

بررسی چالش های اجرایی پوشش های نانوساختار به روش پاشش پلاسمایی سد حرارتی

محمد جزینی

باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان

دانشگاه آزاد اسلامی واحد دماوند

دماوند، ایران

smartgridblackbox@gmail.com

مهدی جزینی

باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان

دانشگاه آزاد اسلامی واحد بروجرد

بروجرد، ایران

محسن رفیعی

دانشکده مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

تهران، ایران

مسعود سرپاک

وزارت نیرو، شرکت برق منطقه ای تهران

تهران، ایران

محمد حسن زاده سبلویی

دانشکده مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

تهران، ایران

۱. مقدمه

خواص بهبودیافته این پوشش ها به واسطه بهبود ساختار حاصل شده است. میکروساختار و خواص پوشش های پاشش پلاسمایی به پارامترهای فرآیندی متفاوتی مرتبط می باشند و به صورت قابل توجهی وابسته به ویژگی های پودر تزریق شده هستند؛ پودرهای نانوساختار به وضوح راندمان رسوب دهی، استحکام چسبندگی و سختی پوشش ها را بهبود می دهند. نانوذرات به صورت مجزا بسیار ریز هستند و امکان استفاده از آنها برای پاشش پلاسمایی وجود ندارد و لذا در این شرایط بایستی پیش از پاشش ذرات ریز پراکنده تا ابعادی در حدود ۱۰۰-۳۰ میکرومتر آگلومره شوند. میکروساختار، چگالی و اندازه دانه پودرها تعیین کننده کیفیت پوشش حاصله است.

چکیده — از سال ۱۹۹۰ میلادی پوشش های نانوساختار به دلیل هدایت حرارتی کم، ضریب انبساط حرارتی بالا و خواص مکانیکی عالی به عنوان یک زمینه تحقیقاتی مهم مطرح می باشد و مورد بررسی قرار می گیرند. پودرهای نانوساختار به وضوح راندمان رسوب دهی، استحکام چسبندگی و سختی پوشش ها را بهبود می دهند. نانوذرات به صورت مجزا بسیار ریز هستند و امکان استفاده از آنها برای پاشش پلاسمایی وجود ندارد و لذا در این شرایط بایستی پیش از پاشش ذرات ریز پراکنده تا ابعادی در حدود ۱۰۰-۳۰ میکرومتر آگلومره شوند. میکروساختار، چگالی و اندازه دانه پودرها تعیین کننده کیفیت پوشش حاصله است.

واژه های کلیدی — پوشش های نانوساختار؛ پاشش پلاسمایی؛

تخلخل؛ سرامیک؛

۳-۲-۱ فرآیند خشک کردن پاششی^۱

خشک کردن پاششی فرآیندی است که به کمک آن یک ماده تزریق شده سیال بوسیله پاشش به درون محیط داغ به پودر تبدیل می-شود. موادی که به عنوان خوراک در این روش مورد استفاده قرار می-گیرند، یا سوسپانسیون های پایه آبی به همراه هوا به عنوان گاز خشک کننده هستند و یا اینکه سوسپانسیون هایی بر پایه حلال های آلی (معمولا اتانول) می باشند که از نیتروژن به عنوان گاز خشک کننده استفاده می کنند. روش خشک کردن پاششی برای سرمایه ها توسط لوکاسیویز^۲ مورد بحث قرار گرفته است [۸].

خشک کردن پاششی یک فرآیند پیچیده است، اما میتوان مطابق با آنچه که در شکل ۳-۱ مشاهده می شود یک پروسه چهار مرحله ای را برای آن پیشنهاد کرد:

(الف) شکل گیری قطرات،

(ب) تبخیر و بالونینگ،

(ج) انفجار

(د) شکل گیری ذرات.

هنگامی که سوسپانسیون به درون محفظه خشک کن پمپ می-شود، به واسطه فشار ناشی از گاز تزریق شده به سرعت از هم جدا شده و به قطرات ریز تبدیل می گردد. سپس، قطرات به دلیل تبخیر سریع حلال منقبض می شوند. در هنگام فرآیند، انتقال مایع از داخل به خارج از قطرات و تشکیل ذرات جامد به صورت همزمان انجام می-گیرد.

