مطالعهی رفتار سایشی پوششهای کامپوزیتی آلومینا- تیتانیا تولید شده بهروش پاشش پلاسمایی*

محمد غيرتي (() محمد حسين فتحي () عليرضا احمدي (")

چکیدہ

سایش و فرسایش، عامل انهدام بسیاری از قطعات صنعتی است. پوشش های سرامیکی تهیه شده به روش پاشش پلاسمایی، اغلب باعث بهبود عمل کرد سایشی و فرسایشی قطعات صنعتی می شود. در این پژوهش، تلاش شد تا با طرّاحی و ایجاد پوشش مادهی مرکب آلومینا- تینانیا به روش پاشش پلاسمایی در شرایط متفاوتی از توان ورودی پلاسما، مُرفولوژی، ریز سختی و چقرمگی پوشش مادهی مرکب آلومینا مطالعه شود. مشخصه یابی و ارزیابی پوشش به کمک پراش پرتوی ایکس و میکروسکپ الکترونی روبشی انجام شد. خواص کشسانی پوشش با ارزیابی میزان تخلخل و میزان فاز آلومینای گاما در ساختار پوشش بررسی شد. افزون بر این، آزمون سختی سنجی ویکرز برای اندازه گیری ریز سختی پوشش انجام شد. نتایج نشان دادند که خواص کش سانی بیش ترین تأثیر را بر عمل کرد فرسایشی پوشش دارند. برای توان ورودی ۲۸ کیلووات، افزایش ریز سختی و بهبود خواص کش سانی پوشش به صورت همزمان ملاحظه شد. **واژههای کلیدی** عمل کرد فرسایشی؛ پاشش پلاسمایی؛ آلومینا- تیتانیا؛ ریز ساختار؛ دوران ملاحظه شد.

The Study of Wear Behaviour of Alumina-Titania Composite Coating Produced by Plasma Spraying Technique

M. Gheirati M. H. Fathi

A. R. Ahmadi

Abstract

Wear and erosion are the main reasons for destruction of many industrial components. In many cases, ceramic coatings produced by plasma spraying technique improve wear and erosion performance of industrial components. In this study, it was attempted to design and prepare an optimized composite coating of Alumina-Titania via plasma spraying technique using various parameters of plasma input power, and to study the influence of morphology, microhardness and elastic properties of prepared coatings on their erosion behaviour. Characterization of prepared coatings was performed using X-ray diffraction (XRD) technique and scanning electron microscope (SEM). The elastic properties of coatings and the porosity and gamma alumina phase in their structure were also investigated. Vickers hardness test was performed in order to measure the microhardness of coatings. The results showed that the elastic properties have the greatest influence on the erosion performance of coatings. It was also shown that the input power of 28 kW causes an increase in both the microhardness and elastic properties of coatings simultaneously.

Key Word Erosion performance; Plasma sprayed coatings; Alumina-Titania; Microstructure; Elastic properties

^{*} نسخهی نخست مقاله در تاریخ ۹۲/۱۰/۱۵ و نسخهی پایانی آن در تاریخ ۹۳/٤/۱٤ به دفتر نشریه رسیده است.

⁽۱) نویسنده مسئول، مربی دانشکده علوم و فناوریهای نوین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فنّاوری پیشرفته، کرمان.

⁽۲) استاد گروه پژوهشی بیومواد، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان .

⁽۳) استادیار گروه مهندسی مکانیک، دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته.

کرده است که چقرمگی پوشش تأثیر زیادی بر ساختار لایهای و خواص فرسایشی پوشش دارد. نتایج عددی و تجربی آن ها نشان میدهد که با کنترل چقرمگی پوشش، رفتار فرسایشی پوشش را می توان کنترل کرد [1]. افزون بر این، پژوهشهای قبلی نشان میدهند که انتخاب درست و مناسب متغیرهای یوشش دهی همراه با کنترل ریزساختار نهایی پوشش و دمای شعلهی يلاسما، خواص يوشش را تحت تـأثير قـرار مـيدهنـد [13-15]. برای رسیدن به یک ریزساختار مناسب، متغیرهای قابل کنترل زیادی وجود دارند [16]. این متغیرها شامل توان ورودی پلاسما، نوع گاز پلاسما و گاز کمکی پلاسما، فاصلهی پوشش دهمی، گاز حامل پودر، نرخ تغذیهی پودر و زاویهی برخورد ذرات می باشند [11]. ایجاد تغییرات اندک در متغیرهای قابل کنترل و غیرقابل کنترل، تأثیرات زیـادی مـیتوانـد بـر ریزساختار و در نتیجه، عملکرد سطحی، سایشی و فرسایشی یوشش داشته باشد [16]. با توجه به ضریب انتقال حـرارت پـایین مـواد سـرامیکی، ارزیـابی تـوان ورودی پلاسما و نرخ ورودی گاز پلاسما از مؤثرترین متغیرهای کنترل کنندی شرایط نهایی ذرات و مُرفولوژی پوشش و در نتیجه، عملکرد فرسایشی پوشش مىباشند [11].

