

اعمال و مشخصه‌یابی پوشش‌های نانو ساختار اکسید کروم پاشش حرارتی شده

محسن خسروی^{*}، بهنام لطفی^۱، محمد عرفانمنش^۲ و مظاهر رضانی^۴

چکیده

در این پژوهش پوشش‌های میکروساختار و نانو ساختار اکسید کروم از راه فرآیند پاشش پلاسمایی اتمسفری روی فولاد کم کربن پوشش داده شدند. خصوصیات فازی و ساختاری پوشش‌ها با کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی و پراش پرتو ایکس تجزیه و تحلیل گردیدند. همچنین، ارزیابی‌های مکانیکی همچون ریزسختی سنجی نیز روی پوشش‌ها انجام شد. نتایج بدست آمده از بررسی میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان می‌دهند که پوشش نانو ساختار دارای ریزساختار دوگانه شامل ذرات نانو و نواحی میکرو که به دلیل ذوب و انجماد دوباره ذرات است، می‌باشد؛ در حالی که ریزساختار پوشش میکرو شامل لایه‌های ستونی با ابعاد میکرو می‌باشد. بررسی ریزسختی و سطح مقطع شکست پوشش‌ها نیز نشان داد که پوشش نانو ساختار Cr_2O_3 بدلیل وجود نانو نواحی ریزسختی و تافنس شکست بیش‌تری را نسبت به پوشش میکرو ساختار دارد.

واژه‌های کلیدی: ریزساختار، پاشش پلاسمایی، Cr_2O_3 ، ریزسختی.

۱- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد دانشگاه آزاد واحد تهران جنوب.

۲- عضو هیئت علمی دانشگاه شهید چمران اهواز.

۳- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد دانشگاه صنعتی مالک اشتر شاهین شهر.

۴- عضو هیئت علمی دانشگاه صنعتی مالک اشتر شاهین شهر.

*- نویسنده مسئول مقاله: mohsenkh1987kh@gmail.com

پیشگفتار

پاشش پلاسمایی یک روش پوشش‌دهی دما بالا بوده و به گونه گسترده برای تولید پوشش‌های سرامیکی استفاده می‌شود. این روش برای پاشش سرامیک‌ها، فلزات، پلاستیک‌ها و سرمت‌ها روی زیرلایه سرامیکی یا فلزی بکار می‌رود. در فرآیند پاشش پلاسمایی، اصولاً قوس الکتریکی ایجاد شده در تفنگ پلاσμα، گاز عبوری از بین کاتد و آند را یونیزه کرده و بدین ترتیب، فشار بالایی از گاز یونیزه شده در محیط پلاسمایی ایجاد می‌شود. از انرژی حرارتی این جت پلاσμα برای ذوب و پرتاب مواد با سرعت بالا روی زیرلایه استفاده می‌شود. به دلیل بی اثر بودن و خنثی بودن گاز آرگون، از نظر شیمیایی، معمولاً این گاز به عنوان گاز پایه در فرآیند بکار می‌رود. با افزودن گازهایی نظیر هیدروژن و یا نیتروژن به جریان گاز آرگون، آنتالپی گاز مورد استفاده افزایش می‌یابد [۱]. یکی از مهم‌ترین اکسیدهای سرامیکی که از راه فرآیند پاشش پلاسمایی قابل اعمال می‌باشد، Cr_2O_3 است. این ترکیب از سختی، خواص سایشی و پایداری حرارتی بالایی برخوردار است و در صنایع گوناگونی از جمله موتورهای درون سوز دیزلی، صنایع هوافضا، صنایع الکترونیک، صنایع کشتی سازی، یاتاقان‌ها و غیره استفاده می‌شود [۱].

عموما پوشش‌های میکروساختار پاشش پلاسمایی Cr_2O_3 ساختار نسبتاً ناهمگنی دارند. دلیل عمده ناهمگنی ساختار، توزیع ناپیکنواخت ذرات پودری در شعله پلاσμα بوده که به دلیل یکسان نبودن ریخت شناسی پودرها، اندازه گوناگون پودرها، یکسان نبودن دما و سرعت ذرات در مسیر شعاعی جت پلاσμα و تغذیه ناپیکنواخت پودر در جت پلاσμα می‌باشد. بنابراین، ذرات حین برخورد به زیرلایه دارای سرعت و دمای متفاوتی بوده و به سه حالت ذوب کامل، نیمه ذوب یا جامد به سطح زیرلایه برخورد می‌کنند. در این نوع پوشش‌ها، که از پودر با اندازه میکرون تهیه می‌شود، عیوب ساختاری و خواص مکانیکی با کاهش یافتن راندمان ذوب ذرات افزایش می‌یابد، بنابراین در حین پاشش پلاسمایی سعی بر این است ذرات به گونه کامل ذوب شوند [۲ و ۳]. خواص فیزیکی و مکانیکی مواد در نتیجه کاهش ابعاد دانه آن‌ها از محدوده میکرومتر تا نانومتر بهبود قابل ملاحظه‌ای را نشان می‌دهد. این مطلب