هنگامی که نرخ تبخیر درون قطرات از نرخ نفوذ از طریق سطح قطرات بیشتر باشد، در قسمت داخلی قطره حفره ای تشکیل خواهد شد. وقتی که فشار داخلی قطرات به یک میزان بحرانی می رسد، انفجار اجتناب ناپذیر است. در گام بعدی، ذرات با از دست دادن حلال و افزوده شدن چسب های آلی به حالت پلاستیکی تبدیل خواهند شد. قطرات پلاستیک مانند به صورت پیوسته به دلیل تاثیر کشش سطحی و تا خشک شدن کامل منقبض می شوند. اندازه ذرات عمدتاً در گام سوم و هنگامی که بیشتر حلال از دست رفته و پوسته ای نرم تشکیل شده است اندازه گیری می شود [۸].

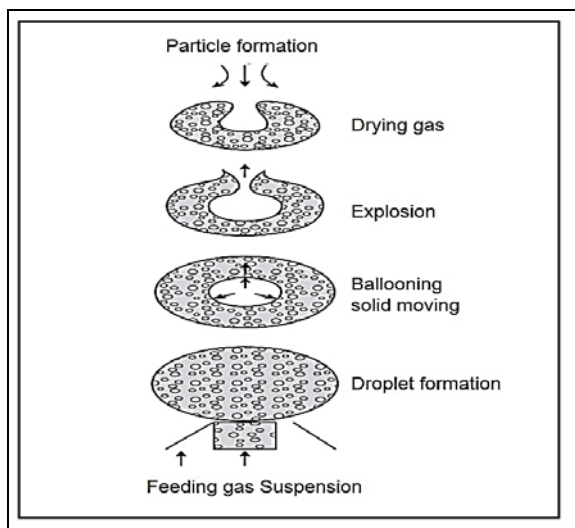
از این رو، استحاله فاز پوشش های زیرکونیای پاششی در شرایط سرویس به عنوان یک پارامتر دارای اهمیت در دوام پوشش ها شناخته می شود [۸]. به صورت کلی می توان استفاده از نانو پودر های آگلومره شده، پاشش پلاسمایی سوسپانسیونی و پاشش پلاسمایی محلول پیش- ماده را به عنوان سه روش مورد استفاده جهت دستیابی به پوشش های سد حرارتی نانوساختار معرفی کرد. در ادامه ضمن معرفی این فرآیند-ها به بررسی برخی از تحقیقات صورت گرفته در این زمینه ها می-پردازیم.

۳-۲ پاشش حرارتی پودر های نانوساختار آگلومره شده

پودر های نانوبعد به علت جریان پذیری پایین، لوله های انتقال در مسیر تغذیه کننده پودر به مشعل پاشش حرارتی را مسدود می کنند و لذا نمی توانند به صورت مستقیم در فرآیند پاشش پلاسمایی مورد استفاده قرار گیرند. نفوذ به داخل جت پلاسمای و رسیدن به سطح زیر لایه برای ذرات بسیار ریز و سبک در مقایسه با ذرات درشت بسیار دشوار است، این امر باعث قرار گرفتن ذرات در نواحی بیرونی و سرد تر پلاسمای و در نتیجه عدم مشارکت در تشکیل ریز ساختار و کاهش بازده رسوب دهی می گردد.

اگرچه برای رفع این مشکل می توان از گاز های حامل با نرخ شارش بالاتر استفاده کرد اما به جهت ایجاد ناپایداری و سرمایش شدید جت پلاسمای، این روش عملی نخواهد بود. از طرف دیگر ذرات بسیار ریز اینرسی پایینی را برای برخورد و نفوذ به داخل ناهمواری های سطحی زیر لایه نشان می دهند و لذا پوشش حاصل از آنها از چسبندگی و کیفیت مناسبی برخوردار نخواهد بود. برای رفع این مشکل نانو ذرات تهیه شده به پودر هایی با اندازه میکرونی آگلومره می شوند [۳].