در پژوهش حاضر، به منظور ارزیابی عمل کرد فرسایشی پوشش های پاشش پلاسما، پوشش مادهی مرکب آلومینا- تیتانیا تحت شرایط متفاوتی از توان ورودی پلاسما تهیّه شد. توان ورودی پلاسما و زمان ماندگاری ذرات در شعلهی پلاسما، از مهم ترین عوامل مؤثر بر ذوب و سرعت دادن به ذرات قبل از برخورد به سطح زیرلایه میباشند [17]. افزون بر این، تأثیر حضور فازهای آلفا و گامای آلومینا، ریزسختی و پوشش، ارزیابی شدند. برای بهبود رفتار کشسانی پوشش و دستیابی به توزیع مناسب ذرات تیتانیا در ساختار پوشش، از ذرات نانومتری تیتانیا استفاده شد. مقدمه

سایش و فرسایش، عوامل انهدام بسیاری از قطعات مهندسی میباشند و کنترل و کاهش آنها، از چالشهای اصلی در صنعت است [1]. روشهای اصلاح سطح به خصوص پوشش دهی، از روشهای کارآمد برای مقابله با آنها در طول شرایط بار گذاری قطعه میباشند.

پوشش های سرامیکی تولید شده بهروش پاشش حرارتی به طور گسترده ای در گستره ی وسیعی از برنامه های کاربردی، برای ایجاد مقاومت به سایش، فرسایش، حفاظت در برابر خوردگی و عایق حرارتی، استفاده می شوند [2]. در میان روش های پاشش حرارتی، پاشش پلاسمایی اتمسفری فرایندی تجاری از قابلیّت پوشش دهی طیف وسیعی از مواد صنعتی ترخوردار است [2,3]. در این روش، از انرژی حرارتی یک قوس الکتریکی و ایجاد یک جت پلاسما برای ذوب و پرتاب ذرات مذاب با سرعت بالا بر روی زیرلایه استفاده می شود. دمای گاز پلاسما در این مرحله بسیار بالا می رود و حتی می تواند به حدود مرحله بسیار بالا می رود و حتی می تواند به حدود

پوشش های پایه آلومینا بهروش پاشش پلاسمایی تولید می شوند [6,7]. شکنندگی این پوشش ها و حضور نقص های ساختاری از جمله ریزترک ها، ذرات جامد و نیمه جامد، چسبندگی ضعیف بین لایه های پوشش و حفره های تشکیل شده در مرز ذرات تخت شده، خواص پوشش را تحت تأثیر قرار می دهند -8] شده، خواص پوشش را تحت تأثیر قرار می دهند -8] مُرفولوژی پوشش و شرایط و ویژگی های ذرات ساینده است [1].

افزودن تیتانیا به پوشش آلومینا، باعث بهبود چقرمگی پوشش و چسبندگی بهتر لایههای پوشش میشود. اکسید تیتانیوم با دمای ذوب پایین تر نسبت به آلومینا، باعث کاهش دمای ذوب پودر مادهی مرکب میشود [7,11,12]. نتایج چنگ و همکاران مشخص حضور ذرات تیتانیا در پودر مادهی مرکب باعث رسیدن به خواص چسبندگی بهتر پوشش میشود [12]. چگونگی توزیع تیتانیا و تأثیر آن بر رفتار فرسایشی پوششهای تهیّه شده نیز ارزیابی شد.

مواد و روش انجام تحقيق

نمونه هایی از فولاد زنگنزن ۳۱٦L به شکل استوانه به قطر ۲۵ میلی متر به عنوان زیرلایه برای تهیّهی پوشش ماده ی مرکب آلومینا- تیتانیا استفاده شد. نمونه های تهیّه شده پس از آماده سازی سطح، با ذرات آلومینا دAl₂O₃ با مش ۳٦ ذره پاشی شدند تا زبری معادل آلومینا در Al₂O با مش ۳٦ ذره پاشی شدند تا زبری معادل ۲/۵۱ میکرومتر ایجاد شود. سپس نمونه ها برای چربی زدایی با آستون شسته شدند و پس از آن، با آب مقطر تمیز و خشک شدند.

پوشش آلومینا- تیتانیا با ۳ درصد وزنی تیتانیا، به عنوان پوشش ماده ی مرکب برای پوشش دهی به روش پاشش پلاسمایی اتمسفری بر روی زیرلایه ای از فولاد مورد نظر انتخاب شد. ذرات آلومینا (۱–۲۸–۱۳٤٤، شرکت شارلو با خلوص ۹۹/۹۹ درصد) به شکل کروی و با اندازه ی دانه ی ۵۰ میکرون و ذرات تیتانیا (۹–۶۹– ۱۰۰ شرکت زیگماآلدریچ) با اندازه ی دانه ی ۱۰۰ نانومتر استفاده شد. ضخامت تقریبی پوشش ۱۵۰ میکرون انتخاب و پوشش در پنج مرحله ی متوالی اعمال شد.

پوشش دهی با استفاده از تفنگ پاشش مدل بوشش دهی با استفاده از تفنگ پاشش مدل Metallization PS50M (شرکت پودر افشان، شهرک علمی تحقیقاتی، اصفهان، ایران) انجام شد. بهعلّت قدرت یونش بالا و قیمت پایین تر، از گاز آرگون بهعنوان گاز پلاسما استفاده شد. برای افزایش رسانایی گرمایی پلاسما و افزایش آنتالپی فرایند، گاز نیتروژن هم بهعنوان گاز کمکی به محیط افزوده شد [11]. متغیرهای اجرایی پاشش پلاسمایی برای تولید پوشش مادهی مرکب آلومینا- تیتانیا، در جدول (۱) آمده است. از آزمون پراش پرتوی ایکس (XRD) برای شناسایی ساختار فازی پوشش ها استفاده شد. از پرتوی

مس با طول موج ۱/۵٤۰۹ آنگستروم استفده شد. به منظور ارزیابی مُرفولوژی پوشش، از دستگاه میکروسکُپ الکترونی روبشی (SEM) مدل پرتوی ایکس (VEGA\TESCAN-LMU مجهز به طیفسنج انرژی پرتوی ایکس (EDS)ساخت کشور جمهوری چک استفاده شد. نمونه ها قبل از قرارگیری در دستگاه میکروسکُپ الکترونی روبشی، توسط لایه ای از طلا پوشش داده شد. دلیل این کار، رسانایی کم پوشش آلومینا- تیتانیا بود. در ادامه ی کار، تصویرهایی با بررگنمایی مناسب برای ارزیابی و مطالعه مُرفولوژی سطح تهیّه شد.