را می‌توان با استفاده از رابطه تجربی هال-پچ برای پوشش‌های نانوساختار تعمیم داد. بر اساس این رابطه با کاهش یافتن اندازه دانه‌ها خواص مکانیکی بهبود می‌یابد [۳ و ۴]. در پوشش‌های نانو ساختار سرامیکی که به وسیله پاشش حرارتی تولید می‌شوند، مناطقی حاوی ذرات نانو وجود دارد که به نانو نواحی موسوم هستند. به دلیل وجود همین نواحی، عمدتاً چقرمگی و سختی نانو ساختارها بیش‌تر است [۵]. دلیل این موضوع می‌تواند مربوط به تمایل بیش‌تر رشد ترک در پوشش‌های میکرو ساختار باشد زیرا در پوشش‌های نانو ساختار ترک‌ها با رسیدن به نانو نواحی متوقف می‌شوند و این مناطق از رشد ترک جلوگیری می‌کنند [۶ - ۹]. با کاهش اندازه ذرات، نسبت سطح به حجم ذرات افزایشی شایان توجه می‌یابد و تبادل گرمایی حین پاشش پلاسمایی بهتر می‌شود و این موضوع موجب افزایش احتمال ذوب شدن ذرات و کاهش حضور نانوذرات در پوشش می‌شود. بنابراین، شرایط پاشش پلاسمایی پوشش‌های نانوساختار را باید به گونه ای تغییر داد که مقدار ذرات نیمه ذوب و ذوب نشده در پوشش‌های نانوساختار بیش‌تر از پوشش‌های معمولی باشد [۱۰] تا از این راه ذرات نیمه مذابی که حین پاشش حرارتی کاملاً ذوب نشده‌اند، به صورت نانوذرات در پوشش باقی بمانند. چون ذرات نانو دارای جرم پایین هستند و در نتیجه فاقد اینرسی کافی جهت عبور از مسیر پاشش پلاσμα می‌باشند و ممکن است بدون ایجاد پوشش روی زیرلایه، دچار جدایش گردند و در محیط پخش شوند. پاشش ذرات نانو بوسیله فرآیند پلاسمایی اتمسفری (APS) با مشکل روبه‌روست. به این دلیل ذرات پیش از پاشش پلاسمایی باید آگلومره شوند. یکی از روش‌های متداول برای تولید پودرهای نانو آگلومره، روش خشک کردن پاششی است. این فرآیند برای درشت کردن پودرهای بسیار ریز استفاده می‌شود و می‌توان با این روش پوشش‌های نانوساختار با خواص بسیار عالی را ایجاد کرد [۱۱ و ۱۲].

در سال‌های اخیر پژوهش‌های گوناگونی روی پوشش‌های پاشش پلاسمایی Cr_2O_3 انجام شده است [۱۱ و ۱۲]، اما در زمینه پوشش‌های نانوساختار Cr_2O_3 که از راه پودر پاشش خشک تولید شده باشد، مقاله‌های محدودی وجود دارد [۱۲ و ۱۳]. هدف از این پژوهش

ارزیابی و مقایسه ساختار و خواص هر دو پوشش اعمال شده با استفاده از پودرهای میکرونی و نانو است، همان گونه که بیان شد، یکی از مهم‌ترین عوامل تاثیرگذار بر کیفیت نهایی پوشش‌های پاشش پلاسمایی خصوصیات پودر شامل ریخت شناسی پودر، اندازه ذرات و چگالی آن است، بدین منظور ابتدا ریخت شناسی و خصوصیات نانو ذرات آگلومره Cr_2O_3 و پودر میکرونی ارزیابی شده و در ادامه خواص و ریزساختار پوشش‌های اعمالی بررسی و با یکدیگر مقایسه می‌شوند.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش برای تهیه نمونه‌های پوششی پاشش پلاسمای دو نوع پودر Cr_2O_3 میکرونی و نانو و یک نوع پودر نیکل-آلومینیوم به عنوان لایه میانی (آستری) استفاده شد. مشخصات پودرهای مورد نظر در جدول ۱ آمده است.

برای جریان پذیری بهتر در تفنگ پلاسمای ذرات نانو با استفاده از فرآیند پاشش خشک آگلومره شدند، ترکیب محلول سوسپانسیون و پارامترهای فرآیند پاشش خشک در جدول ۲ آمده است. برای افزایش چسبندگی پوشش‌ها به زیرلایه، نمونه زیرلایه پیش از فرآیند پاشش مورد عملیات سندبلاست قرار گرفت و سپس در دمای ۱۰۰ درجه سانتی گراد پیش گرم شد. برای اعمال پوشش‌های

روپوشی (FE-SEM) با مدل‌های (Hitachi-S4m60, Hitachi-Mira\Tescan) انجام گرفت. مشخصات پوش Cr_2O_3 با استفاده از آنالیز پراش پرتو ایکس (Xpert-pro) ساخت شرکت Philips) با استفاده از اشعه $CuK\alpha$ در محدوده 2θ از ۲۰ تا ۸۰ درجه با کارت‌های استاندارد مطابقت داده شد. جهت زبری سنجی پوشش‌ها از دستگاه زبری سنج (Time Group) مدل (Tr200) استفاده شد.