به طور معمول برای دستیابی به خوراک های نانوساختار سرمایه کی که در فرآیند پاشش پلاسمایی مورد استفاده قرار گیرند (ذرات آگلومره یا دانه ها) از فرآیندهای خشک کردن پاششی و سل ژل استفاده می شود. در این بین روش خشک کردن پاششی به واسطه دستیابی به پودر های کروی و سیالیت بیشتر مناسب تر به نظر می رسد [۹].



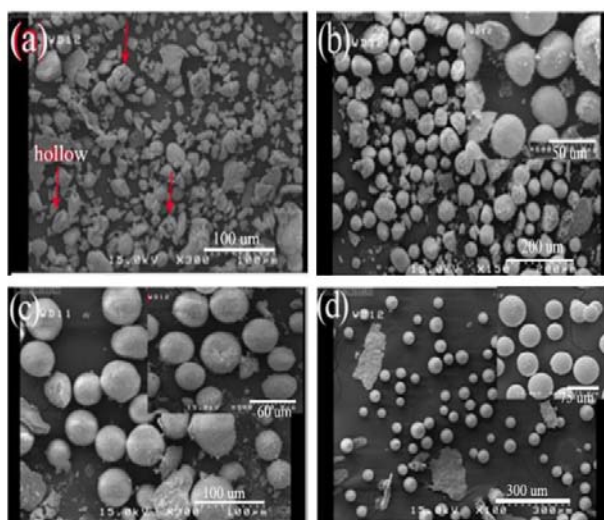
شکل ۳-۱ فرآیند پاشش خشک سرامیک‌ها [۸].

محققان^۳ اقدام به آماده‌سازی دانه‌های YSZ نانوساختار با استفاده از روش خشک کردن پاششی کردند. در این مطالعه به منظور درک تاثیر غلظت عامل اتصال دهنده بر مورفولوژی دانه‌های تهیه شده، از تصاویر FESEM مربوط به پودرهای حاصل از سوسپانسیون‌های با درصد‌های متفاوت از عامل اتصال دهنده استفاده شد (شکل ۳-۲).
 a) (شکل ۳-۲) مورفولوژی ذرات حاصل از سوسپانسیون YSZ بدون عامل اتصال دهنده پس از انجام فرآیند خشک کردن پاششی را نشان می‌دهد.

همانطور که در تصویر مشخص است، دانه‌ها در این حالت توخالی هستند. از طرف دیگر شاهد حضور تعداد زیادی ذرات غیر کروی در این شرایط هستیم. بیشتر دانه‌های حاصل از آگلومره کردن نانوپودرهای YSZ به روش خشک کردن پاششی، مورفولوژی عمدتاً نیمه‌کروی با سطوحی صاف را نمایش می‌دهند (شکل ۳-۲b-d).

با این حال، استفاده از ۱۵ درصد وزنی عامل چسبنده شرایط همگن‌تری را ایجاد کرده و دانه‌ها از ظاهر کروی‌تر و ابعاد یکسان‌تری برخوردارند. به‌علاوه، برخی از دانه‌های تغییر شکل یافته و با حضور وجوح بزرگ، در نمونه‌های با ۱۵ درصد وزنی عامل اتصال دهنده آشکار است (شکل ۳-۲d).