جدول ۱ متغیرهای اجرایی پاشش پلاسمایی برای تولید پوششهای مادهی مرکب کامپوزیتی آلومینا- تیتانیا

مقدار	متغير
۲٤, ۲۸, ۳۲	توان ورودی پلاسما (kW)
110	فاصله (mm)
۲.	نرخ تغذيه (<mark>gr</mark> نرخ تغذيه (
٩٠	زاویهی پاشش (deg)
۲٥	سرعت حرکت تفنگ پاشش (mm)
۳.	سرعت خروخ گاز حامل (m)

میزان ف از آلومینای آلف ا و گامای موجود در ساختار پوشش، بهطور نسبی و با استفاده از طول پیکهای اصلی این فازها در الگوی پراش پرتوی ایکس آنها و بهکمک رابطهی (۱) محاسبه شد [18]. تعیین فازهای آلومینای آلفا و گاما، با کارت مراجع نرمافزار pert انجام گرفت (کارت مرجع شمارهی نرمافزار ۱۲۵۲ برای آلومینای آلفا و کارت مرجع شمارهی ۱۰–۲۵۰۰ برای آلومینای گاما). (۱)

در رابطهی (۱)، I_i طول پیک اصلی فاز آلومینـای آلفا در الگوی پراش پرتوی ایکـس پوشـش و I_i طـول پیک اصلی فاز آلومینای گاما در الگوی پـراش پرتـوی

ایکس پوشش میباشند.

از آزمون ریزسختی سنج ویکرز برای اندازه گیری سختی پوشش استفاده شد. این آزمون با دستگاه سختی سنج استروارس مدل دورامین ۲۰ ساخت کشور آلمان و با اعمال نیروی ۱/۹٦۱ نیوتن بهمدت ۱۵ ثانیه، انجام شد. اندازه گیری ها در ۵ نوبت متوالی تکرار و مقدار میانگین گزارش شد. برای اندازه گیری اندازهی دانههای پودر مادهی مرکب، از دستگاه تعیین اندازهی دانهی لیزری مدل آنالی سِت 22 ساخت شرکت فریش استفاده شد.

بهمنظور ارزیابی رفتار فرسایشی پوشـش، از یـک محفظهی بسته که درون آن با دوغابی از ذرات آلومینا با اندازهی متوسط دانهی ۲۰ میکرون و درصد وزنـی ۱۵ درصد آلومینا پر شده بود، استفاده شد. نمونههای یوشش داده شده توسط یک محفظهی نگهدارنده درون محلول ثابت نگه داشته شد و سطح پوشش در تماس با دوغاب قرار گرفت. سرعت چـرخش دسـتگاه ۷۰۰ دور بر دقیقه تنظیم شد. کاهش وزن نمونهها با دسـتگاه مخصوص اندازهگیری وزن و با دقّت ۰/۰۱ میلـیگـرم اندازه گیری شد. قبل و بعد از اندازه گیری، نمونه ها با استون تميز شد و بهمات ۱۰ دقیقه در حمّام التراسونيك قرار گرفت. براي ثابت ماندن غلظت دوغاب، محلول داخل دستگاه بعد از هر دو ساعت تعويض و محلول تازه جای گزين آن شد. نتايج بهصورت نمودار کاهش وزن بر حسب مدتت زمان سپری شده برای هر یک از نمونهها رسم شد.

نتايج و بحث

شکل (۱)، توزیع ذرات پودر مادهی مرکب آلومینا- تیتانیا تهیّه شده بهروش دانهبندی لیزری را نشان میدهد. پیکهای مربوط به حضور ذرات آلومینا و تیتانیا، در شکل مشخص شدهاند. اندازهی ذرات آلومینا با استانداردهای پاشش پلاسمایی که برای سرامیکها بین ٦٠ تا ٧٠ میکرون را توصیه میکند،

