

بررسی تأثیر شدت جریان ورودی پلاسما بر مشخصات پوشش کامپوزیتی آلومینا-تیتانیای پاشش پلاسمایی شده

محمد حسین فتحی

دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان

محمد غیرتی

دانشکده علوم و فناوریهای نوین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی

صنعتی و فناوری پیشرفته

مهران نحوی

دانشکده مکانیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته پژوهشکده فولاد، دانشگاه صنعتی اصفهان

علیرضا احمدی

(دریافت مقاله: ۹۳/۰۳/۳۰ - پذیرش مقاله: ۹۳/۰۸/۱۷)

چکیده

در پژوهش حاضر، تلاش شد با طراحی و ایجاد پوشش کامپوزیتی آلومینا-تیتانیا و بررسی تأثیر شدت جریان الکتریکی ورودی پلاسما روی خواص پوشش، ایده‌آل‌ترین شرایط عملیات پاشش پلاسمایی جهت بهبود مورفولوژی، خواص مکانیکی و رفتار ذرات در حال پرواز در شعله پلاسما به دست آید. پوشش‌های کامپوزیتی آلومینا-تیتانیا با تکنیک پاشش پلاسمایی اتمسفری و تحت شدت جریان الکتریکی ورودی متفاوت تهیه شد (شدت جریان ۶۰۰، ۷۰۰ و ۸۰۰ آمپر). مشخصه‌یابی و ارزیابی پوشش با تکنیک‌های پراش پرتو ایکس و میکروسکوپ الکترونی رویشی به عمل آمد. همچنین ریزسختی و استحکام چسبندگی پوشش‌ها نیز بررسی شد. دمای سطح ذرات با در نظر گرفتن هندسه سه بعدی از شعله پلاسما شبیه‌سازی شد. نتایج نشان می‌دهد که پوشش کامپوزیتی ایجاد شده در شدت جریان ۷۰۰ آمپر دارای بهترین کیفیت سطح از نظر خواص مکانیکی، مورفولوژی و تخلخل است. در این شدت جریان، ذرات با سرعت مناسب و بهینه ۱۳۹ متر بر ثانیه به سطح پوشش برخورد داشته‌اند. همچنین ریزسختی و استحکام چسبندگی پوشش به مقدار $HV_{1.9}$ ۱۴۰۹ و ۲۸ مگاپاسکال افزایش داشته است.

واژه‌های کلیدی: پاشش پلاسمایی، پوشش آلومینا-تیتانیا، خواص مکانیکی، مورفولوژی، دمای ذرات.

The effect of plasma spraying current on the characteristics of alumina - titania composite coating prepared by the atmospheric plasma spraying technique

M. Gheirati

Faculty of Sciences and High Technology, Graduate University Of Advance Technology

M. H. Fathi

Department of Materials Engineering,
Isfahan University of Technology

A. Ahmadi

Department of Mechanical Engineering,
Graduate University Of Advance Technology

S. M. Nahvi

Steel Institute, Isfahan University of Technology
(Received 20 June 2014, accepted 8 November 2014)

Abstract

In this study, it was attempted to design a composite coating based on Alumina - Titania, and evaluate the effect of spraying current on coating properties in order to obtain the best conditions to improve the in-flight behavior of Particles, mechanical properties and morphology of plasma sprayed coatings. Alumina - Titania composite coatings were prepared via plasma spray technique using different input powers (600, 700 and 800 A). Characterization of prepared coatings was performed using X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM) techniques. Also microhardness and strength adhesion of the composite coatings was studied. Three dimensional (3D) numerical models were developed to study the temperature of fed particles. The investigation showed that the composite coating sprayed at a current of 700 A it possessed the best quality in terms of amount of porosity and the surface morphology and the most value of mechanical properties. In this current, Particles with Appropriate and optimal velocity of 139 m/s has collided on the surface of coating. Also microhardness and adhesion strength of the coating is increased to the value of 1409 $HV_{1.9}$ and 28 MPa Respectively.

Keywords: Plasma Spray, Alumina – Titania Coating, Mechanical Properties, Morphology, Fed Particles Temperature.

E-mail of corresponding author: Mohammadgheirati@yahoo.com.

مقدمه

ترکیب مناسبی از خواص از جمله: چگالی کم، سختی بالا و پایداری شیمیایی مناسب، استفاده از پوشش‌های سرامیکی را به عنوان پوشش‌های محافظ در برابر سایش، فرسایش و خوردگی افزایش داده است [۱-۳]. پاشش پلاسمایی یک تکنیک مفید و تثبیت شده برای تولید پوشش‌های سرامیکی است [۴]. پوشش‌های سرامیکی تهیه شده با تکنیک پاشش پلاسمایی در گستره وسیعی از برنامه‌های کاربردی و صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۵ و ۶].

پوشش‌های پایه آلومینا از گسترده‌ترین پوشش‌هایی است که توسط تکنیک پاشش پلاسمایی پوشش داده می‌شود. این پوشش یک جایگزین مناسب در بسیاری از برنامه‌های کاربردی که نیاز به افزایش مقاومت به سایش، فرسایش و سختی دارند؛ است [۷ و ۸]. افزودن تیتانیا به آن می‌تواند باعث بهبود تافنس پوشش و در نتیجه عملکرد مطلوب‌تر پوشش شود [۹].

پوشش‌های پاشش پلاسمایی ذاتاً دارای میکروتک و تخلخل سطحی هستند [۵]. سرعت سرد شدن سریع پوشش و انتخاب نامناسب پارامترهای پوشش‌دهی از اصلی‌ترین دلایل این نقایص ساختاری هستند. این نقایص ساختاری باعث تضعیف خواص پوشش می‌شود [۵ و ۱۰]. نگاهی به پژوهش‌های قبلی [۸-۱۱] نشان می‌دهد که کیفیت سطح و ویژگی‌های پوشش وابستگی زیادی به انتخاب درست و مناسب پارامترهای تکنیکی پاشش دارد. این پارامترها شامل شدت جریان ورودی پلاسما، اختلاف ولتاژ، فاصله پوشش‌دهی، نوع و ترکیب گاز پلاسما، اندازه ذرات و سرعت تزریق پودر به شعله پلاسما است [۱۲].

ارزیابی تأثیر میکروساختار، تخلخل و نقایص ساختاری بر کیفیت و کارایی پوشش کار پیچیده‌ای است و نیازمند ارزیابی عواملی از جمله ویژگی‌های مکانیکی و تریبولوژیکی پوشش است [۱۳]. در سال‌های اخیر اندازه‌گیری دما و سرعت ذرات و تأثیر آن بر پهن شدن و

ساختار لاملار پوشش از جنبه‌های نوین این پژوهش‌ها بوده است. اندازه‌گیری سرعت و دمای ذرات موجود در شعله پلاسما درک درستی از شرایط ذوب شدن ذرات و برخورد ذرات به سطح زیرلایه را فراهم می‌نماید. همچنین سرعت و دمای ذرات موجود در پلاسما با تأثیر بر میزان پهن‌شدگی اسپلت‌ها و سرعت انجماد ذرات، بر میکروساختار نهایی پوشش تأثیر می‌گذارد [۱۴]. از آن‌جا که هدایت الکتریکی سرامیک‌ها بسیار کمتر از فلزات است، انتخاب درست و مناسب شدت جریان الکتریکی ورودی پلاسما پارامتر موثری بر ذوب ذرات، سرعت دادن به آن‌ها و کنترل میکروساختار و خواص و ویژگی‌های پوشش است [۱۳].

در پژوهش حاضر، با تغییر در شدت جریان الکتریکی ورودی پلاسما، تأثیر آن بر سرعت و دمای سطح ذرات، مورفولوژی، خواص مکانیکی و ترکیب فاز موجود در ساختار پوشش ارزیابی شده است. ارتباط استحکام چسبندگی پوشش، تخلخل و تراکم پوشش با سرعت و دمای ذرات موجود در شعله پلاسما مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین خواص و ویژگی‌های پوشش تولید شده با نمونه‌های مشابه مقایسه شد.

مواد و روش تحقیق

نمونه‌هایی از فولاد زنگ نزن ۳۱۶ ال به شکل استوانه به قطر ۲۵ میلی‌متر به عنوان زیرلایه برای تهیه پوشش کامپوزیتی آلومینا-تیتانیا استفاده شد. نمونه‌های تهیه شده پس از آماده‌سازی سطح، با ذرات آلومینا (Al_2O_3) با مش ۳۶ ذره پاشی شد تا زبری معادل ۳/۵۱ میکرومتر ایجاد گردد (SM7 profiltest). سپس نمونه‌ها برای چربی زدایی با استون (شرکت مرک^۱ آلمان) شسته و با آب مقطر تمیز و برای مطالعات بعدی خشک شد.