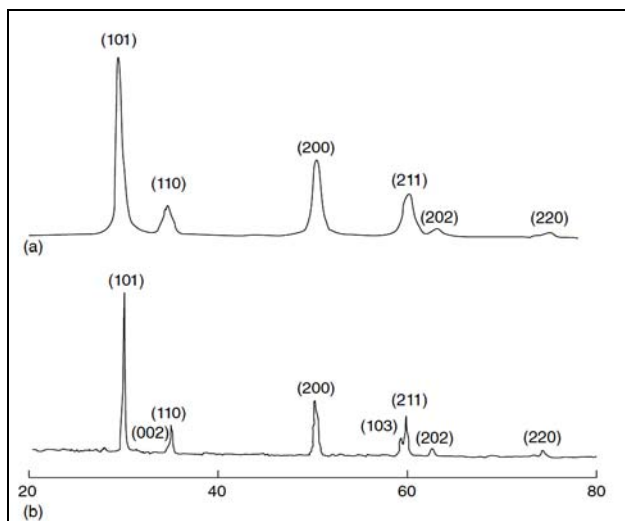
این ناهمگنی را می‌توان به تفکیک فاز مذاب در حین عملیات خشک کردن پاششی، به علت برخی از کشش‌های سطحی قرارگرفته در سوسپانسیون نسبت داد [۹].



شکل ۳-۲ تصاویر میکروسکوپی FESEM از پودرهای حاصل از خشک شدن پاششی و متشکل از مقادیر متفاوت از عامل اتصال دهنده (wt%) (a) ۰، (b) ۵، (c) ۱۰، (d) ۱۵ [۹].

۳-۲-۲ ترکیب فاز و میکروساختار پوشش‌های سد حرارتی نانوساختار پاششی

زنگ^۴ و همکارانش به بررسی پوشش‌های پاشش پلاسمایی از زیرکونیای نانوساختار پرداختند [۱۰]. در این مطالعه به منظور شناسایی فاز و تعیین اندازه دانه، الگوی دیفراکسیون مربوط به



شکل ۳-۳ الگوهای اشعه ایکس مربوط به (a) پودر ZrO_2 اولیه و (b) پوشش ZrO_2 پاششی [۱۰].

ناوانگ^۶ و همکارانش ضمن بررسی پوشش های پاشش پلاسمایی از زیرکونیای نانو ساختار، به بررسی تاثیر عملیات حرارتی بر مورفولوژی پوشش ایجاد شده پرداختند [۱۱]. شکل ۳-۴ میکروساختار پوشش زیرکونیایی نانو ساختار در سطح مقطع شکست را نشان می دهد. همانطور که از این تصویر مشخص است، دو نوع ساختار در پوشش وجود دارد: فاز پیوسته مذاب و میکروساختار سست (بی قاعده).

می توان مشاهده کرد که ساختار بسیار سست می باشد، و میکرو حفرات موجود در بین ذرات میکرونی اندازه ای معادل با نانوذرات دارند. این نوع ساختار خواص عایق حرارتی پوشش های سد حرارتی را افزایش خواهد داد.

جزئیاتی از خصوصیات میکروساختاری قبل و پس از انجام عملیات آنیل به کمک تصاویر میکروسکپ الکترونی روبشی از سطح پوشش رویی مورد بررسی قرار گرفت.

شکل ۳-۵ مورفولوژی پوشش های زیرکونیایی نانو ساختار در حالت پس از پاشش و بعد از ۱۵ ساعت عملیات حرارتی در دماهای متفاوت را نشان می دهد. همانطور که مشخص است میکروساختار پس از پاشش متشکل از نانو پودرها و میکرو حفراتی در بین نانو پودرها می باشد. اندازه نانو پودرها پس از آنیل در دماهای متفاوت برای مدت زمان ۱۵ ساعت افزایش یافته است [۱۱].

پودرهای اولیه و پوشش ایجاد شده بدست آمد و با استفاده از معادله شرر متوسط اندازه دانه فاز زمینه تخمین زده شد.

$$B_b(2\theta) = 0.9 \lambda / (D \cos^4(\theta)) \quad (1-3)$$

در رابطه مذکور D ابعاد میانگین کریستالیت، $B_b(2\theta)$ پهنای پیک در نصف ارتفاع ماکزیمم و نیز λ و θ ،