برای انجام آزمایش ریز سختی از دستگاه ریز سختی سنج ویکرز ساخت شرکت Bowers استفاده شد. نیروی اعمالی در این روش برای نمونه‌های پوشش داده شده ۵۰ گرم و زمان اعمال نیرو بر مقطع عرضی نمونه‌ها به وسیله فرورونده ویکرز ۱۵ ثانیه در نظر گرفته شد.

جدول ۱- مشخصات پودرهای اولیه Cr_2O_3 .

نوع مشخصه	پودر میکرونی Cr_2O_3	پودر نیکل-آلومینیوم Cr_2O_3	پودر نانو Cr_2O_3
ترکیب پودر	۵/۷Ni-Al	۹۹/۶۹٪	۹۹٪+
اندازه پودر	۴۵ تا ۹۰ میکرومتر	۲۰ تا ۴۵ میکرومتر	۵۰ نانومتر
روش ساخت پودر	ریخته گری و خردکردن	ریخته گری و خردکردن	سل-ژل
ریخت شناسی ذرات	گوشه دار	گوشه دار	کروی
شرکت سازنده	GTV آلمان	GTV آلمان	Nabond چین

جدول ۲- ترکیب محلول سوسپانسیون و پارامترهای فرآیند پاشش خشک.

آب مقطر	پودر نانو اکسید کروم	چسب پلی وینل الکل	سرعت چرخش دیسک	دمای محفظه	نرخ تغذیه دهی پودر
۶۷۰ g	۱۰۰ g	۳/۶ g	۱۰۰۰۰ دور بر دقیقه	۱۷۰ °C	۱ لیتر در هر ساعت
(/۸۶/۵)	(/۱۳)	(/۰/۵)			

جدول ۳- پارامترهای پاشش پلازما برای پوشش های Cr₂O₃.

پارامتر	مقدار / مشخصه	مقدار / مشخصه	مقدار / مشخصه
نوع پوشش	Cr ₂ O ₃ نانو	Cr ₂ O ₃ میکرون	نیکل-آلومینوم
گاز حمل کننده پودر آرگون (دقیقه/لیتر)	۳	۳	۲
گاز اولیه آرگون (دقیقه/لیتر)	۴۵ دقیقه/لیتر	۴۵ دقیقه/لیتر	۶۰
گاز ثانویه نئیدروژن (دقیقه/لیتر)	۱۲	۸	۱۲
جریان الکتریکی (آمپر)	۶۰۰	۶۰۰	۶۰۰
ولتاژ (ولت)	۵۴	۴۹	۶۴
سرعت تزریق پودر (دقیقه/گرم)	۲۰	۲۰	۲۰
فاصله اسپری (میلی متر)	۱۰۰	۱۲۰	۱۲۰

نتایج و بحث

شکل ۱ تصاویر میکروسکوپ الکترونی (FE-SEM) مربوط به پودرهای نانو آگلومره را نشان می‌دهند. از این تصاویر می‌توان دریافت که ذرات آگلومره شده به صورت کاملاً کروی و نیمه کروی بوده و افزایش دمای مخزن خشک کننده به ۱۷۰ °C سبب شده نانو ذرات به شکل مناسب زینتر شده و از اتصال و توزیع یکنواختی برخوردار شوند. اندازه‌گیری دانه‌های پودر با استفاده از نرم افزار آنالیز تصویر (Image-j) نشان داد که اندازه ذرات آگلومره بین ۱۰ تا ۴۰ میکرومتر بوده است. بر اساس نظریه کیم و همکاران [۱۱] مخلوط همگن پایدار در محفظه خشک کن به وسیله گاز گرم، به سرعت به قطرات ریز تبدیل می‌شود و در ادامه به دلیل تبخیر سریع حلال، قطره منقبض شده و مایع از مرکز به بیرون قطره حرکت کرده و ذرات جامد را نیز با خود به غشاء بیرونی قطره می‌آورد. اگر نرخ تبخیر مرکز قطره بیش‌تر از نرخ نفوذ مایع به سطح قطره باشد، منفذی در مرکز قطره بوجود آمده که برای پوشش ایجاد

شده مناسب نیست. بنابراین، باید شرایط خشک کردن پاششی را به گونه ای تنظیم کرد که نرخ نفوذ حلال به غشاء بیرونی بیش‌تر از نرخ تبخیر حلال در مرکز قطره باشد تا از ایجاد منفذهای کروی و نامنظم در وسط پودر آگلومره شده جلوگیری شود. با توجه به نبود سوراخ‌های بزرگ در وسط پودر به نظر می‌رسد نتایج بدست آمده و پارامترهای پاشش خشک در این پژوهش مناسب بوده و با یافته‌های کیم مطابقت دارد. نکته دیگری که باید گفته شود سوراخ‌های بسیار ریز بین ذرات نانو آگلومره است که تا حدودی ساختار ذره آگلومره را پرمفد کرده است (شکل ب). اصولاً پودر میکرونی که بدون تخلخل می‌باشد، دارای هدایت حرارتی بالاتری است و نسبت به تغییرات در دمای شعله پلازما حساسیت بیش‌تری دارد. در واقع، این حساسیت مربوط به پارامترهای پاشش پلازمایی اعمال شده برای ایجاد پوشش میکروساختار خواهد بود. از سوی دیگر، هدایت حرارتی کم‌تر پودرهای نانوساختار [۶] این فرصت را برای بخشی از پودر ایجاد

بوده، بنابراین داری تخلخل بیش‌تری نسبت به پوشش‌های معمولی پاشش پلاسمایی هستند.