پوشش آلومینا-تیتانیا با ۳٪ وزنی تیتانیا به عنوان پوشش کامپوزیتی برای پوشش‌دهی با تکنیک پاشش پلاسمایی

¹ Merck

نهایی گزارش شد. برای افزایش دقت مقدار ریزسختی اندازه‌گیری شده، مورفولوژی پوشش توسط میکروسکوپ نوری استریو در بزرگنمایی ۵۰ برابر بررسی شد. نقاطی که از نظر تخلخل نزدیک به یکدیگر تشخیص داده شد توسط یک علامت‌گذاری رنگی مشخص و مقدار ریزسختی در این نقاط نیز اندازه‌گیری شد تا از این طریق بتوان از اثر تخلخل بر ریزسختی پوشش صرف‌نظر و دقت آزمون سختی‌سنجی را بالا برد. این اندازه‌گیری برای نیروی اعمالی ۲/۹۴۲ نیوتن و تخلخل ثابت و محلی ۰/۶٪ صورت پذیرفت.

جدول ۱. پارامترهای اجرای پوشش پلاسمایی برای تولید پوشش کامپوزیتی آلومینا-تیتانیا.

پارامتر	مقدار
جریان (A)	۶۰۰، ۷۰۰، ۸۰۰
فاصله (mm)	۱۱۵
شار ورودی گاز پلاسما (SLPM)	۷۰
نرخ تغذیه ($\frac{gr}{min}$)	۲۰
نوع گاز پلاسما (پلاسما-کمکی-حامل)	Ar-N ₂ -Ar

به‌منظور ارزیابی مورفولوژی پوشش، از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل VEGA\TESCAN-LMU مجهز به آنالیزگر طیف‌سنج انرژی اشعه ایکس (EDS) ساخت کشور جمهوری چک استفاده شد. نمونه‌ها قبل از استفاده در دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی توسط لایه‌ای از طلا پوشش داده شد دلیل این کار هدایت الکتریکی پایین پوشش آلومینا-تیتانیا بود. میزان تخلخل پوشش برای مساحت تقریبی (μm) ۶۰۰×۶۰۰ و با نرم‌افزار Clemex اندازه‌گیری شد. نحوه محاسبه به این صورت بود که تخلخل‌های موجود در سطح پوشش با رنگ متفاوتی

اتم‌سفری انتخاب شد. ذرات آلومینا (شرکت شارلوا^۱ با خلوص ۹۹.۹۹ درصد) به شکل کروی و با اندازه دانه ۵۰ میکرون و تیتانیا (شرکت سیگما آلدریچ^۲) با اندازه دانه ۱۰۰ نانومتر بود. ضخامت تقریبی پوشش ۱۵۰ میکرون انتخاب و پوشش در ۵ پاس متوالی تولید شد. پارامترهای اجرایی پوشش پلاسمایی برای تولید پوشش کامپوزیتی آلومینا-تیتانیا در جدول ۱ آمده است.

به‌منظور اندازه‌گیری سرعت ذرات موجود در محیط پلاسما دو عدد دیسک چرخان طراحی گردید. این دیسک‌ها به یکدیگر متصل شد و یکی از این آن‌ها در مسیر شعله پلاسما و دیگری خارج شعله پلاسما قرار گرفت. سرعت دیسک‌ها، ناشی از انتقال تکانه گاز پلاسما به آن‌ها توسط یک عدد دستگاه دورسنج نوری اندازه‌گیری شد. این کار برای فاصله‌های ۳، ۵، ۷، ۹ و ۱۱ سانتی‌متری از تفنگ پلاسما تکرار شد. نمودار سرعت بر حسب فاصله برای هر یک از پارامترها رسم گردید.

تکنیک پراش پرتو ایکس (XRD) برای شناسایی ساختار فازی پوشش‌ها مورد استفاده قرار گرفت. تیوب بکار رفته پرتو $k\alpha$ مس با طول موج ۱/۵۴۰۶۰ آنگستروم را تأمین می‌کند. تعیین فازهای آلفا آلومینا و گاما آلومینا با کارت رفرنس‌های نرم‌افزار Xpert انجام پذیرفت (کارت رفرنس شماره ۴۶-۱۲۴۲ برای آلفا آلومینا و کارت رفرنس شماره ۱۰-۰۴۲۵ برای گاما آلومینا).

از آزمون ریزسختی ویکرز برای اندازه‌گیری سختی پوشش استفاده شد. این آزمون با دستگاه سختی‌سنج استروئرس^۳ مدل دورامین^۴ ساخت کشور آلمان و با اعمال نیروهای ۰/۹۸۰۷، ۱/۹۶۱ و ۲/۹۴۲ نیوتن به مدت ۱۵ ثانیه صورت پذیرفت. در این دستگاه از یک هرم مربع‌القاعده به عنوان سنبه استفاده می‌شد. اندازه‌گیری‌ها در پنج نوبت تکرار و مقدار میانگین به عنوان ریزسختی

¹ Scharau

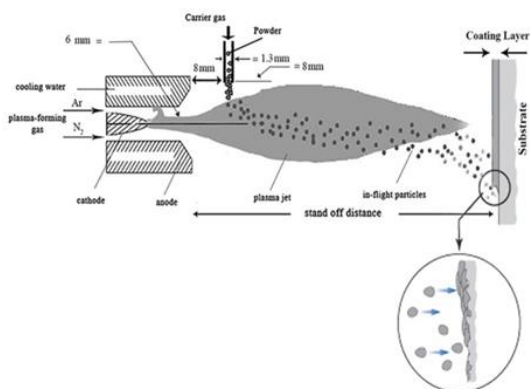
² Sigma-Aldrich

³ Struers

⁴ Duramin 20

چگالی پوشش = (۱- تخلخل) * چگالی پودر اولیه (۱)
 چگالی پودر اولیه = (چگالی تیتانیا) * ۳ + (چگالی آلومینا)
 * (۹۷) ÷ (۱۰۰) (۲)

توصیفی از تفنگ پلاسما، تزریق پودر و زیرلایه در شکل ۲ نشان داده شده است. به منظور اندازه‌گیری دمای سطح ذرات فرض شده گاز پلاسما در حالت ایده‌ال و در فشار اتمسفر قرار دارد [۱۷]. پلاسما در حالت تعادل ترمودینامیکی فرض شد [۱۸]. هندسه مورد استفاده در این مساله یک استوانه سه بعدی تعریف شد. به عنوان نتیجه از پژوهش‌های خلفی^۲ و همکاران [۱۹] از مدل حالت پایا برای حل مساله استفاده شد؛ شرایط لزجت مسئله با روش k-ε که یک روش مناسب برای شبیه‌سازی پاشش پلاسمایی می‌باشد تخمین زده شد.



شکل ۲. شماتیک دستگاه پوشش دهی مورد استفاده در این مطالعه.

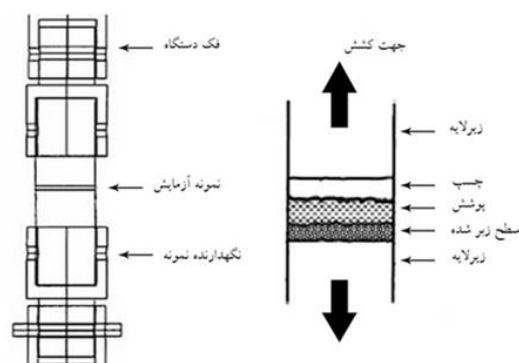
به منظور اندازه‌گیری دمای سطح ذرات فرض شد انتقال حرارت به ذرات از طرق همرفت و تابش صورت می‌پذیرد. همچنین در این حالت فرض شد هیچ‌گونه انتقال فازی برای ذرات نداریم. دمای سطح ذرات با رابطه ۳ محاسبه شد:

$$m_p \cdot C \frac{dT_p}{dt} = h \cdot A_s (T - T_p) + \epsilon_p \cdot A_s \cdot \sigma (\theta_R^4 - T_p^4) \quad (3)$$

² Khelfi

نسبت به زمینه تصویر مشخص و از دستورات نرم‌افزار استفاده شد و نسبت مساحت نواحی متخلخل نسبت به مساحت کل تصویر که معیاری برای تخلخل پوشش است، محاسبه گردید.

ارزیابی استحکام چسبندگی پوشش کامپوزیتی ایجاد شده با استاندارد ASTM C-633-01 انجام شد. طبق این استاندارد از قطعه استوانه‌ای به قطر ۲۵ میلیمتر که یکی دارای پوشش کامپوزیتی و دیگری فاقد آن بوده، استفاده شد. قطعه‌های استوانه‌ای با چسب اپوکسی که دارای استحکام بالایی است به یکدیگر متصل شدند. برای اینکه چسب اپوکسی استحکام لازم را داشته باشد قطعه‌ها به مدت یک ساعت در دمای ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد سپس قطعه‌ها تحت نیروی عمودی با نرخ ۱ میلیمتر بر دقیقه کشیده شدند. نحوه اتصال دو قطعه و دستگاه کشش در شکل ۱ نشان داده شده است.