تطابق خوبی دارد [19,20]. در شکل (۲)، تصویری از یودر مادهی مرکب آلومینا- تیتانیا مورد استفاده در دستگاه پاشش پلاسمایی را نشان میدهد. الگوی پراش پرتوی ایکس مربوط به پوشش های مادهی مرکب تهیّه شده با توانهای ورودی مختلف، در شکل (۳) مشخص شدهاند. افزون بر این، میزان فازهای آلومینای آلفا و گامای موجود در ساختار پوشش های مادهی مركب، در شكل (٤) نشان داده شده است. نتايج الگوي پراش پرتوی ایکس مربوط به پودر مادهی مرکب، نشان میدهند که پودر مادهی مرکب اولیّـه بـهصـورت ۱۰۰ درصد فاز آلومینای آلفا بوده است. با توجه به یایـداری شـیمیایی زیـاد ذرات آلومینـا، تنهـا تغییـر ساختاری برای توانهای ورودی متفاوت پاشش، تبدیل فاز آلومینای آلفا به گاما است. تغییر در دمای شعلهی یلاسما، میزان فاز آلفا و گامای موجود در ساختار پوشش را تغییر داده است. این تغییرات ساختاری می تواند بر خواص پوشش مؤثر باشد. برای توانهای ورودی ۲۵ و ۲۸ کیلووات، شرایط از نظر حضور فازهای آلفا و گاما تقریباً یکسان بوده است. با ادامه ی افزایش توان ورودی و برای شرایطی با توان ۳۲ کیلووات، افزایش چشم گیری در فاز گاما مشاهده می شود. افزایش فاز گاما در این حالت، با سرعت زیاد سرد شدن ذرات و همچنین، از دست دادن مقدار زیادی از گرمای پوشش مرتبط است [21]. افزایش فاز گاما باعث بهبود چقرمگی پوشش میشود [22]. بهبود چقرمگی پوشش، تأثیر مستقیمی بر رفتار فرسایشی يوشش دارد. با توجه به ساختار فشردهی فاز آلفا، سختی این فاز بیشتر از فاز گاما میباشد و کاهش فاز آلفا و افزایش فاز گاما می تواند باعث کاهش ریزسختی پوشش شود. برای توان ورودی ۲۸ کیلووات، میزان فاز گاما و آلفا در ساختار پوشش بهشکلی است که افزون بر چقرمگی مناسب، توانایی ایجاد ریزسختی مناسب را نيز دارا مي باشد.



شکل ۱ اندازهی ذرات پودر مادهی مرکب آلومینا- تیتانیای مصرفی در دستگاه پاشش پلاسمایی بهمنظور تهیّهی پوششهای مادهی مرکب



شکل ۲ تصویر میکروسکُپ الکترونی روبشی از ذرات پودر مادہی مرکب آلومینا– تیتانیا



شکل ۳ الگوی پراش پرتوی ایکس مربوط به پوششهای مادهی مرکب آلومینا- تیتانیا تهیّه شده با شرایط: **الف**) پودر خام اولیّه، ب) توان ورودی ۲۶ کیلووات، پ) توان ورودی ۲۸ کیلووات،) توان ورودی ۲۸ کیلووات،) توان ورودی ۳۲ کیلووات



شکل ٤ میزان فازهای آلومینای آلفا و گامای موجود در ساختار پوششهای مادهی مرکب آلومینا- تیتانیا تهیّه شده در شرایط متفاوتی از



کیلووات، ب) توان ورودی ۲۸ کیلووات و پ) توان ورودی ۳۲ کیلووات.

شکل (٥)، مُرفولوژی پوشش مادهی مرکب آلومینا- تیتانیا در شرایط متفاوتی از توان ورودی پلاسما را نشان میدهد. تأثیر تغییر توان ورودی پلاسما بر خواص پوشش را مي توان با تغيير ميزان تخلخل پوشش و تأثیر بر مُرفولوژی پوشش ارزیابی کرد. ایـن نقص های ساختاری تا حدود زیادی خواص یوشش را تحت تأثير قرار مىدهند. ريزساختار تـأثير زيادى بـر چقرمگی پوشش و در نتیجه، خواص فرسایشی آن دارد. كاهش تخلخل و توزيع همكن آن مي تواند بدون تأثیر کاهشی بر ریزسختی پوشش، خواص کـشسـانی پوشش را تا میزان زیادی افزایش دهد [23]. با اعمال توان ورودی ۲٤ کیلووات، اغلب ذراتی که به سطح رسیدهاند، بهصورت جامد و یا نیمهجامد هستند. دمای پایین شعلهی پلاسما، از دلایل اصلی حضور ایـن گونـه ذرات در سطح پوشش است. برای این توان ورودی، چگالی پلاسما و انرژی منتقل شده به ذرات موجود در شعله کمتر از آن است کـه بتوانـد تمـام ذرات را ذوب کند. حضور این ذرات در ساختار پوشش باعث افزایش میزان تخلخل در سطح پوشش شده است. بیش اعظم تخلخل، در فصل مشترک ذرات جامد با اسپلیت ها تشکیل شده است. به دلیل حضور این ذرات، تشکیل یک پوشش شکنندہ با خواص مکانیکی نامطلوب دور از انتظار نیست. در ایـن حالـت، حضـور ذرات جامد و نیمهجامد در ساختار پوشش، چسبندگی لايههاي مياني پوشش را با مشكل مواجه ميكند. تـأثير نامطلوب حضور ذرات جامد و نیمهجامد بر چسبندگی لايەھاي مياني و همچنين، افزايش شكنندگي پوشـش، عمل کرد فرسایشی پوشش را نامناسب می کند. انتظار می رود که در اثر برخورد ذرات آلومینای موجود در دوغاب، سازوكار فرسایشی این پوشش، رشد ريزتركها و شكست ترد أن باشد [24]. افزون بر ايـن، سرعت پایین برخورد ذرات به سطح زیرلایه و یا لايەھاي قبلي پوشىش باعـث كـاھش تـراكم پوشـش میشود. در مقابل، مُرفولوژی پوشش برای توان