ضخامت پوشش‌ها به وسیله نرم افزار آنالیز تصویر اندازه گرفته شد که پوشش میکروساختار $160-118 \mu\text{m}$ ، پوشش نانوساختار $138-98 \mu\text{m}$ و لایه میانی هم حدود $70-50 \mu\text{m}$ برای هر دو پوشش ضخامت دارد.

شکل ۳ تصاویر میکروسکوپ الکترونی (FE-SEM) از سطح پوشش میکروساختار و نانوساختار Cr_2O_3 را نشان می‌دهد.

از این تصاویر مشخص می‌شود که پوشش‌ها از ورقه‌هایی با اندازه‌های گوناگونی تشکیل شده‌اند. بنظر می‌رسد در پوشش میکروساختار ورقه‌های کاملاً ذوب شده بیش‌تری وجود دارد و تغییر شکل ذرات بهتر صورت گرفته است در نتیجه، سطح نسبتاً صاف و با زبری کم‌تری نسبت به پوشش نانوساختار دارد. تخلخل در سطح در این پوشش نسبت به پوشش نانوساختار کم‌تر مشاهده شد. مهم‌ترین دلیلی که برای حضور ذرات نانو و مقدار آن‌ها در پوشش می‌توان ذکر کرد، پارامتر بحرانی پاشش پلاسمای [CPSP] و گاز ثانویه است که مستقیماً دمای جت پلاسمای تحت تاثیر قرار می‌دهد [۳]. این دو مولفه برای هر دو ساختار نشان می‌دهد که ضریب [CPSP] و گاز ثانویه در پوشش میکرو ساختار به ترتیب $\frac{W \cdot \text{Min}}{\text{Lit}}$ ۷۳۳ و $\frac{W \cdot \text{Min}}{\text{Lit}}$ ۱۲ و برای پوشش نانوساختار، $\frac{W \cdot \text{Min}}{\text{Lit}}$ ۶۵۳ و $\frac{W \cdot \text{Min}}{\text{Lit}}$ ۸ است. در نتیجه، پودر میکرونی Cr_2O_3 ، در

دمای پلاسمای و راندمان ذوب بالاتری نسبت به پودر آگلومره قرار داشته است. با توجه به این‌که یکی از مهم‌ترین اهداف این پژوهش ذرات ذوب نشده در حد نانو ساختار بوده است و از سوی دیگر، با درک این نکته که هرچه دمای مشعل پلاسمای بالاتر برود، ویسکوزیته قطرات مایع و نواحی آگلومره شده کاهش و ورقه‌های بیش‌تری تشکیل شده و سطح تخلخل در پوشش کم می‌شود [۱۶]. لذا، از نتایج بدست آمده در این پژوهش به نظر می‌رسد اثر حضور ذرات ذوب نشده در حد نانو بر میکروسختی و چقرمگی بیش‌تر از اثر حضور تخلخل در ساختار پوشش

می‌کند که به گونه کامل ذوب نشده و یا حتی به حالت اولیه در ساختار پوشش باقی بماند در نتیجه میکروساختار نهایی حساسیت کم‌تری به شرایط پاشش دارد و خواص مکانیکی را بهبود می‌بخشد [۱۴ و ۱۳].

پوشش‌های Cr_2O_3 اعمال شده با استفاده از پودر میکرونی و پودر نانو آگلومره شده همراه با لایه میانی Ni-Al با میکروسکوپ نوری مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۲ تصاویر مقطع عرضی این پوشش‌ها را نشان می‌دهد. همان‌گونه که از تصاویر مشاهده می‌شود، طبیعت پوشش‌های Cr_2O_3 تقریباً یکسان بوده و دارای ساختاری لایه‌ای همراه با تخلخل است. این سوراخ‌ها به سبب حبس شدن گاز محیط، ذرات ذوب نشده و قرار گرفتن ناقص ورقه‌ها روی یک‌دیگر تشکیل می‌شوند. در فرآیند پوشش‌دهی پاشش پلاسمای شرایط به گونه ای است که حین تغذیه پودر یا ذرات ماده پوششی به مشعل پلاسمای همواره ذرات به گونه یکنواخت به منطقه پلاسمای وارد نشده و لذا، فرآیند پخش شدن و پیوند لایه‌ها برای شکل‌گیری ساختار پوشش به صورت همگن و پیوسته نخواهد بود [۱۵]. بدین ترتیب وجود اختلاف ضخامت پوشش، تخلخل، و عیوب دیگر در ساختار این پوشش‌ها امری اجتناب ناپذیر است. این وضعیت را می‌توان در فصل مشترک پوشش و لایه میانی و هم‌چنین، لایه میانی و زیرلایه بیش‌تر مشاهده کرد زیرا در مراحل اولیه پاشش بدلیل این‌که شرایط برخورد، پخش شدن ذرات و در نهایت، انجماد و انتقال حرارت هنوز حالت پایداری به خود نگرفته است، عیوب بیش‌تری در منطقه فصل مشترک به چشم می‌خورد. با توجه به (نقاط A) در هر دو پوشش، به نظر می‌رسد در پوشش میکروساختار Cr_2O_3 این وضعیت بیش‌تر به چشم می‌خورد. اندازه‌گیری تخلخل پوشش‌ها با استفاده از روش تجزیه و تحلیل تصویری انجام شد. میانگین تخلخل در پوشش پاشش پلاسمایی نانوساختار ۱۳٪ و در پوشش میکروساختار ۱۰٪ گزارش شد. هم‌چنین، تخلخل در پوشش‌ها توزیع نایک‌نواختی داشته و شکل آن‌ها از کروی تا کشیده متفاوت است. اصولاً در پوشش‌های نانوساختار پاشش پلاسمایی، به دلیل بیش‌تر بودن تعداد ذرات ذوب نشده (مناطق نانوساختار) بیش‌تر