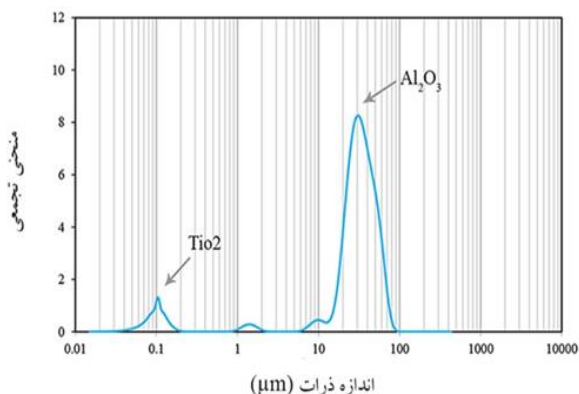


شکل ۱. نحوه اتصال دو قطعه استوانه‌ای در آزمون استحکام پوشش.

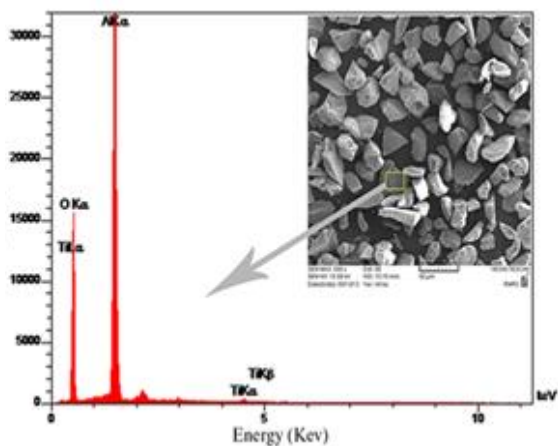
برای اندازه‌گیری اندازه دانه پودر کامپوزیتی از دستگاه دانه‌بندی لیزری مدل Analysette 22 ساخت شرکت Fritsch استفاده شد.

برای اندازه‌گیری تراکم پوشش از روش پیشنهادی مانسین^۱ و همکاران بر مبنای استاندارد ASTM C373-88 استفاده شد [۱۵ و ۱۶]. چگالی هریک از پوشش‌های تهیه شده با رابطه ۱ محاسبه شد:

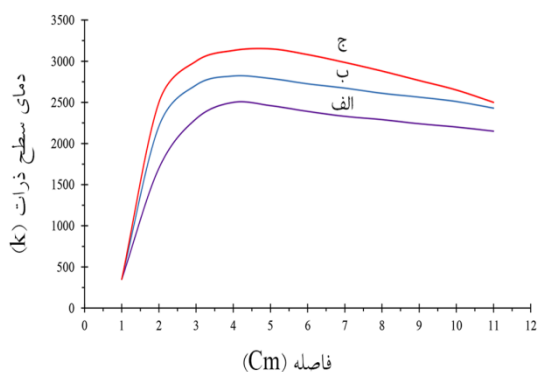
¹ Mancini



شکل ۳. اندازه ذرات پودر کامپوزیتی آلومینا-تیتانیا برای استفاده در دستگاه پاشش پلاسمایی.



شکل ۴. آنالیز طیف سنجی توزیع انرژی پرتو ایکس برای یکی از ذرات آلومینا.



شکل ۵. شبیه‌سازی دمای سطح ذرات در طول مسیر شعله پلاسما: الف) شدت جریان ۶۰۰ آمپر، ب) شدت جریان ۷۰۰ آمپر و ج) شدت جریان ۸۰۰ آمپر.

که در آن T_p و m_p دما و جرم ذرات، C گرمای ویژه، A_s سطح ذرات، h ضریب انتقال همرفت، ϵ_p قابلیت تشعشع ذرات، σ ثابت بولتزمن و θ_R درجه حرارت تابشی ذرات است [۱۸]. شبیه‌سازی با نرم‌افزار فلوئنت انجام پذیرفت.

نتایج و بحث

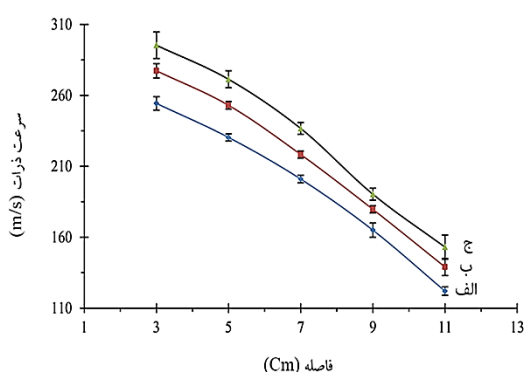
شکل ۳ توزیع ذرات مخلوط پودر آلومینا-تیتانیا تهیه شده با تکنیک دانه‌بندی لیزری قبل از آسیاکاری مکانیکی را نشان می‌دهد. پیک‌های مربوط به حضور ذرات آلومینا و تیتانیا در شکل مشخص شده است. اندازه ذرات آلومینا با استانداردهای پاشش پلاسمایی که برای سرامیک‌ها بین ۶۰-۷۰ میکرون را توصیه می‌کند؛ مطابقت خوبی دارد [۲۰، ۲۱]. از آنجا که امکان دریافت تکانه مناسب برای ذرات نانومتری در پاشش پلاسمایی فراهم نیست، در این پژوهش، ذرات آلومینا و تیتانیا به مدت ۶ ساعت تحت آسیاکاری مکانیکی در شرایط بدون گلوله و با سرعت دورانی ۳۲۰ دور بر دقیقه قرار گرفت. این فرآیند موجب شده تا لایه‌ای از تیتانیا بر سطح ذرات آلومینا قرار گیرد [۲۲]. با این تکنیک امکان دریافت تکانه مناسب برای ذرات نانومتری تیتانیا نیز فراهم شد. شکل ۴ آنالیز عنصری با تکنیک طیف‌سنج توزیع انرژی پرتو ایکس تهیه شده برای یکی از ذرات آلومینا را نشان می‌دهد. حضور ذرات تیتانیا نیز در این شکل مشاهده می‌شود.

شکل ۵ دمای سطح ذرات در شعله پلاسما را نشان می‌دهد.

با توجه تأثیر سرعت و زاویه تزریق پودر بر مسیر ذرات و اهمیت آن بر ذوب و سرعت دادن به ذرات، مطابق با نتایج آنگ^۱ و همکاران [۲۳] سرعت تزریق ذرات به شعله سرعت ۳۰ متر بر ثانیه و زاویه تزریق ۹۰ درجه در نظر گرفته شد.

¹ Ang

نتایج اندازه‌گیری سرعت ذرات موجود در شعله پلاسما، در شکل ۶ آمده است. افزایش شدت جریان ورودی پلاسما با افزایش در انرژی در دسترس برای ذرات موجود در شعله باعث افزایش سرعت ذرات پودر کامپوزیتی شده است. افزایش سرعت برخورد ذرات به سطح زیرلایه با افزایش تنش‌های فشاری می‌تواند باعث بهبود تراکم پوشش و همچنین بهبود چسبندگی پوشش به زیرلایه و اجزای پوشش به یکدیگر شود.



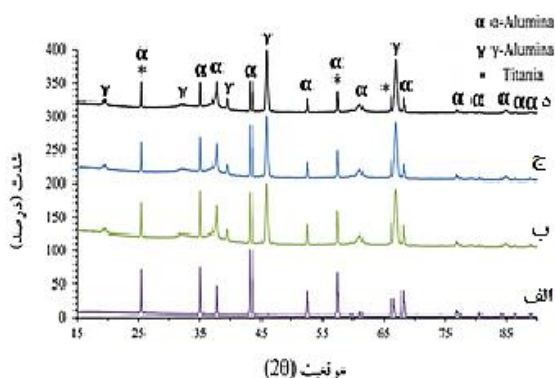
شکل ۶. سرعت ذرات موجود در شعله پلاسما برای شدت جریان‌های الف) ۶۰۰ آمپر، ب) ۷۰۰ آمپر و ج) ۸۰۰ آمپر.

شکل ۷ تغییر در چگالی پوشش مطابق با روش ارایه شده در مرجع [۲۶] و برای شرایط متفاوت از شدت جریان الکتریکی ورودی پلاسما را نشان می‌دهد. مطابق انتظار، با افزایش سرعت ذرات، تراکم پوشش نیز افزایش می‌یابد. کاهش در چگالی پوشش برای شدت جریان ۸۰۰ آمپر را می‌توان مرتبط با تبخیر ذرات از سطح پوشش در این حالت دانست. دمای بالاتر از نقطه جوش ذرات می‌تواند منجر به کاهش راندمان موثر رسوب ذرات روی سطح پوشش و در نتیجه کاهش تراکم پوشش شود [۴]. چگالی پوشش در بهترین حالت به مقدار 3827 ± 40 کیلوگرم بر متر مکعب افزایش داشته که نزدیک به چگالی مخلوط پودر مورد استفاده است.