ورودی ۲۸ کیلووات به علّت دمای مناسب شعلهی يلاسما، از ساختار متراكم تر و با تخلخل سطحي كمترى نسبت به توان ٢٤ كيلووات برخوردار است. افزایش توان ورودی پلاسما با افزایش یونش محیط پلاسما، باعث افزایش دما و سرعت حرکت ذرات موجود در این محیط میشود [25]. در این حالت، بیشتر ذرات رسیده به سطح پوشش بهصورت کامل ذوب شدهاند. این ذرات، توانایی مناسبی برای شکلپذیری و پهنشـدگی بـر روی سـطح پوشـش را دارند. دما و سرعت حرکت ذرات، تـأثير زيـادي بـر میزان پهنشدگی و ساختار نهایی پوشـش دارنـد [25]. شرایط مناسب برخورد ذرات به سطح با افزایش فصل مشترك بين اسپليتها، باعث چسبندگي مؤثرتر پوشش می شود و افزون بر این، باعث کاهش تخلخل و ذرات جامد و نیمهجامد در ساختار پوشش میشود. بهبود كيفيّت سطح از نقطه نظر حضور حداقل ميزان تخلخل و ریزترک در ساختار پوشش برای این توان ورودی پلاسما، عملکرد فرسایشی مناسبی را ایجاد میکند. همچنین، انتظار میرود که بیشتر فاز آلومینای آلفای موجود در ساختار این پوشش با ذراتی مرتبط باشند که در شرایط شعلهی پلاسما ذوب شدهاند و در ادامه و پس از برخورد با سطح، با ساختار بلوری فاز آلف در پوشش سرد شدهاند. این حالت می تواند به سرعت مناسب حرکت تفنگ پلاسما بر روی سطح زیرلایه مربوط باشد که با تمرکز بر سطح پوشـش، مـانع از از دست رفتن سريع گرما براي پوشش شده است. مقایسهی فاز آلومینای آلف برای توانهای ۲۶ و ۲۸ کیلووات، مشخص میکند که فاز آلفا برای توان ورودی ۲٤ کیلووات به ذرات ذوب نشده در ساختار پوشش مربوط میباشد که میتواند خواص کـشسانی پوشش را تضعیف کند، در حالی که فاز آلفا برای تـوان ۲۸ کیلووات به شرایط مناسب برای تشکیل فاز آلف از ذرات ذوب شده مربوط است. ایـن ذرات عـلاوه بـر افزایش چقرمگی پوشش بهعلّت شکل پذیری مناسب

در سطح پوشش، باعث افزایش ریزسختی هم میشوند. این در حالی است که انتظار می رود که با افزایش چقرمگی پوشش، ریزسختی کاهش یابد. افزایش ریزسختی و بهبود خواص کشسانی پوشش در این حالت، با بهبود همزمان ریزساختار و ساختار بلورین پوشش مرتبط بوده است.

برای توان ورودی ۳۲ کیلووات، دمای بالای شعلهی پلاسما بیشتر ذرات رسیده به سطح را تبخیر کرده است. بقایای این ذرات (ذرات میانتهی)، در شکل (٥- پ) قابل مشاهدهاند. برای این توان ورودی از پلاسما نیز سطحی با تخلخل زیاد تولید شده است، ولی کیفیّت پوشش مناسبتر از توان ورودی ۲۶ کیلووات است. افزایش میزان فاز آلومینای گاما و بالا رفتن کیفیّت پوشش، عمل کرد فرسایشی پوشش را در مقایسه با توان ورودی پلاسما ۲۶ کیلووات بهبود داده

ارزيابي تأثير ريزساختار پوشش شامل اسيليتهـ، حفرهها، نواحي جزئي ذوب شده و نواحي ذوب نشده، بر خواص فرسایشی پوشش کار پیچیدهای است، زیرا این نقص های ساختاری به صورت مستقل بر رفتار فرسایشی مؤثر نیستند. ارزیابی دقیق تأثیر این عوامل بر رفتار فرسایشی پوشش نیازمند ارزیابی نقش عوامل دیگر از جمله خواص مکانیکی پوشش، می باشد [11]. تأثير توان ورودي پلاسما بر رفتار ريزسختي پوشـش، در شکل (٦) نشان داده شـده اسـت. در تـوان ورودی پلاسمای ۲۸ کیلووات، ریزسختی به مقدار بیشینهی خود رسیده است. خواص مکانیکی یوشش از جمله ريزسختي آن، متأثر از ريزساختار يوشش است [26]. پوشـش ایجـاد شـده در تـوان ورودی پلاسـمای ۲۸ کیلووات، عاری از ریزترک و تخلخل است، در صورتی که در یوشش های ایجاد شده با توان های ورودی ۲٤ و ۳۲ کیلووات، تخلخل و ریزترک در سطح پوشش مشاهده می شود. افزون بر ایـن، سـرعت بالای ذرات در لحظهی برخورد با سطح زیرلایـه و یـا

لایههای قبلی پوشش، باعث افزایش ریزسختی پوشش برای توانهای ۲۸ و ۳۲ کیلووات در مقایسه با حالت ۲٤ کیلووات شده است.

انحراف معیار مشخص شده در شکل (٦) را می توان معیاری از چگونگی توزیع تخلخل در سطح پوشش دانست. این مقدار برای توان ورودی ۲۸ کیلووات، کمینه است. برای این توان ورودی پلاسما، توزیع تخلخل یکنواخت تر و کمتر است. توزیع یکنواخت تخلخل می تواند منجر به بهبود خواص کشسانی پوشش شود و رفتار فرسایشی آن را تحت تأثیر قرار دهد.



شکل ٦ تغییرات ریزسختی پوششهای مادهی مرکب آلومینا-تیتانیای تهیّه شده در شرایط متفاوتی از توان ورودی پلاسما

در این پژوهش و بهمنظور بهبود خواص کشسانی پوشش، از ذرات نانوتیتانیا با اندازهی ۱۰۰ نانومتر استفاده شده است. ذرات تیتانیا با قرارگیری بین ذرات آلومینا که از چسبندگی ضعیف تری برخوردارند، باعث تقویت چسبندگی این ذرات به یکدیگر می شوند [21]. افزون بر این، افزودن تیانیا به ذرات آلومینا باعث پوشش هایی با کارایی بهتر و تخلخل کمتر می شود [21]. با توجه به این واقعیّت که دمای ذوب ذرات تیتانیا کمتر از آلومینا می باشد، این ویژگی توانایی تیتانیا کمتر از آلومینا می باشد، این ویژگی توانایی می دهد و موجب کاهش دمای ذوب پودر می شود.

