشش ترکیب شده و تشکیل جزایر اکسیدی در داخل ساختار پوشش را رقم بزنند. بیشتر این جزایر اکسیدی در مناطقی نزدیک به فصل مشترک بین لایه اکسیدی و پوشش تشکیل می‌شود.

در پوشش‌های متداول MCrAlY، مسیرهای آسان نفوذ مانند ترک‌ها و مرزهای دانه جهت نفوذ به داخل یون‌های اکسیژن همچنان فراهم است این در حالی است که به دلیل شکل‌گیری

نتیجه‌گیری

- با تنظیم دقیق پارامترهای آسیاکاری مکانیکی پس از مدت زمان ۲۵ ساعت فرآیند، به‌طور موفقیت‌آمیزی پودرهای نانوساختار MCrAlY با مورفولوژی مناسب و مورد استفاده برای روش پوشش‌دهی به روش پاشش حرارتی تولید شد. پوشش نانوساختار MCrAlY شکل گرفته بر روی سطح توسط نیز روش پاشش حرارتی بر روی سطح زیرلایه فولادی اعمال شد.
- ارزیابی‌های اکسیداسیون دما بالای پوشش‌ها نشان داد که پوشش نانوساختار MCrAlY دارای مقاومت و پایداری بیشتری در شرایط اکسیداسیون هم‌دما و سیکلی نسبت به پوشش‌های متداول MCrAlY از خود نشان می‌دهد. دلیل این رفتار، عمدتاً تشکیل پوسته اکسیدی یکپارچه، نازک و چسبنده بر روی سطح اکسید شده در پوشش نانوساختار است.
- ارزیابی سینتیک اکسیداسیون هم‌دما همچنین مشخص کرد که در رابطه با رشد لایه اکسیدی با زمان در مراحل اول اکسیداسیون هم‌دما، هر دو نوع پوشش متداول و نانوساختار از رفتار پارابولیک و در اکسیداسیون بلند مدت، پوشش‌هایی متداول از رفتار پارابولیک و پوشش نانوساختار دارای انحراف جزئی از حالت پارابولیک از خود نشان می‌دهد.
- ترغیب جوانه زنی اکسید آلومینیوم بر روی پوشش در فرایند اکسیداسیون توسط نانوذرات آلومینای افزوده شده به پوشش از یک طرف، و کنترل نفوذ رو به بیرون یون‌های فلزی (خصوصاً آلومینیم) و نفوذ به درون یون‌های اکسیژن به داخل پوشش توسط نانوذرات اکسیدسیریم در مرز دانه‌ها از طرف دیگر باعث کاهش محسوس نرخ رشد لایه اکسیدی و افزایش مقاومت به اکسیداسیون در پوشش نانوساختار MCrAlY می‌شود.

مراجع

- [1] G.-H. Meng, H. Liu, M.-J. Liu, T. Xu, G.-J. Yang, C.-X. Li, C.-J. Li, Highly oxidation resistant MCrAlY bond coats prepared by heat treatment under low oxygen content. *Surface and Coatings Technology*, 2019. **368**: p. 192-201.
- [2] K. Yuan, R. Eriksson, R. Lin Peng, X.-H. Li, S. Johansson, Y.-D. Wang, Modeling of microstructural evolution and lifetime prediction of MCrAlY coatings on nickel based superalloys during high temperature oxidation. *Surface and Coatings Technology*, 2013. **232**: p. 204-215.