ذرات در فاصله ۸ میلیمتری به شعله پلاسما تزریق شده‌اند. در فاصله کوتاهی از ورود ذرات به شعله پلاسما دمای سطح آن‌ها به دمای ذوب مخلوط پودر آلومینا-تیتانیا رسیده است. این فاصله با افزایش شدت جریان الکتریکی کوتاه‌تر شده و امکان این که ذرات مسیر طولانی‌تری را در مجاورت ناحیه داغ پلاسما، سپری کنند؛ فراهم شده است. دمای سطح ذرات و مدت زمان حضور ذرات در ناحیه داغ پلاسما می‌تواند موجب ذوب موثرتر ذرات و در نتیجه افزایش کیفیت سطح و بهبود خواص مورد انتظار از پوشش شود. کاهش دمای ذرات در انتهای مسیر مرتبط با خروج ذرات از ناحیه داغ پلاسما و امکان تبادل حرارت با محیط اطراف است. ذرات به تناسب وزنی که دارند، در طول مسیر از شعله پلاسما خارج شده‌اند. افزایش شدت جریان الکتریکی موجب افزایش گونه‌های باردار در محیط پلاسما شده و احتمال خروج ذرات از گاز پلاسما کاهش می‌یابد [۲۴]. همچنین دمای ذرات در لحظه برخورد به سطح از دیگر پارامترهای موثر بر کیفیت نهایی پوشش است. برای شدت جریان‌های ۷۰۰ و ۸۰۰ آمپر دما در لحظه برخورد به سطح بیشتر از دمای ذوب پودر کامپوزیتی بوده است که این موجب پهن‌شدگی مناسب ذرات در لحظه برخورد به سطح و ایجاد پوشش با تراکم مناسب و تخلخل کم می‌شود. افزایش بیش از حد دمای سطح ذرات برای شدت جریان ۸۰۰ آمپر می‌تواند تأثیر منفی بر ذوب ذرات داشته باشد. برای این حالت احتمال اینکه بخشی از ذرات در ناحیه داغ پلاسما و حتی نزدیک به سطح زیرلایه تبخیر شوند وجود دارد. نتایج پرایستی^۱ و همکاران [۲۵] مشخص می‌کند که دمای بالای ذرات رسیده به سطح باعث تغییر شکل زیاد اسپلت‌ها و در نتیجه افزایش تنش‌های کششی برای ذرات پهن شده می‌شود. تنش‌های کششی مناسب برای خواص مکانیکی پوشش نیست.

¹ Prystay

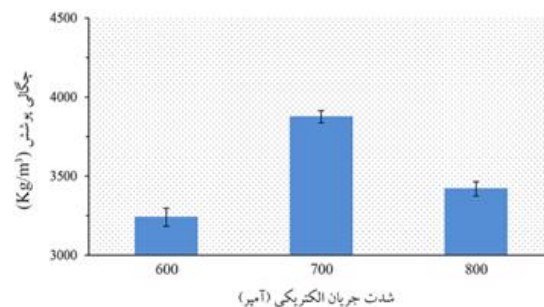
درصد فاز آلفا است. به علت پایداری شیمیایی بالای ذرات آلومینا، تنها تغییر ساختاری برای شدت جریان‌های متفاوت پاشش، تبدیل فاز آلفا آلومینا به گاما آلومینا است. تغییر در دمای شعله پلاسما، میزان فاز آلفا و گامای موجود در ساختار پوشش را تغییر داده است. برای شدت جریان ۸۰۰ آمپر متناسب با افزایش شدت جریان، میزان فاز گامای موجود در ساختار پوشش افزایش یافته است.



شکل ۹. الگوی پراش پرتو ایکس پوشش‌های کامپوزیتی آلومینا-تیتانیا تهیه شده با الف (پودر خام اولیه، ب) شدت جریان ۶۰۰ آمپر، ج) شدت جریان ۷۰۰ آمپر و د) شدت جریان ۸۰۰ آمپر.

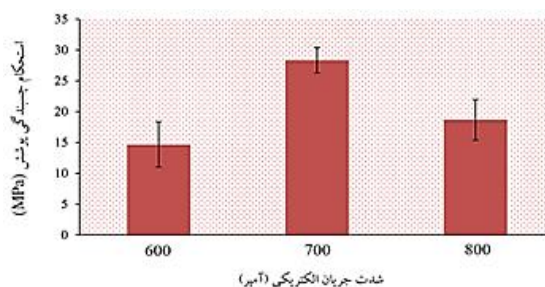
با توجه به شبکه بلوری متفاوت فاز گاما آلومینا و سطح ویژه بالای این فاز، افزایش فاز گاما در ساختار پوشش می‌تواند باعث بهبود چقرمگی پوشش شود. از طرفی با کاهش فاز آلفا و افزایش فاز گاما ریزسختی پوشش کاهش می‌یابد. تشکیل فاز گاما در ساختار پوشش‌های پاشش پلاسمایی مرتبط با سرعت سرد شدن بالای پوشش در برخورد با سطح زیرلایه است [۴]. متناسب با افزایش دمای شعله پلاسما سرعت سرد شدن پودر کامپوزیتی افزایش داشته و این مقدار برای شدت جریان ۸۰۰ آمپر به بیشترین مقدار خود رسیده است.

شکل ۱۰ مورفولوژی پوشش ایجاد شده برای شدت جریان ۶۰۰ آمپر را نشان می‌دهد. دمای پایین پودر کامپوزیتی در طول مسیر پاشش باعث شده تا بیشتر ذرات در این حالت به صورت جامد و یا نیمه جامد به سطح



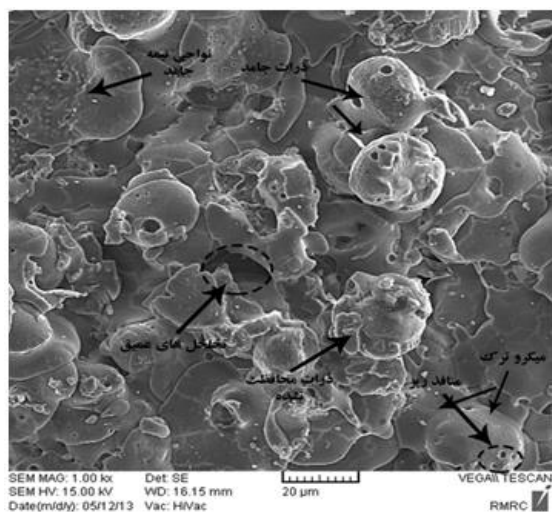
شکل ۷. تراکم پوشش اندازه‌گیری شده برای شدت جریان‌های متفاوت پاشش پلاسمایی.

رابطه تخلخل موجود در پوشش با سرعت ذرات برخورد کننده به سطح پوشش در شکل ۸ آمده است. به منظور اندازه‌گیری تخلخل موجود در پوشش، از روش پیشنهادی مانسین و همکاران بر مبنای استاندارد ASTM C373-88 استفاده شد [۱۵ و ۱۶]. با افزایش سرعت ذرات تخلخل پوشش کاهش داشته است. افزایش تخلخل برای شدت جریان ۸۰۰ آمپر مرتبط با افزایش دمای سطح ذرات بوده است. همچنین دما و سرعت مناسب ذرات برای شدت جریان ۷۰۰ آمپر موجب شده تا ذرات برخورد کننده به سطح شرایط مطلوبی از جهت شکل‌پذیری و پهن‌شدگی روی زیرلایه و یا لایه‌های قبلی پوشش داشته باشند که این موجب کاهش تخلخل و افزایش تراکم پوشش شده است.



شکل ۸. میزان تخلخل موجود در ساختار پوشش‌های کامپوزیتی تولید شده با استفاده از شدت جریان الکتریکی متفاوت

الگوی پراش پرتو ایکس پوشش‌های تهیه شده با شدت جریان‌های مختلف پاشش پلاسمایی در شکل ۹ آمده است. با توجه به شکل، پودر خام اولیه به صورت ۱۰۰



شکل ۱۰. میکروگراف سطح پوشش کامپوزیتی آلومینا-تیتانیا تهیه شده با شدت جریان ۶۰۰ آمپر.

همان طور که بیان شد پوشش‌های کامپوزیتی آلومینا-تیتانیا یکی از ترکیباتی است که به طور گسترده برای افزایش سختی، مقاومت به سایش و فرسایش و مقاومت خوب در برابر شوک حرارتی در صنایع مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد [۷ و ۸]. با توجه به این، خواص و ویژگی‌های ذکر شده برای پوشش‌های تهیه شده با شدت جریان ۶۰۰ آمپر مناسب برای استفاده در محیط‌های تحت بار و مجاورت محلول‌های خورنده نیست. تخلخل‌های موجود در سطح، افزایش حضور ذرات جامد و نیمه جامد و تراکم پایین پوشش برای این حالت استفاده از پوشش را در شرایط ذکر شده با مشکل مواجه می‌کند و در بسیاری از موارد از کارایی پوشش و عمر مفید آن می‌کاهد.