افزون بر این، ذرات تیتانیا با رسانایی حرارتی بهتر خود باعث انتقال حرارت بهتر از محيط پلاسما به پودر مادهی مرکب میشوند. فرایند آمادهسازی پودر بهشکلی انجام شد که ذرات آلومینا و تیتانیا در یک آسیای مکانیکی پرانرژی و در حالت بدون گلوله قرار گرفتند. این فرایند باعث شد تا ذرات تیتانیا با سطح ذرات آلومینا پیوند مکانیکی برقـرار کننـد و بـهایـن ترتیـب، ذرات تیتانیا بر روی سطح ذرات آلومینا پوشش خوردند. همانگونه که در شکل (۷) مشاهده می شود، توزيع يكنواخت تيتانيا در ساختار تمام پوشـش.هاي تهيّه شده، اين واقعيّت را تأييد ميكند. افزون بر اين، با مقایسهی تصویرهای این شکل مشخص می شود که برای حالت استفاده از توان ورودی ۳۲ کیلووات، کلوخهای شدن جزئی رخ داده است و این می تواند با سرعت بالای ذرات در این حالت مرتبط باشد. سرعت بالای پودر مادهی مرکب، احتمال برخورد ذرات را افزایش داده و باعث کلوخهای شدن ذرات پودر شده است. با مقایسهی دقیقتر شکل (۷)، الف و ب، می توان شکل گیری اسپلیتها را نیز مشاهده کرد، با توجـه بـه این واقعیّت که امکان نفوذ ذرات تیتانیا به سمت فاز آلومینای آلفا بهدلیل ساختار متـراکم آن، امکـان پـذیر نيست [22]. در شكل (٧- الف)، ذرات تيتانيا در فاصلههای بیشتری نسبت به یکدیگر قرار دارند و این پهنشدگی اسپلیتها را نشان میدهد. نواحی که در آنها ذرات تیتانیا حضور ندارند را می توان فاز آلومینای آلفا در نظر گرفت.

آزمون فرسایش برای پوشش های سرامیکی، آزمونی استاندارد برای تخمین عمر پوشش میباشد. سایش از نوع فرسایشی، به زاویهی برخورد ذرات به سطح پوشش وابسته است. برای زاویه های کم برخورد، ذرات با سازوکار سایشی از سطح پوشش جدا میشوند و برای زاویه های زیاد، رشد ریزترک ها و حفره های موجود در سطح پوشش باعث تضعیف عمل کرد فرسایشی پوشش می شوند. برای سایش از نوع فرسایشی درون دوغاب ذرات آلومینا، احتمال بر خورد

ذرات با هر زاویهای وجود دارد [24]. در ایـن حالـت، آنچه عملکرد فرسایشی را تغییر میدهـد، ریزسـاختار، چقرمگی و ریزسختی پوشش است.

افزایش ریزسختی پوشش، با ممانعت از رشد ریزترکها، باعث بهبود عملکرد فرسایشی میشود. ریزترکهای موجود در سطح پوشش، مکانهای مناسبی برای شروع فرایند فرسایش هستند [27]. شکل (۸)، ارتباط بین ریزسختی و خواص فرسایشی را نشان می دهد. همان گونه که مشاهده می شود، با افزایش ريزسختي خواص فرسايشي پوشش بهبود يافته است. کمترین ریزسختی مربوط به توان ۲٤ کیلووات است که در آن، ضعیفترین رفتار فرسایشی مشاهده شده است. افزون بر ریزسختی، عوامل دیگر از جمله مُرفولوژی پوشش نیز بر رفتار فرسایشی پوشش مؤثرند. حضور ذرات جامد و نیمهجامد در ساختار پوشش باعث كاهش چسبندگی ساختار لایهای پوشش می شود. افزون بر این، حضور این ذرات در فصل مشترک پوشش و زیرلایه میتواند چسبندگی پوشش به زيرلايه را تحت تأثير قرار دهد. اين ذرات بهدليل عـدم توانایی کافی در شکل پذیری مناسب حین برخورد به سطح زیرلایه و یا لایههای قبلی پوشش، باعث ایجاد حفرهها و فضاهای خالی در لایـههـای میانی یوشـش می شوند و با کاهش فصل مشترک بین لایه های پوشش، باعث کاهش چسبندگی پوشش به زیرلایه میشوند. سازوکار فرسایش برای پوشـش،هـایی کـه درصد بالایی از این ذرات دارند، به صورت شکست ترد و لایهای شدن می باشد. برای توان های ۲۶ و ۳۲ کیلووات، حضور این ذرات، تخلخل و در نتیجهی آن، خواص فرسایشی را افزایش داده است. رفتار فرسایشی پوشش ها بر حسب کیفیّت سطح، در شکل (۹) آمده است. از آنجا که افزایش نقص های ساختاری رابط می مستقیمی با تخلخل موجود در سطح پوشش دارد، تخلخل سطحی معیاری برای ارزیابی کیفیّت سطح در نظر گرفته شده است.