¹ - Cutical plasma

یکدیگر در پوشش میکروساختار دیده می‌شود که در پوشش نانوساختار مشاهده نمی‌شود (شکل ۵الف). این مطلب را می‌توان این‌گونه توجیح کرد که اصولاً استحکام مرز دانه‌ها به دلیل افزایش یافتن تنش‌های باقی مانده ضعیف است از سوی دیگر، با افزایش یافتن اندازه دانه‌ها این تنش‌ها ممکن است که افزایش یابد و با اعمال تنش‌های خارجی منجر به شکست بین دانه‌ای شود، اما ساختار نانو تنش‌های باقی مانده را کاهش و استحکام مرز دانه‌ها را افزایش می‌دهد [۱۸].

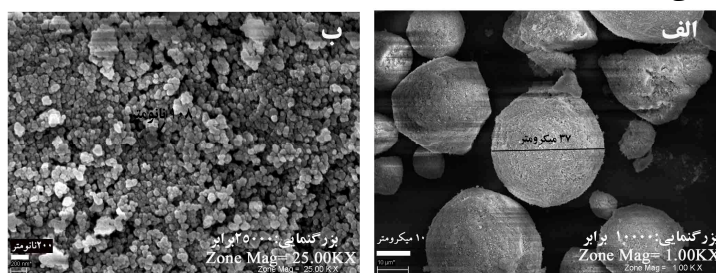
شکل ۶ نتایج میکروسختی ویکرز پوشش‌های Cr_2O_3 را به صورت نیم رخ سختی از سطح تا فصل مشترک و در نهایت، زیرلایه نشان می‌دهد. این داده‌ها از سطح مقطع عرضی پوشش‌ها بدست آمده و هر نقطه میانگین اندازه سه نقطه اثر اعمالی در یک فاصله مشخص است. همان‌گونه که نتایج نشان می‌دهند، بیش‌ترین میکروسختی برای پوشش نانوساختار Cr_2O_3 ، ۱۳۸۱ ویکرز و برای پوشش میکروساختار ۱۰۷۳ ویکرز بوده است. این مقدارهای بیشینه برای هر دو تقریباً در فاصله $50 \mu m$ از سطح پوشش‌ها بدست آمده است. در مجموع، سختی پوشش‌های سرامیکی در تمام نقاط پوشش یکسان و اختلاف چندانی با یکدیگر ندارد. در هر دو حالت پوشش میکروساختار و نانوساختار Cr_2O_3 ، به دلیل این که لایه میانی نیکل-آلومینوم دارای سختی بالاتری نسبت به زیرلایه فولادی است، لذا سختی از پوشش‌ها بسمت زیرلایه با شیب ملایم‌تری تغییر یافته است.

نتایج تست سختی نشان می‌دهد که پوشش نانوساختار سختی بیش‌تری از پوشش میکروساختار دارد و مقدارهای بدست آمده از سختی هر دو پوشش، از یافته‌های آقای سینگ و همکاران در مورد دو نوع پوشش Cr_2O_3 بیش‌تر است [۲].

است. در نتیجه کاهش راندمان ذوب ذرات نانو آگلومره نسبت به ذرات میکرونی منطقی است. در ضمن باید به این نکته نیز توجه شود که در پوشش‌های میکرو ساختار پاشش پلاسمایی با افزایش راندمان ذوب، چسبندگی، استحکام بین لایه‌ای و خواص مکانیکی افزایش می‌یابد [۲]، بنابراین، بایستی بهترین حالت ساختار در هر دو نوع پوشش را در نظر گرفت تا بتوان عملکرد آن‌ها را مقایسه کرد.