- [3] F. Ghadami, A.S.R. Aghdam, A. Zakeri, B. Saeedi, P. Tahvili, Synergistic effect of CeO₂ and Al₂O₃ nanoparticle dispersion on the oxidation behavior of MCrAlY coatings deposited by HVOF. *Ceramics International*, 2020. **46**(4): p. 4556-4567.
- [4] Y.F. Yang, C.Y. Jiang, Z.Y. Zhang, Z.B. Bao, M.H. Chen, S.L. Zhu, F.H. Wang, Hot corrosion behaviour of single-phase platinum-modified aluminide coatings: Effect of Pt content and pre-oxidation. *Corrosion Science*, 2017. **127**: p. 82-90.
- [5] G.R. Krishna, D.K. Das, V. Singh, S.V. Joshi, Role of Pt content in the microstructural development and oxidation performance of Pt-aluminide coatings produced using a high-activity aluminizing process. *Materials Science and Engineering: A*, 1998. **251**(1): p. 40-47.
- [6] P. Zhang, Performance of MCrAlX coatings: Oxidation, Hot corrosion and Interdiffusion. Vol. 2015. Linköping University Electronic Press. 2019, p. 7-165.
- [7] K. Yuan, Oxidation and corrosion of new MCrAlX coatings: modelling and experiments. Linköping University Electronic Press. 2014, p. 55-86.
- [8] F. Ghadami, A.S.R. Aghdam, S. Ghadami, Microstructural characteristics and oxidation behavior of the modified MCrAlX coatings: A critical review. *Vacuum*, 2020: p. 109980.
- [9] G.-H. Meng, B.-Y. Zhang, H. Liu, G.-J. Yang, T. Xu, C.-X. Li, C.-J. Li, Highly oxidation resistant and cost effective MCrAlY bond coats prepared by controlled atmosphere heat treatment. *Surface and Coatings Technology*, 2018. **347**: p. 54-65.
- [10] W. Brandl, D. Toma, J. Krüger, H.J. Grabke, G. Matthäus, The oxidation behaviour of HVOF thermal-sprayed MCrAlY coatings. *Surface and Coatings Technology*, 1997. **94-95**: p. 21-26.
- [11] E. Hejrani, D. Sebold, W.J. Nowak, G. Mauer, D. Naumenko, R. Vaßen, W.J. Quadackers, Isothermal and cyclic oxidation behavior of free standing MCrAlY coatings manufactured by high-velocity atmospheric plasma spraying. *Surface and Coatings Technology*, 2017. **313**: p. 191-201.
- [12] V.V. Sobolev, J.M. Guilemany, Formation of chemical inhomogeneity in the coating structure during high velocity oxy-fuel (HVOF) spraying. *Materials Letters*, 1995. **25**(5): p. 285-289.
- [13] R. Chen, X. Gong, Y. Wang, G. Qin, N. Zhang, Y. Su, H. Ding, J. Guo, H. Fu, Microstructure and oxidation behaviour of plasma-sprayed NiCoCrAlY coatings with and without Ta on Ti44Al6Nb1Cr alloys. *Corrosion Science*, 2018. **136**: p. 244-254.
- [14] H. Wang, D. Zuo, G. Chen, G. Sun, X. Li, X. Cheng, Hot corrosion behaviour of low Al NiCoCrAlY clad coatings reinforced by nano-particles on a Ni-base super alloy. *Corrosion Science*, 2010. **52**(10): p. 3561-3567.
- [15] A.S.M. Ang, C.C. Berndt, M.L. Sesso, A. Anupam, P. S, R.S. Kottada, B.S. Murty, Plasma-Sprayed High Entropy Alloys: Microstructure and Properties of AlCoCrFeNi and MnCoCrFeNi. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2015. **46**(2): p. 791-800.
- [16] L. Gil, M.H. Staia, Influence of HVOF parameters on the corrosion resistance of NiWCrBSi coatings. *Thin Solid Films*, 2002. **420-421**: p. 446-454.
- [17] F. Ghadami, A. Sabour Rouh Aghdam, S. Ghadami, Q. Zeng, Effect of vacuum heat treatment on the oxidation kinetics of freestanding nanostructured NiCoCrAlY coatings deposited by high-velocity oxy-fuel spraying. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 2020. **38**(2): p. 022601.
- [18] M.S. Hussain, M. Daroonparvar, The synthesis of nanostructured NiCrAlY powders for plasma sprayed thermal barrier coatings. *synthesis*, 2013. **13**.
- [19] D. Mercier, B.D. Gauntt, M. Brochu, Thermal stability and oxidation behavior of nanostructured NiCoCrAlY coatings. *Surface and Coatings Technology*, 2011. **205**(17): p. 4162-4168.
- [20] N. Rana, M.M. Mahapatra, R. Jayaganthan, S. Prakash, Deposition of nanocrystalline coatings by modified LVOF thermal spray method. *Journal of Alloys and Compounds*, 2014. **615**: p. 779-783.
- [21] L. Ajdelsztajn, F. Tang, J.M. Schoenung, G.E. Kim, V. Provenzano, Synthesis and oxidation behavior of nanocrystalline MCrAlY bond coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2005. **14**(1): p. 23-30.
- [22] L. Ajdelsztajn, J.A. Picas, G.E. Kim, F.L. Bastian, J. Schoenung, V. Provenzano, Oxidation behavior of HVOF sprayed nanocrystalline NiCrAlY powder. *Materials Science and Engineering: A*, 2002. **338**(1): p. 33-43.
- [23] P. Das, S. Paul, P.P. Bandyopadhyay, Tribological behaviour of HVOF sprayed diamond reinforced bronze coatings. *Diamond and Related Materials*, 2019. **93**: p. 16-25.
- [24] P. Sharma, J. Dutta Majumdar, Studies on nano-crystalline CoNiCrAlY consolidated by conventional and microwave sintering. *Advanced Powder Technology*, 2016. **27**(1): p. 72-84.
- [25] S. Saeidi, K.T. Voisey, D.G. McCartney, The Effect of Heat Treatment on the Oxidation Behavior of HVOF and VPS CoNiCrAlY Coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2009. **18**(2): p. 209-216.
- [26] Z. Ding, Q. Miao, W. Liang, Z. Yang, H. Lin, Isothermal oxidation behavior of NiCoCrAlY/ZrO₂ composite coating on γ -TiAl alloy. *Materials Research Express*, 2018. **5**(6): p. 066524.

- [27] E.M. Anghel, M. Marcu, A. Banu, I. Atkinson, A. Paraschiv, S. Petrescu, Microstructure and oxidation resistance of a NiCrAlY/Al₂O₃-sprayed coating on Ti-19Al-10Nb-V alloy. *Ceramics International*, 2016. **42**(10): p. 12148-12155.
- [28] R.A. Mahesh, R. Jayaganthan, S. Prakash, A study on the oxidation behavior of HVOF sprayed NiCrAlY-0.4wt.% CeO₂ coatings on superalloys at elevated temperature. *Materials Chemistry and Physics*, 2010. **119**(3): p. 449-457.
- [29] X. Peng, Y. Guan, Z. Dong, C. Xu, F. Wang, A fundamental aspect of the growth process of alumina scale on a metal with dispersion of CeO₂ nanoparticles. *Corrosion Science*, 2011. **53**(5): p. 1954-1959.
- [30] S.F. Chen, S.Y. Liu, Y. Wang, X.G. Sun, Z.W. Zou, X.W. Li, C.H. Wang, Microstructure and Properties of HVOF-Sprayed NiCrAlY Coatings Modified by Rare Earth. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2014. **23**(5): p. 809-817.
- [31] X. Sun, S. Chen, Y. Wang, Z. Pan, L. Wang, Mechanical Properties and Thermal Shock Resistance of HVOF Sprayed NiCrAlY Coatings Without and With Nano Ceria. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2012. **21**(5): p. 818-824.