شکل ۷ نحوهی توزیع تیتانیا در ساختار پوشش های مادهی مرکب آلومینا- تیتانیا تهیّه شده با الف) توان ورودی ۲۶ کیلووات، ب) توان ورودی ۲۸ کیلووات و پ) توان ورودی ۳۲ کیلووات



شکل ۸ نمودار تغییرات ریزسختی با نرخ فرسایش پوشش های مادهی مرکب تهیّه شده



شکل ۹ نمودار تغییرات کیفیّت سطح با نرخ فرسایش پوشش های مادهی مرکب تهیه شده



شکل ۱۰ تغییرات میزان فاز آلومینای گامای موجود در پوشش بر حسب نرخ سایش پوشش.های مادهی مرکب تهیّه شده

خواص کش سانی یوشش، عامل عمده در ارزیابی رفتار فرسایشی آن است. حضور درصد مناسبی از فاز گاما در ساختار پوشـش و تولیـد پوشـش بـا خـواص همگن می تواند کش سانی یوشش را بهبود دهد. افزون بر این، کیفیّت سطح نیز از نظر حضور ذرات جامد، تخلخل و پهنشدگی ذراتِ رسیده به سطح نیز بر خواص کشسانی مؤثرند. در شکل (۱۰)، ارتباط بین میزان فاز آلومینای گامای موجـود در پوشـش بـا نـراخ سایش پوشش های مادهی مرکب نشان داده شده است. افزایش فاز گاما در ساختار پوشش موجب بهبود عمل کرد فرسایشی شده است، ولی حضور حداکثری فاز گاما تنها عامل مؤثر بر رفتار فرسایشی نیست. نقش عوامل دیگر از جمله میزان و نوع تخلخل، موجب شدهاند تا با وجود حضور درصد بیش تری از فاز گاما در ساختار یوشش، یوشش ایجاد شده با توان ورودی ۳۲ کیلووات عمل کرد فرسایشی ضعیف تری نسبت به توان ورودی ۲۸ کیلووات داشته باشد.

شکل (۱۱)، رفتار فرسایشی پوشش های مادهی مرکب آلومینا- تیتانیای تهیّه شده در شرایط متفاوتی از توان ورودی پلاسما را نشان می دهد. در تمام مراحل آزمون، روند فرسایش پوشش ها تقریباً مشابه بوده است. اختلاف موجود در رفتار فرسایشی در شکل (۱۱- الف) و شکل های (۱۱- الف و پ)، با تأثیر همزمان ریزسختی، مُرفولوژی و خواص کشسانی

ارتباط دارد. همان طور که گفته شد، با انتخاب درست و مناسب توان ورودی پلاسما، شرایط مناسبی از دما و سرعت ذرات فراهم شده است و در این شرایط، با کاهش تخلخل، افزایش ریزسختی و بهبود خواص کشسانی پوشش، عمل کرد فرسایشی آن بهبود چشم گیری داشته است.



شکل ۱۱ عمل کرد فرسایشی پوشش های مادهی مرکب آلومینا-تیتانیای تولید شده با شرایط الف) توان ورودی ۲۶ کیلووات، ب) توان ورودی ۲۸ کیلووات و پ) توان ورودی ۳۲ کیلووات

نتيجه گيرى

نتایج پژوهش حاضر که با هدف ایجاد پوشش مادهی مرکب آلومینا- تیتانیا توسط فرایند پاشش پلاسمایی و ارزیابی و مشخصّهیابی پوشش و بررسی تأثیر توان ورودی پلاسما بر مُرفولوژی، ریزسختی و عمل کرد فرسایشی پوشش انجام شد، نشان دادند که انتخاب درست و مناسب توان ورودی پلاسما با ایجاد ورودی، افزایش ریزسختی و بهبود خواص کـشسـانی بهشکل همزمان صورت پذیرفت.

تشکر و قدردانی

از مساعدتهای بیشائبهی جناب آقای دکتر علیرضا گنجویی، ریاست محترم پژوهشکدهی فُتونیک و کلیّهی استادان و کارمندان محترم دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فنّاوری پیشرفته تشکر و قدردانی میشود.

دما و سرعت مناسب برای ذرات، خواص کشسانی، ریزسختی و فازهای موجود در ساختار پوشش تحت تأثیر قرار میگیرند. بهترین عملکرد فرسایشی در این حالت، با بهترین رفتار کشسانی پوشش مرتبط بود. حضور میزان مناسبی از فاز آلومینای گاما و توزیع یکنواخت تخلخل در ساختار پوشش، بیشترین تأثیر را بر خواص کشسانی داشت. برای توان ورودی ۲۸ کیلووات، افزون بر خواص کشسانی مناسب پوشش، ریزسختی نیز افزایش یافت. افزایش ریزسختی در این حالت، با کاهش تخلخل متناسب بود. برای این توان