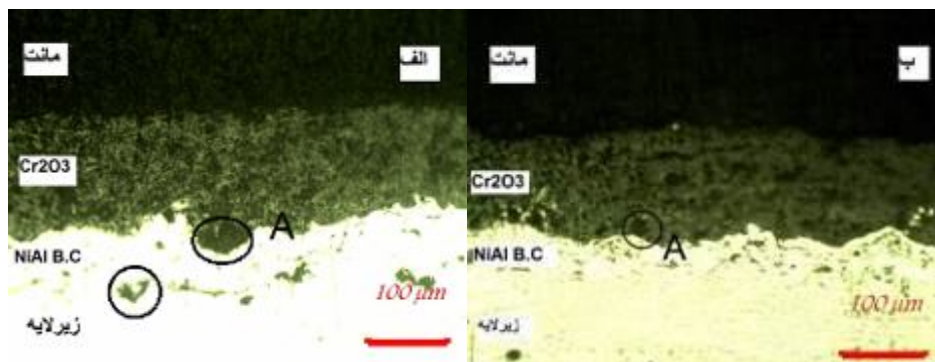
در شکل ۴ می‌توان الگوی پراش اشعه ایکس مربوط به فازهای تشکیل شده پس از فرآیند پاشش و تشکیل پوشش را مشاهده کرد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود بر اساس الگوی پراش، پس از تشکیل پوشش فاز Cr_2O_3 (سیستم کریستالی رمبوهدرال) در ساختار پوشش‌ها تشکیل شده است. الگوی مشابهی از پراش پرتو ایکس با استفاده از پودر اندازه نانو و میکرون Cr_2O_3 در پژوهش سینگ و همکاران یافت شد [۲]. مقدار زبری میانگین (Ra) برای پوشش میکروساختار در دو جهت عمود بر هم $4/27 \mu m$ و $5/14 \mu m$ و برای پوشش نانو $5/33 \mu m$ و $6/23 \mu m$ گزارش شده است. زبری‌های میانگین بدست آمده نسبت به پژوهش cellard و همکاران [۸] کم‌تر و از Singh و همکارانش [۲] بیش‌تر بود.

شکل ۵ تصاویر سطح مقطع شکست پوشش‌های Cr_2O_3 را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود سطح شکست پوشش نانوساختار زبرتر از سطح شکست پوشش میکروساختار است که به احتمال زیاد، ناشی از تافنس شکست بالاتر این پوشش نسبت به پوشش میکروساختار است. عموماً مقاومت به رشد ترک در سطح مقطع شکست با زبری بیش‌تر نمایان می‌شود که تاثیری مستقیم بر تافنس شکست پوشش‌ها دارد [۱۷ و ۱۵]. هم‌چنین شکاف‌هایی ناشی از جدا شدن ورقه‌ها از

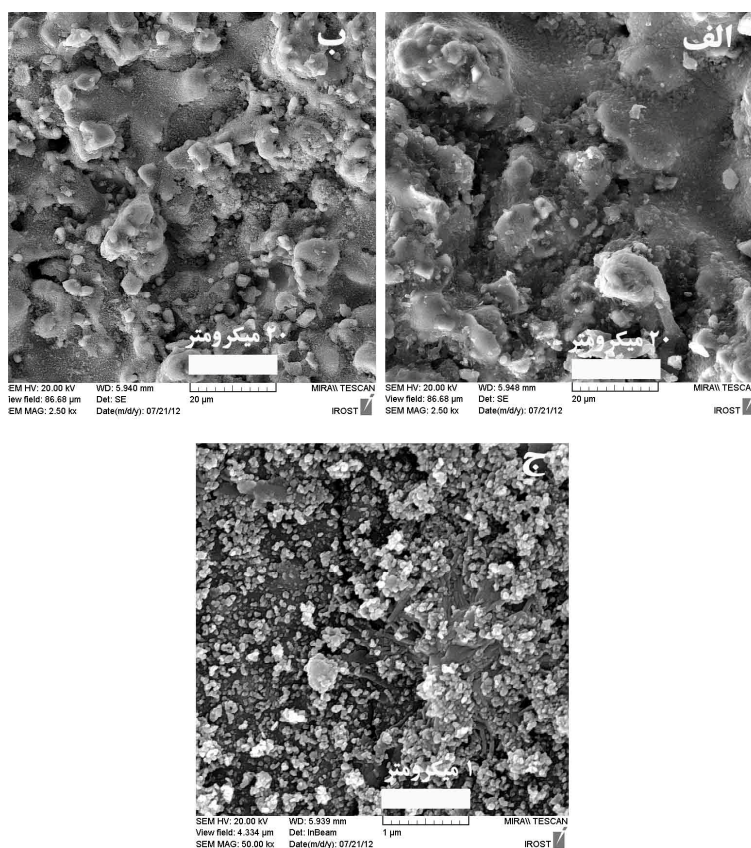


شکل ۱- تصاویر FE-SEM از ریخت شناسی پودرهای نانو آگلومره،

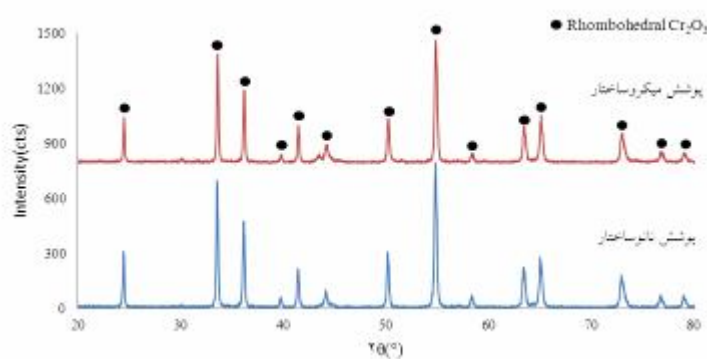
الف) بزرگ‌نمایی ۱۰۰۰ برابر ب) بزرگ‌نمایی ۲۵۰۰۰ برابر