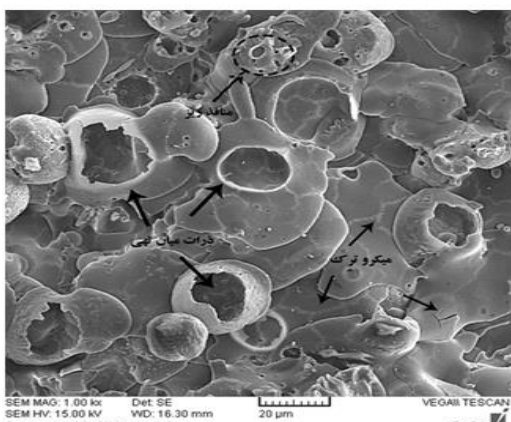
شکل ۱۱ مورفولوژی پوشش برای شدت جریان ۷۰۰ آمپر را نشان می‌دهد. مدل برخورد ذرات در این حالت به صورت پنکیک بوده است. مطابق با این مدل ذرات رسیده به سطح پهن‌شدگی مناسبی دارند که تخلخل سطح پوشش را کاهش و باعث بهبود چسبندگی لایه‌های میانی پوشش می‌شود [۲۸ و ۲۹]. دمای مناسب ذرات و سرعت بالای برخورد آن‌ها به سطح برای این شدت جریان باعث شده تا اکثر ذرات برخورد کننده به سطح زیرلایه یا

برخورد کنند. چسبندگی ضعیف این ذرات موجب شده تا در فصل مشترک این ذرات، حضور تخلخل و میکرو ترک مشاهده شود. از آن‌جا که بیشتر ذرات رسیده به سطح، شکل سه بعدی خود را حفظ کرده‌اند تخلخل‌های عمیقی در فصل مشترک ذرات مشاهده می‌شود. حضور تخلخل‌های عمیق در ساختار پوشش علاوه بر آن‌که توانایی پوشش در ممانعت از رسیدن محلول‌های خورنده به سطح زیرلایه را کاهش می‌دهد؛ تنش‌های فشاری زیادی را به قطعه تحت بارگذاری وارد می‌کند که می‌تواند باعث شکست پوشش و کاهش عمر مفید آن حین بارگذاری شود. همچنین چسبندگی ضعیف این ذرات به یکدیگر باعث کاهش چسبندگی لایه‌های میانی پوشش و همچنین چسبندگی پوشش به زیرلایه می‌شود. سرعت پایین برخورد ذرات به سطح پوشش باعث کاهش حضور قطرات^۱ در سطح پوشش شده است. حضور قطرات برای چسبندگی پوشش مناسب نیست. همچنین حفره‌های ریز که در فصل مشترک اسپلت‌ها مشاهده می‌شود بیشتر به علت به دام افتادن گاز پلاسما است [۲۷]. این حفره‌ها ریز باعث چسبندگی ضعیف اسپلت‌ها به یکدیگر در فصل مشترک می‌شود. ذرات ذوب نشده و تخلخل‌های سطحی برای این حالت با کاهش یکنواختی پوشش باعث کاهش خواص الاستیسیته پوشش می‌شوند. همچنین کاهش سرعت ذرات موجود در شعله پلاسما و چسبندگی ضعیف آن‌ها به یکدیگر باعث کاهش تراکم پوشش برای این حالت شده است. مقایسه نتایج حاصل از ارزیابی مورفولوژی سطح پوشش با نتایج حاصل از شبیه‌سازی دمای سطح ذرات مشخص می‌کند که نتایج شبیه‌سازی برای این حالت از اعتبار مناسبی برخوردار است. با توجه به نتایج شبیه‌سازی، دمای سطح ذرات، کاهش مسیر ذرات در مجاورت ناحیه داغ پلاسما و دمای گاز پلاسما از دلایل اصلی افزایش ذرات جامد و نیمه جامد در ساختار پوشش بوده است.

¹ Drops

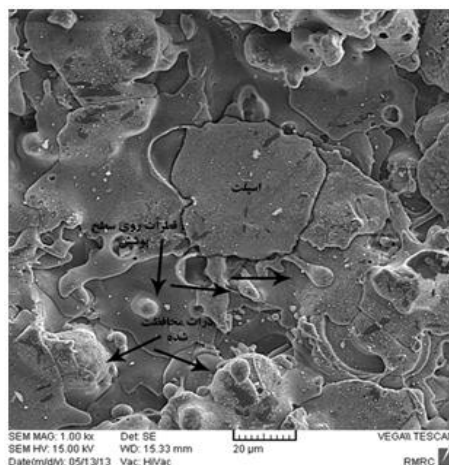
پوشش و بهبود عملکرد سایشی و فرسایشی پوشش همچنین افزایش عمر مفید پوشش در محیط‌های تحت بار و در مجاورت محلول‌های خورنده می‌شود. پوشش تولید شده در این حالت کیفیت و ویژگی‌های مناسبی از جهت استفاده به عنوان لایه محافظ در صنایع مختلف را دارا است همچنین با توجه به مورفولوژی مناسب پوشش می‌توان پیش‌بینی کرد که رفتار پوشش در برابر شک حرارتی نیز مطلوب است.

میکروگراف سطح پوشش برای شدت جریان ۸۰۰ آمپر در شکل ۱۲ نشان داده شده است. در این شدت جریان، به علت دمای بالای شعله پلاسما، بیشتر ذرات موجود در سطح تبخیر شده‌اند. بقایای این ذرات در سطح مشخص شده‌اند. تخلخل در این حالت نسبت به شدت جریان ۶۰۰ آمپر کمتر ولی از شدت جریان ۷۰۰ آمپر بیشتر است. سرعت بالای برخورد ذرات به سطح، تغییر شکل مکانیکی زیادی را برای آن‌ها در برداشته تا آن‌جا که میکروتکرک‌های ریزی در سطح پوشش مشاهده می‌شود. ریز حفره‌های ناشی از به دام افتادن گاز پلاسما در این شدت جریان نسبت به جریان‌های ۶۰۰ و ۷۰۰ آمپر بیشتر مشاهده می‌شود که علت آن را می‌توان با سرعت بالای ذرات در محیط پلاسما و تغییر شکل مکانیکی ذرات مرتبط دانست.



شکل ۱۲. میکروگراف سطح پوشش کامپوزیتی آلومینا-تیتانیا تهیه شده با شدت جریان ۸۰۰ آمپر.

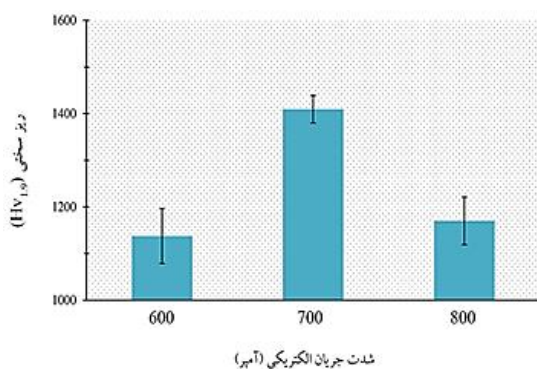
لایه‌های قبلی پوشش به صورت کاملاً ذوب شده باشند. همچنین سرعت بالا و مناسب ذرات در شعله پلاسما برای این حالت، تراکم پوشش را افزایش داده است. حضور قطرات، ناشی از سرعت بالای برخورد ذرات به سطح در این شدت جریان نسبت به جریان ۶۰۰ آمپر افزایش داشته است. برای این شدت جریان درصد کمی از ذرات نیمه جامد نیز در ساختار پوشش مشاهده می‌شود؛ ذرات نیمه جامد مشاهده شده در سطح برای این حالت کاملاً توسط ذرات ذوب شده محافظت شده‌اند. حضور حداکثر ۱۰٪ از این ذرات در پوشش‌های پاشش پلاسمایی شده برای جلوگیری از رشد ترک‌ها مناسب است [۳۰].



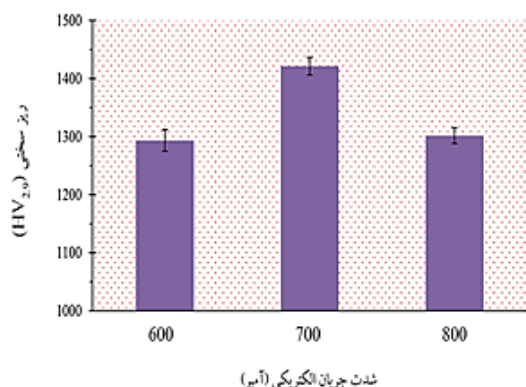
شکل ۱۱. میکروگراف سطح پوشش کامپوزیتی آلومینا-تیتانیا تهیه شده با شدت جریان ۷۰۰ آمپر.

ارزیابی همزمان نتایج حاصل از شبیه‌سازی دمای سطح ذرات و مورفولوژی سطح پوشش مشخص می‌کند که شرایط مناسب ذوب ذرات موجب شده تا بیشتر ذرات رسیده سطح پوشش به صورت کاملاً ذوب شده باشند. دمای مناسب ذرات در لحظه برخورد به سطح پوشش، حضور ذرات خمیری و سرعت مناسب ذرات در لحظه برخورد باعث پهن‌شدگی مناسب ذرات در سطح پوشش شده است. پهن‌شدگی مناسب ذرات با افزایش فصل مشترک اسپلت‌ها باعث افزایش چسبندگی لایه‌های

است؛ توزیع تخلخل در سطح پوشش یکنواخت است که به اندازه‌گیری‌های انجام شده برای این شدت جریان اعتبار می‌بخشد.



شکل ۱۳. تغییرات ریزسختی پوشش‌های کامپوزیتی تولید شده برای شدت جریان‌های مختلف پاشش پلاسمایی.