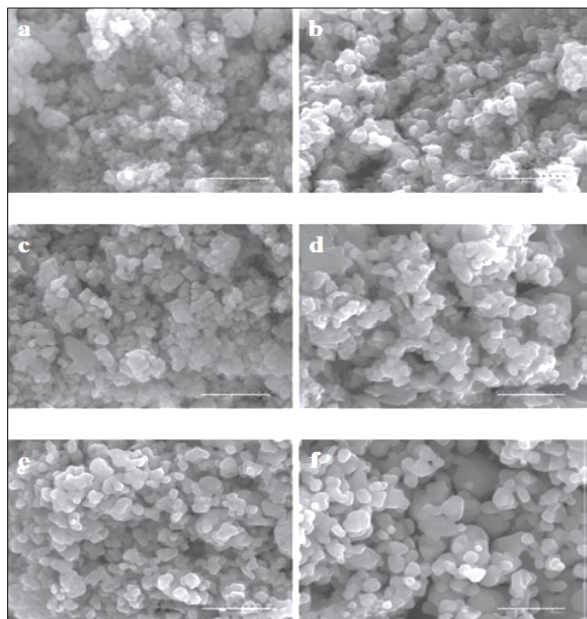
بترتیب دلالت بر طول موج اشعه ایکس و زاویه تفرق براگ دارند.

شکل ۳-۳ الگوهای دیفراکسیون اشعه ایکس مربوط به پودر و پوشش را پس از پاشش نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود، هیچ فاز جدید و نیز تفاوت آشکاری در شدت پیک های مربوط به پودر و پوشش در الگوی دیفراکسیون مربوط به آنها مشاهده نمی شود. پودر و پوشش هردو ترکیبی از تراگونال زیرکونیای خالص هستند، که فاز تعادلی در دمای متوسط می باشد. اگرچه، الگوی اشعه ایکس مربوط به پوشش نسبت به پودر از دو پیک بیشتر برخوردار است؛

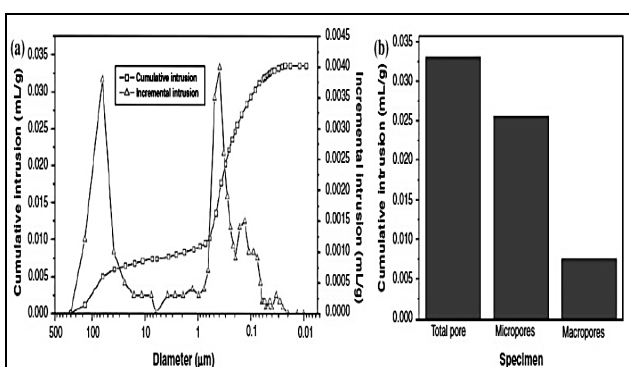
این امر اشاره به این نکته دارد که پوشش از ساختار کریستالی بهتری نسبت به پودر برخوردار است. همانطور که می دانیم، انجماد سریع با نرخ سرمایشی در حدود ۱۰۶ درجه کلون بر ثانیه در فرآیند پاشش پلاسمایی قابل دستیابی است، و منجر به ساختار دانه ریزی از رسوبات می گردد. بدیهی است که پیک های XRD مربوط به پوشش در مقایسه با پیک های مربوط به پودرهای اولیه باریک تر هستند، که نشان دهنده رشد دانه ها می باشد. با توجه به محاسبات صورت گرفته متوسط اندازه دانه پودرهای اولیه و پودر ایجاد شده بترتیب ۲۳ و ۸۹ نانومتر می باشد.

این نتیجه نشان می دهد که اگرچه رشد صورت گرفته است اما سرعت آن در جریان فرآیند پاشش پلاسمایی سریع نبوده و لذا پوشش کماکان نانو ساختار باقی مانده است [۱۰].

نظیر اندازه پودرها، فاصله پاشش، زاویه پاشش و ... وابسته است. تا حدودی، پودرهای ذوب نشده در پوشش نانوساختار به افزایش تعداد میکروحفرات کمک می‌کند [۱۲].