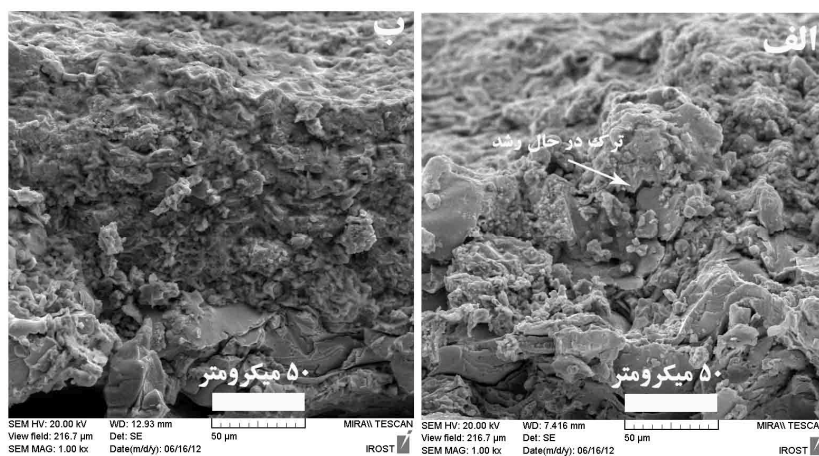
شکل ۲- تصاویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار پوشش های Cr_2O_3 (الف) پوشش میکروساختار (ب) پوشش نانوساختار.



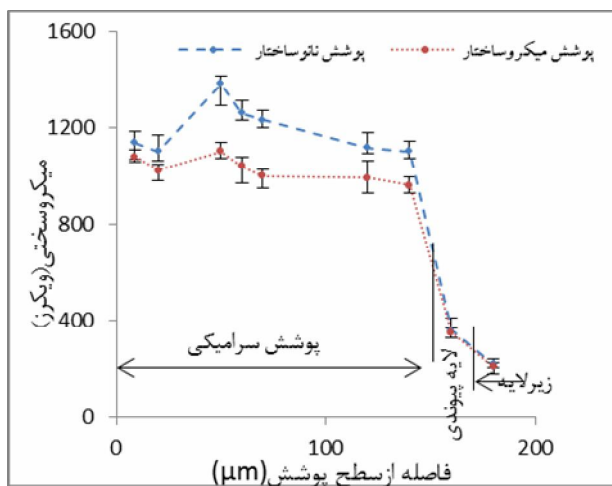
شکل ۳- تصاویر FE-SEM از سطح پوشش های Cr_2O_3 (الف) پوشش میکروساختار با بزرگ‌نمایی بیشتر (ب) پوشش نانوساختار (ج) پوشش نانوساختار با بزرگ‌نمایی بیشتر



شکل ۴- الگوی پراش پرتو ایکس پوشش های Cr_2O_3



شکل ۵- تصاویر FE-SEM سطح مقطع شکست پوشش های Cr_2O_3 (الف) پوشش میکروساختار (ب) پوشش نانوساختار.



شکل ۶- نیم رخ سختی پوشش های Cr_2O_3 .

بر اساس رابطه تجربی هال- پیچ، سختی با کاهش اندازه دانه‌های پوشش افزایش پیدا می‌کند. با کاهش یافتن اندازه دانه‌ها در حد نانو، مقدار مرزدانه‌ها در یک منطقه افزایش یافته و جهت‌گیری دانه‌ها متفاوت می‌شود. در نتیجه، حرکت نابه‌جایی‌ها به گونه موثر در مقیاس نانو متوقف می‌شود لذا، سختی افزایش می‌یابد. در ضمن، این رابطه برای سرامیک‌ها و فلزات صدق می‌کند [۱۳ و ۱۹].

نتیجه‌گیری

(۱) پودرهای نانواگلومره شده با استفاده از فرآیند پاشش خشک همگن، متراکم و تقریباً کروی شکل بوده و از قابلیت پاشش مناسبی برخوردار است.

(۲) هر دو پوشش میکروساختار و نانوساختار پاشش پلاسمایی Cr_2O_3 از ساختار لایه‌ای شامل ذرات به گونه کامل ذوب شده، نیمه ذوب و یا جامد و تا حدودی متخلخل تشکیل شده‌اند. در پوشش نانوساختار ذرات نانو در بین ورقه‌ها قرار گرفته است.

(۳) پوشش نانوساختار از استحکام مرزدانه‌ای و تافنس شکست بهتری نسبت به پوشش میکروساختار Cr_2O_3 برخوردار است.

(۴) مقادیر ریز سختی برای پوشش نانوساختار Cr_2O_3 ، ۱۳۸۱ ویکرز و برای پوشش میکروساختار ۱۰۷۳ ویکرز بدست آمد. دلیل افزایش سختی در پوشش نانوساختار به سبب کاهش یافتن اندازه دانه‌ها بدلیل وجود ذرات نانو است.