شکل ۱۴. تغییرات ریزسختی پوشش‌های کامپوزیتی تولید شده برای شدت جریان‌های مختلف پاشش و با تخلخل محلی ۰.۶٪.

اندازه‌گیری ریزسختی با تکنیک ذکر شده برای نیروی اعمالی ۱/۹۶۱ نیوتن هرچند یک روش کاملاً متعارف است اما برای ارزیابی اثر دیگر پارامترهای موثر بر ریزسختی، همچنین افزایش دقت این روش، اندازه‌گیری ریزسختی در حضور تخلخل ثابت و محلی انجام پذیرفت. برای این منظور نقاطی در سطح پوشش که از نظر تخلخل محلی نزدیک به یکدیگر بودند انتخاب شد. در ادامه اندازه‌گیری ریزسختی پوشش کامپوزیتی برای این نقاط با نیروی اعمالی ۲/۹۴۲ نیوتن انجام پذیرفت. شکل ۱۴ مقدار ریزسختی برای این شرایط را نشان می‌دهد. با

انتظار می‌رفت در این دما، قطرات زیادی در پوشش ملاحظه شود. کاهش قطرات در پوشش را می‌توان با دمای بالای پلاسما در نزدیکی سطح مرتبط دانست که باعث تبخیر این ذرات ریز می‌شود. همچنین تبخیر ذرات از سطح پوشش باعث کاهش تراکم پوشش نسبت به شدت جریان ۷۰۰ آمپر شده است.

به طور کلی خواص مکانیکی پوشش‌های پاشش پلاسمایی توسط معیارهای استحکام چسبندگی و ریزسختی پوشش مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. تأثیر شدت جریان الکتریکی پاشش پلاسمایی بر رفتار ریزسختی پوشش در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ مشاهده می‌شود. ریزسختی پوشش با آزمون سختی ویکرز برای نیروهای اعمالی ۰/۹۸۰۷، ۱/۹۶۱ و ۲/۹۴۲ نیوتن محاسبه شد. برای نیروی اعمالی ۰/۹۸۰۷ نیوتن مشاهده شد که این مقدار نیرو اثر قابل ملاحظه‌ای روی پوشش کامپوزیتی آلومینا-تیتانیا در تمام شرایط مختلف جریان نداشته است. علت این امر می‌تواند سختی بالای پوشش کامپوزیتی تولید شده؛ باشد. آستانه تأثیر نیروی بر پوشش کامپوزیتی ۱/۹۶۱ نیوتن اندازه‌گیری شد. رفتار ریزسختی پوشش با اعمال این نیرو بر پوشش‌های کامپوزیتی تولید شده در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود. تخلخل بالا و تراکم کمتر برای پوشش‌های تولید شده با شدت جریان‌های ۶۰۰ و ۸۰۰ آمپر موجب شده تا ریزسختی پوشش برای این شدت جریان‌ها نسبت به جریان ۷۰۰ آمپر کاهش داشته باشد. علاوه بر تخلخل و تراکم پوشش، کیفیت پوشش از نظر حضور میکروتراک‌ها و نقایص ساختاری از جمله حضور ذرات جامد و یا بقایای ذرات میان‌تهی (به علت دمای نامناسب شعله پلاسما) نیز می‌تواند بر کاهش ریزسختی این پوشش‌ها تأثیرگذار باشد.

انحراف از معیار مشخص شده برای ریزسختی جریان‌های مختلف پاشش در شکل ۱۳ را می‌توان معیاری از توزیع تخلخل در سطح پوشش دانست. برای شدت جریان ۷۰۰ آمپر همان طور که در شکل ۱۳ نیز به خوبی مشخص

یکی دیگر از معیارهای ارزیابی خواص مکانیکی پوشش‌های پاشش پلاسمایی، آزمون استحکام چسبندگی پوشش است. کنده شدن یا خرد شدن پوشش از سطح زیرلایه یکی از اساسی‌ترین عیوبی و مشکلات پوشش‌ها به شمار می‌رود. تحقیقات و مطالعات زیادی در زمینه بررسی چسبندگی پوشش‌های پاشش پلاسمایی انجام شده است. تعدادی از محققین نقش ناهمواری سطح قطعه پایه بر میزان استحکام چسبندگی را بررسی کرده‌اند [۳۳، ۳۴]. نتایج آن‌ها مشخص می‌دهد که افزایش ناهمواری سطح موجب افزایش چسبندگی پوشش شود. هرچند این نتیجه نمی‌تواند کلی باشد؛ در این پژوهش با تنظیم پارامترهای سند بلاست زبری معادل $3/51$ میکرون که در بسیاری از مطالعات زبری مناسبی گزارش شده انتخاب شد [۳، ۱۰ و ۳۲]. شکل ۱۵ استحکام چسبندگی پوشش برای شدت جریان‌های متفاوت پاشش را نشان می‌دهد. ذوب یکپارچه ذرات، تخلخل پایین و سرعت مناسب برخورد ذرات به سطح پوشش از دلایل عمده افزایش چسبندگی پوشش برای شدت جریان 700 آمپر است. (حدود 2 ± 28 MPa) با توجه به اینکه برای پوشش‌های پاشش پلاسمایی ارتباط پوشش به زیرلایه تنها از طریق قفل‌شدگی مکانیکی امکان‌پذیر است حضور ذرات جامد و نیمه جامد و تخلخل‌های پوشش با کاهش فصل مشترک بین ذرات تأثیر زیادی بر چسبندگی پوشش دارند. برای شدت جریان 600 آمپر با افزایش تخلخل پوشش و همچنین افزایش احتمال حضور ذرات جامد و نیمه جامد در ساختار پوشش، چسبندگی پوشش کاهش زیادی را نشان می‌دهد.

ارتباط استحکام چسبندگی پوشش با سرعت ذرات و تخلخل موجود در ساختار پوشش در شکل ۱۶ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است با کاهش تخلخل استحکام چسبندگی پوشش افزایش داشته است.

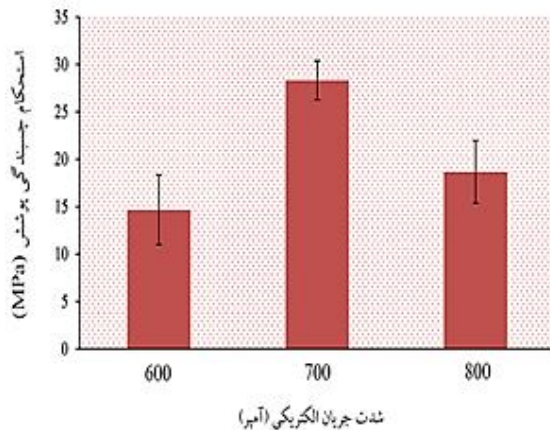
توجه به یکسان بودن تخلخل در محل اندازه‌گیری انتظار می‌رفت ریزسختی یکسانی برای تمام حالت‌ها گزارش شود. ریزسختی پوشش‌های تولید شده برای شدت جریان‌های 600 و 800 آمپر برای این حالت افزایش داشته (به ترتیب $HV_{2.9}$ 1290 و 1301) و ریزسختی پوشش 700 آمپری تقریباً ثابت بوده است (حدود $HV_{2.9}$ 1420). افزایش در ریزسختی برای این حالت را می‌توان با کاهش تخلخل محلی مرتبط دانست. همچنین تفاوت ریزسختی محلی، برای شدت جریان‌های 600 و 800 آمپری با شدت جریان 700 آمپر را می‌توان نتیجه تأثیر عوامل دیگر از جمله تنش پسماند موجود در ساختار پوشش‌ها دانست که باعث کاهش ریزسختی پوشش برای جریان‌های 600 و 800 آمپر در مقایسه با شدت جریان 700 آمپری شده است. افزایش در مقدار ریزسختی برای شدت جریان 600 آمپر بیشتر از شدت جریان 800 آمپر بوده که مشخص می‌کند، تنش پسماند همچنین تنش‌های کوئینچ و تنش‌های کششی موجود در ساختار پوشش 800 آمپر بیشتر از شدت جریان 600 آمپری است. تنش پسماند و تنش‌های کوئینچ موجود در ساختار پوشش مرتبط با سرعت سرد شدن بالای ذرات رسیده به سطح است [۳۱ و ۳۲]. مطابق با الگوی پراش پرتو ایکس پوشش‌های کامپوزیتی در شکل ۹، میزان فاز گاما آلومینا که مرتبط با سرعت سرد شدن بالای پوشش است برای شدت جریان 800 آمپری بیشتر از شدت جریان 600 آمپری بوده است. همچنین دمای سطح ذرات برای شدت جریان 800 آمپر در لحظه برخورد به سطح بیشتر از شدت جریان 600 آمپر بوده که باعث افزایش سرعت تبادل حرارت بین پوشش و اتمسفر اطراف و افزایش سرعت سرد شدن پوشش می‌شود. افزایش تنش‌های کششی موجود در سطح پوشش 800 آمپر مرتبط با سرعت فوق بالای برخورد ذرات به سطح پوشش و تغییر شکل مکانیکی آن‌ها است. این تنش‌ها می‌تواند باعث کاهش ریزسختی پوشش همراه شود.

تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد باوجود افزایش تنش‌های فشاری، در سرعت‌های بالا، ذرات چسبندگی موفق‌تری به زیرلایه و لایه‌های قبلی پوشش نخواهند داشت [۳۵-۳۷]. بدین لحاظ برای بهبود خواص مکانیکی پوشش باید سرعت، بهینه در نظر گرفته شود.

در پژوهش حاضر و به منظور بهبود خواص مورد انتظار از پوشش کامپوزیتی تولید شده، ترکیبی از پودر آلومینا با ابعاد میکرومتریک و ذرات تیتانیا با ابعاد نانومتریک استفاده شد. مطابق با مطالعات ویسنت^۱ و همکاران [۸]، استفاده از پودر کامپوزیتی آلومینا-تیتانیا با ابعاد میکرومتریک و نانومتریک در مقایسه با پودرهای کامپوزیتی نانومتریک و یا میکرومتریک، خواص مطلوب‌تری تولید می‌کند. علاوه بر این، فرآیند آماده‌سازی پودر نیز به گونه‌ای بوده که ذرات تیتانیا در طول آسیاکاری مکانیکی به بر روی سطح ذرات آلومینا قرار گیرد، با توجه به اینکه ذرات به تناسب جرمی که دارند از شعله پلاسما تکانه دریافت می‌کنند [۴] نانو ذرات تیتانیا در مجاورت میکرو ذرات آلومینا سرعت گرفته و تکانه مناسبی را از شعله پلاسما دریافت نموده‌اند. افزایش سرعت برخورد ذرات مطابق با پژوهش‌های مارتین^۲ و همکاران [۱۴] تأثیر زیادی بر خواص مورد انتظار از پوشش دارد. مقایسه نتایج حاصل از پژوهش حاضر با نتایج مراجع [۲۲، ۲۶ و ۳۸] تأثیر استفاده از ترکیب پودر مناسب همچنین فرآیند آماده‌سازی پودر قبل از فرآیند پوشش‌دهی را مشخص می‌کند. نتایج در جدول ۲ آمده است. برای این حالت خواص و ویژگی‌های پودر کامپوزیتی بهبود داشته است. همچنین استفاده از پودر نانو تیتانیا باعث توزیع مناسب این ذرات در سطح پوشش و ایجاد خواص همگن شده است. توزیع تیتانیا در شکل ۱۷ آمده است.

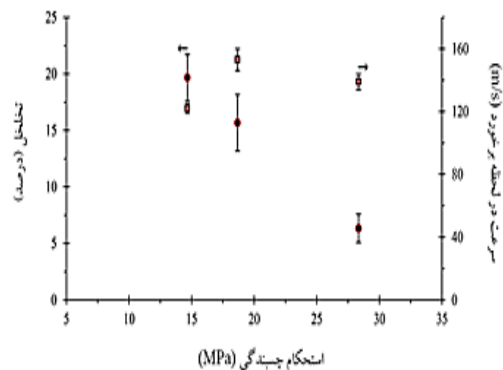
¹ vicent

² Martin



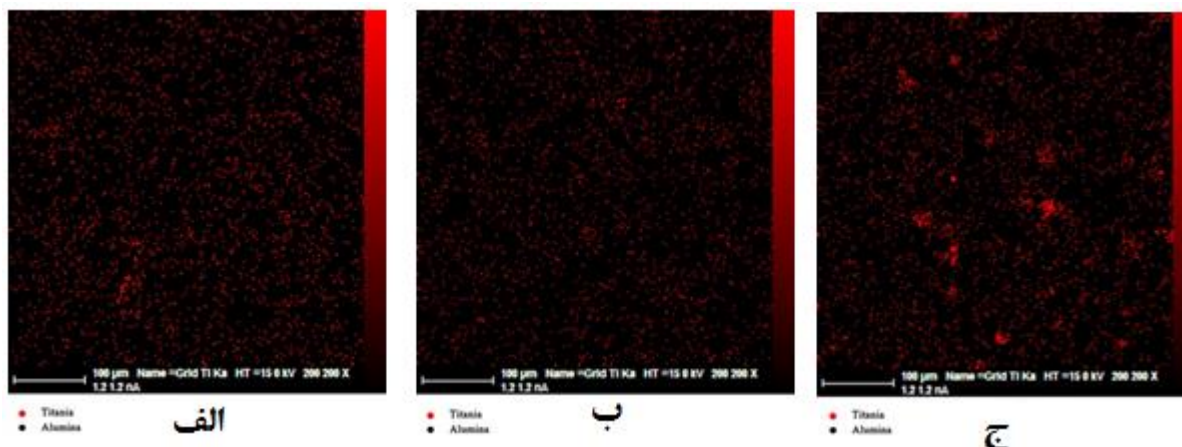
شکل ۱۵. استحکام چسبندگی پوشش‌های کامپوزیتی تولید شده برای شدت جریان‌های مختلف.

یکی از عواملی که در شکست پوشش‌های پاشش پلاسمایی نقش عمده‌ای ایفا می‌کند جوانه‌زنی ترک و اشاعه آن در اثر نیروی کششی هم محوری است که حین آزمون به نمونه اعمال می‌شود. با افزایش درصد تخلخل امکان اشاعه ترک و در نتیجه شکست پوشش افزایش می‌یابد...



شکل ۱۶. نمودار ارتباط استحکام چسبندگی پوشش با تخلخل‌های موجود در ساختار پوشش و سرعت برخورد ذرات به سطح برای شدت جریان‌های مختلف.

ارزیابی ارتباط تأثیر سرعت ذرات بر خواص چسبندگی پوشش مشخص می‌کند افزایش سرعت ذرات در ابتدا باعث افزایش چسبندگی پوشش و با ادامه روند افزایش سرعت ذرات، چسبندگی پوشش کاهش می‌یابد. نتایج



شکل ۱۷. توزیع تیتانیا در ساختار پوشش‌های کامپوزیتی آلومینا-تیتانیا تهیه شده با شرایط متفاوت، الف) شدت جریان ۶۰۰ آمپر، ب) شدت جریان ۷۰۰ آمپر و ج) شدت جریان ۸۰۰ آمپر.

پوشش شده و کاهش تخلخل شده است. در این حالت تراکم پوشش به ۳۸۲۷ کیلوگرم بر متر مکعب و تخلخل به حدود ۷ درصد کاهش داشته است. علاوه بر انتخاب مناسب شدت جریان الکتریکی، استفاده از ترکیب پودر مناسب موجب افزایش خواص مکانیکی پوشش شده است. برای پوشش کامپوزیتی تولید شده، استحکام چسبندگی پوشش به ۲۸ مگاپاسکال و ریزسختی به $1,9 HV_{10}$ ۱۴۰۹ افزایش داشته است. همچنین پوشش تولید شده قابل رقابت با پوشش‌های مشابه و در بیشتر موارد بهتر از آنها است.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله مراتب امتنان خویش را از مسئولین محترم شرکت پودر افشان که فرصت انجام آزمایش‌ها لازم را فراهم نمودند ابراز می‌دارند.

جدول ۲ مقایسه نتایج پژوهش حاضر با مطالعات پیشین.

مرجع	تخلخل (درصد)	ریزسختی (HV)	استحکام چسبندگی (MPa)
پژوهش حاضر	$6/5 \pm 1/5$	1409 ± 30	28 ± 2
مرجع [۲۲]	۱۶	۹۱۰	-
مرجع [۲۶]	۹	۱۰۰۰	-
مرجع [۳۸]	۷	۱۱۰۰	۲۰

نتیجه‌گیری

بررسی‌های انجام شده در این تحقیق باهدف ایجاد پوشش کامپوزیتی آلومینا-تیتانیا توسط فرآیند پاشش پلاسمایی و ارزیابی و مشخصه‌یابی پوشش و تأثیر شدت جریان الکتریکی پاشش بر روی خواص مکانیکی، مورفولوژی، سرعت و دمای ذرات رسیده به سطح پوشش، نتایج زیر را حاصل نمود:

شدت جریان الکتریکی از پارامترهای موثر بر خواص پوشش است. در این پژوهش و با انتخاب درست و مناسب شدت جریان ۷۰۰ آمپر، دما و سرعت ذرات رسیده به سطح بهینه شده است. شرایط مناسب برخورد ذرات موجب شکل‌پذیری بهتر ذرات، افزایش تراکم