مراجع

- 1. Li, C.-J., Yang, G.-J. andOhmori, A., "Relationship between particle erosion and lamellar microstructure for plasma-sprayed alumina coatings", *Wear*, Vol. 260, pp. 1166-1172(2006).
- Psyllaki, P.P., Jeandin, M. and Pantelis, D.I., "Microstructure and wear mechanisms of thermalsprayed alumina coatings", Materials Letters, Vol. 47, pp. 77-82, (2001).
- Santa, J.F., Baena, J.C. andToro, A., "Slurry erosion of thermal spray coatings and stainless steels for hydraulic machinery", *Wear*, Vol. 263, pp. 258-264, (2007).
- Fauchais, P., "Understanding plasma spraying", *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 37, pp. 86-110, (2004).
- 5. Pawlowski, L., "The science and engineering of thermal spray coatings", John Wiley & Sons, (2008).
- Rico, A., Poza, P. andRodríguez, J., "High temperature tribological behavior of nanostructured and conventional plasma sprayed alumina-titania coatings", *Vacuum*, Vol. 88, pp. 149-154, (2013).
- Rico, A., Garrido, M.A., Otero, E. andRodríguez J., "An energetic approach to the wear behaviour of plasma-sprayed alumina–13% titania coatings", *Acta Materialia*, Vol. 58, pp. 5858-5870, (2010).
- Bhandari, S., Singh, H., Kansal, H. andRastogi, V., "Slurry Erosion Behaviour of Detonation Gun Spray Al₂O₃ and Al₂O₃-13TiO₂-Coated CF8M Steel Under Hydro Accelerated Conditions", *Tribology Letters*, Vol. 45, pp. 319-331, (2012).
- Osorio, J.D., Maya, D., Barrios, A.C., Lopera, A., Jiménez, F., Meza, J.M., and et al., "Correlations Between Microstructure and Mechanical Properties of Air Plasma-Sprayed Thermal Barrier Coatings Exposed to a High Temperature", *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 96, pp. 3901-3907, (2013).
- Vijayakumar, K., Sharma, A.K., Mayuram, M.M. andKrishnamurthy, R., "Response of plasmasprayed alumina-titania ceramic composite to high-frequency impact loading", *Materials Letters*, Vol. 54, pp. 403-413, (2002).

- Song, E.P., Ahn, J., Lee, S. and Kim, N.J., "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*, Vol. 202, pp. 3625-3632, (2008).
- Rico, A., Rodriguez, J., Otero, E., Zeng, P. and Rainforth, W.M., "Wear behaviour of nanostructured alumina-titania coatings deposited by atmospheric plasma spray", *Wear*, Vol. 267, pp. 1191-1197, (2009).
- Hashemi, S.M., Enayati, M.H. and Fathi, M.H., "Plasma Spray Coatings of Ni-Al-SiC Composite", Journal of Thermal Spray Technology, Vol. 18, pp. 284-291, (2009).
- 14. Enayati, M.H., Fathi, M.H. andZomorodian A., "Characterisation and corrosion properties of novel hydroxyapatite niobium plasma sprayed coating", *Surface Engineering*, Vol. 25, pp. 338-342, (2009).
- ۱۵. غیرتی م، فتحی م. ح.، احمدی ع.ر.، "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، (۱۳۹۲).
- Lima, R.S., Kucuk, A. and Berndt C.C., "Bimodal distribution of mechanical properties on plasma sprayed nanostructured partially stabilized zirconia", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 327, pp. 224-232, (2002).
- Yin, Z., Tao, S., Zhou, X. andDing, C., "Particle in-flight behavior and its influence on the microstructure and mechanical properties of plasma-sprayed Al₂O₃ coatings", *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 28, pp. 1143-1148, (2008).
- Venkataraman, R. andKrishnamurthy, R., "Evaluation of fracture toughness of as plasma sprayed alumina–13 wt.% titania coatings by micro-indentation techniques", *Journal of the EuropeanCeramic Society*, Vol. 26, pp. 3075-3081, (2006).
- Mostaghimi J. and Chandra S., "Heat Transfer in Plasma Spray Coating Processes", Advances in Heat Transfer, Vol. 40, pp. 143-204, (2007).
- Fauchais, P., Rat, V., Delbos, C., Coudert, J.F., Chartier, T. andBianchi, L., "Understanding of suspension DC plasma spraying of finely structured coatings for SOFC, Plasma Science", *IEEE Transactions on*, Vol. 33, pp. 920-930, (2005).
- Yugeswaran, S., Selvarajan, V., Vijay, M., Ananthapadmanabhan, P.V. andSreekumar, K.P., "Influence of critical plasma spraying parameter (CPSP) on plasma sprayed Alumina–Titania composite coatings", *Ceramics International*, Vol. 36, pp. 141-149, (2010).
- 22. Venkataraman, R., Pabla Singh, S., Venkataraman, B., Das, D.K., Pathak, L.C., Ghosh Chowdhury S. and et al., "A scanning electron microscopic study to observe the changes in the growth morphology of the α phased Alumina–13 wt.% titania coatings during plasma spraying", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 202, pp. 5074-5083, (2008).
- 23. Lv, H., Zhao, W., An, Q., Nie, P., Wang, J. andChu, P.K., "Nanomechanical properties and microstructure of ZrO₂/Al₂O₃ plasma sprayed coatings", *Materials Science and Engineering: A*, Vol.

518, pp. 185-189, (2009).

- Singh, V.P., Sil A. and Jayaganthan R., "A study on sliding and erosive wear behaviour of atmospheric plasma sprayed conventional and nanostructured aluminacoatings", *Materials & Design*, Vol. 32, pp. 584-591, (2011).
- 25. Fang, J.C., Xu, W.J., Zhao, Z.Y. andZeng, H.P.,"In-flight behaviors of ZrO₂ particle in plasma spraying", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 201, pp. 5671-5675, (2007).
- 26. Nakamura, T., Qian, G. and Berndt, C.C., "Effects of Pores on Mechanical Properties of Plasma-Sprayed Ceramic Coatings", *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 83, pp. 578-58, (2004).
- Hawthorne, H.M., Arsenault, B., Immarigeon, J.P., Legoux, J.G. and Parameswaran, V.R., "Comparison of slurry and dry erosion behaviour of some HVOF thermal sprayed coatings", *Wear*, Vol. 229-225, pp. 825-83, (1999).

٥٠