Reference

- 1- H.Cetinel, E.Celikb and M.I. Kusoglu, "Tribological Behavior of Cr_2O_3 Coatings as Bearing Materials, Materials", Processing Technology, vol. 196, pp. 259-265, 2008.
- 2-V.P.Singh., A .Sil and R.Jayaganthan, "Tribological Behavior of Plasma Sprayed Cr_2O_3 -3% TiO_2 Coatings", Wear, vol.272, pp.149-158, 2011.
- 3-V.P.Singh, A.Sil and R. Jayagan than, "Wear of Plasma Sprayed Conventional and Nanostructured Al_2O_3 and Cr_2O_3 , Based Coatings, " Springer, Published Online 8 December 2011.
- 4-E.Brinley, K.S.Babu, and S. Seal, "The Solution Precursor plasma Spary Processing of Nanomaterials", Functional Coatings, Vol. 59, PP.54-59, 2007.
- 5-A. Cavaleiro, J.M. De Hosson, "Nanostructured Coatings", Nanostructure science and Technology, ISBN-10:0387256423 Springer, 2006.
- 6-P.P. Bandyopadhyay, D. Chicot b, B. Venkateswarlu, V. Racherla, X. Decoopman and J. Lesage, "Mechanical Properties of Conventional and Nanostructured Plasma Sprayed Alumina Coatings", Mechanics of Materials Vol.53, pp. 61-71, 2012.

- 7-V.P .Singh, A.Sil and R. Jayaganthan, "A Study on Sliding and Erosive Wear Behaviour of Atmospheric Plasma Sprayed Conventional and Nanostructured Alumina Coatings", Materials and Design, vol.32, pp584-591, 2011.
- 8-M. Gell, E.H. Jordan, Y.H. Sohn, and D. Goberman, "Development and implementation of plasma sprayed nanostructured ceramic coatings", Surface and Coatings Technology, Vol.146, pp.48-54, 2001.
- 9-M. Erfanmaneshn, S. R. Bakhshi, M. Khajelakzay, and M. Salekbafghi, "The effect of argon shielding gas at plasma spray process on the structure and properties of $MoSi_2$ coating", Ceramics International, vol. 40, pp.4529-4533, 2014.
- 10-R.S. Lima, and B.R. Marple, "Thermal Spray Coatings Engineered from Nanostructured Ceramic Agglomerated Powders for Structural, Thermal Barrier and Biomedical Applications: A Review", Journal of Thermal Spray Technology, Vol. 16, pp. 40-63, 2007
- 11-B.K. Kim, D.W. Lee, and G.H. Ha, "Plasma Spray Coating of Spray-Dried Cr_2O_3 3%wt TiO_2 Powder", Journal of Thermal Spray Technology, Vol 10(1), pp.133, 2001.

- 12-A. Cellard, V. Garnier, G. Fantozzi, G. Baret, and P. Fort, "Wear Resistance of Chromium Oxide Nanostructured Coatings", *Ceramics International*, Vol. 35, PP. 913-916, 2009.
- 13-E.Sánchez, E.Bannier, V. Cantavella, M. D. Salvador, E. Klyatskina, J. Morgiel and A.R. Boccaccini, "Deposition of Al₂O₃-TiO₂ Nanostructured Powders by Atmospheric Plasma Spraying", *Journal of Thermal Spray Technology*, Vol 17(3), pp.329, 2008.
- 14-A. Cellard, R. Zenati, V. Garnier, G. Fantozzi and G. Baret, "Optimization of Chromium Oxide Nanopowders Dispersion for Spray-Drying", *Journal of the European Ceramic Society*, Vol.27 pp.1017-1021, 2007.
- 15-Ouyang, J.H, and Saasaki, S., "Unlubricated Friction and Wear Behavior of Low Pressure Plasma Spary ZrO₂ Coating at Elevated Temperature", *Ceramics International*, Vol.27, pp.251-260, 2001.
- 16-H. Luo, D. Goberman, L. Shaw, and M. Gell, "Indentation Fracture Behavior of Plasma-Sprayed Nanostructured Al₂O₃-13wt.%TiO₂ Coatings", *Materials Science and Engineering Vol.346*, pp. 237-245, 2003.
- 17-K. Yang, X. Zhou, H. Zhao and S. Tao, "Microstructure and Mechanical Properties of Al₂O₃-Cr₂O₃ Composite Coatings Produced By Atmospheric Plasma Spraying", *Surface and Coatings Technology*, Vol . 206 ,pp. 1362-1371, 2011.
- 18-X. Lina, Y. Zenga, C.A. Ding and P. Zhang, "Effects of Temperature on Tribological Properties of Nanostructured and Conventional Al₂O₃-3 wt.% TiO₂ Coatings", *Wear* 256, 1018-1025, 2004.
- 19-H. Chen, Y. Zhang, and C. Ding, "Tribological Properties of Nanostructured Zirconia Coatings Deposited By Plasma Spraying", *Wear*, Vol.253, pp885-893, 2002.