9. V. Fervel, B. Normand, H. Liao, C. Coddet, E. Bêche, and R. Berjoan, *Friction and wear mechanisms of thermally sprayed ceramic and cermet coatings*, Surface and Coatings Technology, 111(1999)255-262.
10. M. H. Enayati, M. H. Fathi, and A. Zomorodian, *Characterisation and corrosion properties of novel hydroxyapatite niobium plasma sprayed coating*, Surface Engineering, 25(2009)338-342.
11. S. M. Hashemi, M. H. Enayati and M. H. Fathi, *Plasma Spray Coatings of Ni-Al-SiC Composite*. Journal of Thermal Spray Technology, 18(2009)284-291.
12. A. R. M. Sahab, N. H. Saad, S. Kasolang, and J. Saedon, *Impact of Plasma Spray Variables Parameters on Mechanical and Wear Behaviour of Plasma Sprayed Al₂O₃ 3% wt TiO₂ Coating in Abrasion and Erosion Application*, Procedia Engineering, 41(2012)1689-1695.
13. E. P. Song, A. Jeehoon, L. Sunghak and J. K. Nack, *Effects of critical plasma spray parameter and spray distance on wear resistance of Al₂O₃-8 wt.%TiO₂ coatings plasma-sprayed with nanopowders*, Surface and Coatings Technology, 202(2008)3625-3632.
14. M. Friis, C. Persson, and J. Wigren, *Influence of particle in-flight characteristics on the microstructure of atmospheric plasma sprayed yttria stabilized ZrO₂*, Surface and Coatings Technology, 141(2001)115-127.
15. Standard Test Method for Water Absorption, Bulk Density, Apparent Porosity, and Apparent Specific Gravity of Fired Whiteware Products, ASTM C373-88.
16. C. E. Mancini, C. C. Berndt, L. A. Sun and Kucuk, *Porosity determinations in thermally sprayed hydroxyapatite coatings*. Journal of Material and Science, 36(2001)3891-3896.
- مراجع
1. A. Rico, M. A. Garrido, E. Otero, and J. Rodríguez, *An energetic approach to the wear behaviour of plasma-sprayed alumina-13% titania coatings*, Acta Materialia, 58(2010)5858-5870.
2. 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 & Design, 32(2011)584-591.
۳. حنیفی آرش، فتحی محمد حسین، تولید نانوذرات و پوشش‌های نانو ساختار هیدروکسی آپاتیت به روش سل-ژل، مجله علوم و مهندسی سطح، سال دوم، شماره ۲، ص ۵۵-۶۵، سال ۱۳۸۵
4. J. C. Fang, W. J. Xu, Z. Y. Zhao, and H. P. Zeng, *In-flight behaviors of ZrO₂ particle in plasma spraying*, Surface and Coatings Technology, 201(2007)5671-5675.
5. K. Vijayakumar, A. K. Sharma, M. M. Mayuram and R. Krishnamurthy, *Response of plasma-sprayed alumina-titania ceramic composite to high-frequency impact loading*, Materials Letters, 54(2002)403-413.
۶. فتحی محمد حسین، صالحی مهدی، پارسا پور علی، بهبود سازگاری زیستی ایمپلنت بدن با اصلاح سازی سطح و پوشش بیوسرامیکی، مجله علوم و مهندسی سطح، سال اول، شماره ۱، ص ۷-۲۰، سال ۱۳۸۴.
7. A. Rico, P. Poza, and J. Rodríguez, *High temperature tribological behavior of nanostructured and conventional plasma sprayed alumina-titania coatings*, Vacuum, 88 (2013)149-154.
8. M. Vicent, E. Bannier, R. Benavente, M. D. Salvador, T. Molina and R. Moreno, *Influence of the feedstock characteristics on the microstructure and properties of Al₂O₃-TiO₂ plasma-sprayed coatings*, Surface and Coatings Technology, 220(2013)74-79.

- International Journal of Thermal Sciences, 39(2000)852-870.
25. M. Prystay, P. Gougeon, and C. Moreau, *Structure of plasma-sprayed zirconia coatings tailored by controlling the temperature and velocity of the sprayed particles*, Journal of Thermal Spray Technology, 10(2001)67-75.
 26. S. Yugeswaran, V. Selvarajan, M. Vijay, P. V. Ananthapadmanabhan and K. P. Sreekumar, *Influence of critical plasma spraying parameter (CPSP) on plasma sprayed Alumina-Titania composite coatings*, Ceramics International, 36(2010)141-149.
 27. V. P. Singh, A. Sil and R. Jayaganthan, *Tribological behavior of plasma sprayed Cr₂O₃-3%TiO₂ coatings*, Wear, 272(2011)149-158.
 28. L. Pawlowski, *The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings*, Second Edition ed, John Wiley & Sons, 2008.
 ۲۹. غیرتی محمد، فتحی محمد حسین، احمدی علیرضا، بررسی اثر جریان ورودی پلاسما بر مورفولوژی پوشش کامپوزیتی آلومینا-تیتانیا تولیدی به روش پاشش پلاسمایی اتمسفری، چهاردهمین سمینار ملی مهندسی سطح، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، سال ۱۳۹۲.
 30. R. Venkataraman and R. Krishnamurthy, *Evaluation of fracture toughness of as plasma sprayed alumina-13 wt.% titania coatings by micro-indentation techniques*, Journal of the European Ceramic Society, 26(2006)3075-3081.
 ۳۱. کوپایی نرجس، تمیزی فر مرتضی و صالحی مهدی، تأثیر شدت جریان الکتریکی پاشش پلاسمایی بر مشخصات پوشش کامپوزیتی تیتانیم-هیدروکسی آپاتیت، مجله علوم و مهندسی سطح، شماره ۱۰، ص ۶۱-۶۷، فروردین ۱۳۸۹.
 ۳۲. زمردیان امیر، فتحی محمد حسین، عنایتی محمد حسین، محمدی زهرانی احسان، تأثیر شدت جریان الکتریکی
 17. H. B. Xiong, L. L. Zheng, S. Sampath, R. L. Williamson, and J. R. Fincke, *Three-dimensional simulation of plasma spray: effects of carrier gas flow and particle injection on plasma jet and entrained particle behavior*, International Journal of Heat and Mass Transfer, 47(2004)5189-5200.
 18. H. P. Li and X. Chen, *Three-Dimensional Modeling of the Turbulent Plasma Jet Impinging upon a Flat Plate and with Transverse Particle and Carrier-Gas Injection*, Plasma Chemistry and Plasma Processing, 22(2002)27-58.
 19. D. Khelfi, A. Abdellah El-Hadj and N. Aït-Messaoudène, *Modeling of a 3D plasma thermal spraying and the effect of the particle injection angle*, Revue des Energies Renouvelables CISM'08 Oum El Bouaghi, (2008)205-216.
 20. J. Mostaghimi, and S. Chandra, *Heat Transfer in Plasma Spray Coating Processes*, Advances in Heat Transfer, 40(2007)143-204.
 21. P. Fauchais, V. Rat, C. Delbos, J. F. Coudert, T. Chartier and L. Bianchi, *Understanding of suspension DC plasma spraying of finely structured coatings for SOFC*, Plasma Science IEEE Transactions on, 33(2005)920-930.
 22. N. Dejang, A. Watcharapasorn, S. Wirojupatump, P. Niranatlumpong, and S. Jiansirisomboon, *Fabrication and properties of plasma-sprayed Al₂O₃/TiO₂ composite coatings: A role of nano-sized TiO₂ addition*, Surface and Coatings Technology, 204(2010)1651-1657.
 23. C. B. Ang, A. Devasenapathi, H. W. Ng, S. C. M. Yu, and Y. C. Lam, *A Proposed Process Control Chart for DC Plasma Spraying Process. Part II. Experimental Verification for Spraying Alumina*, Plasma Chemistry and Plasma Processing, 21(2001)401-420.
 24. P. Fauchais and A. Vardelle, *Heat, mass and momentum transfer in coating formation by plasma spraying*,

پاشش پلاسمایی بر خواص پوشش کامپوزیتی
هیدروکسی آپاتیت- نیویوم و رفتار خوردگی زیرلایه
فولاد زنگ نزن 316L، مجله علوم و مهندسی سطح،
شماره ۹، ص ۷۷-۸۹، فروردین ۱۳۸۹.

33. Y. Y. Wang, C. J. Li, and A. Ohmori, *Influence of substrate roughness on the bonding mechanisms of high velocity oxy-fuel sprayed coatings*, Thin Solid Films, 485(2005)141-147.
34. S. Amada and T. Hirose, *Influence of grit blasting pre-treatment on the adhesion strength of plasma sprayed coatings: fractal analysis of roughness*, Surface and Coatings Technology, 102(1998)132-137.
35. P. Bansal, P. H. Shipway, and S. B. Leen, *Residual stresses in high-velocity oxy-fuel thermally sprayed coatings – Modelling the effect of particle velocity and temperature during the spraying process*, Acta Materialia, 55(2007)5089-5101.
36. C. Lyphout, P. Nylén, A. Manescu, and T. Pirling, *Residual Stresses Distribution through Thick HVOF Sprayed Inconel 718 Coatings*, Journal of Thermal Spray Technology, 17(2008)915-923.
37. M. Jalali Azizpour and S. Norouzi, *An axisymmetrical finite element model for prediction of the bonding behavior in HVOF thermal spraying coatings*, Journal of Applied science, 12(2012)492-498.
38. E. H. Jordan, M. Gell, Y. H. Sohn, D. Goberman, L. Shaw, S. Jiang, M. Wang, T.D. Xiao, Y. Wang and P. Strutt, *Fabrication and evaluation of plasma sprayed nanostructured alumina-titania coatings with superior properties*, Materials Science and Engineering: A, 301(2001)80-89.