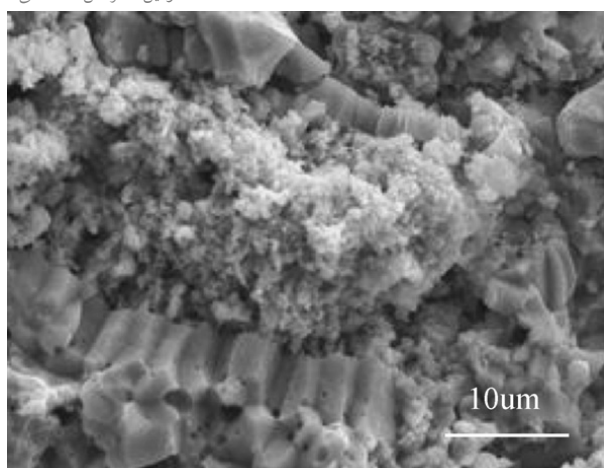
شکل ۳-۵ مورفولوژی سطح پوشش‌های نانو YSZ در دماهای متفاوت پس از عملیات حرارتی برای مدت ۱۵ ساعت: (a) حالت پس از پاشش (b) ۶۰۰°C (c) ۸۰۰°C (d) ۹۰۰°C (e) ۱۰۰۰°C (f) ۱۱۵۰°C [۱۱].



شکل ۴-۳ (a) توزیع تخلخل از پوشش زیرکونیای نانوساختار پس از پاشش و ترکیب کل تخلخل‌ها [۱۲].

۳-۲-۳ خواص مکانیکی

لیما^۹ و همکارانش در پژوهشی، به ارزیابی میکروسختی و مدول الاستیک پوشش‌های زیرکونیایی نانوساختار پاشش حرارتی پرداختند [۱۳]. برای این منظور آنها پودر آزمایشگاهی نانوساختار زیرکونیای به صورت جزئی پایدار شده با ایتریا را به کمک فرآیند



شکل ۳-۴ تصویر SEM از پوشش زیرکونیای پس از پاشش [۱۱].

در پژوهشی دیگر هانگ^۷ و همکارانش با ایجاد نمونه‌های ایستاده آزاد از طریق حذف زیرلایه به کمک محلول اسید هیدروکلریک و اندازه‌گیری میزان حفرات این نمونه‌ها به کمک روش نفوذ جیوه^۸، به بررسی توزیع اندازه حفرات در پوشش‌های سد حرارتی نانوساختار پاشش پلاسمایی پرداختند [۱۲].

تخلخل‌های سطحی و پیوسته اندازه‌گیری شده از پوشش زیرکونیایی نانوساختار ۱۳ درصد و متوسط قطر حفرات ۰/۳۵۲۴ میکرومتر است.

شکل ۳-۶ (a) توزیع تجمعی تخلخل‌های پوشش بوسیله تخلخل-

سنج نفوذی جیوه را نشان می‌دهد.

شکل ۳-۶ (b) ترکیب تخلخل‌ها براساس نتایج حاصل از اندازه-

گیری تخلخل‌ها در شکل ۳-۶ (a) را تشریح می‌کند.

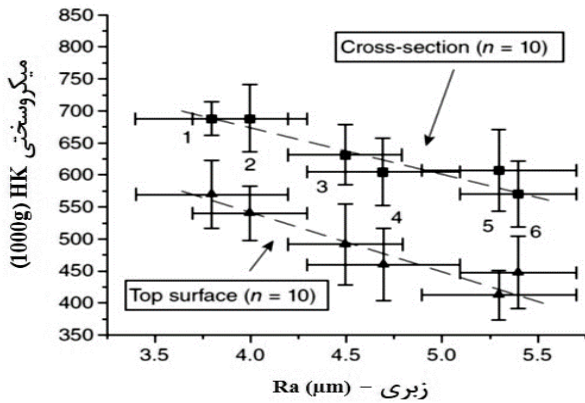
نتایج حاصل یک توزیع اندازه حفره دونماییه، شبیه به آنچه که در پوشش‌های زیرکونیای مرسوم مشاهده می‌شود را نشان می‌دهند. میکروحفرات در مقایسه با حفرات در ابعاد ماکرو مشارکت بیشتری در تخلخل کلی دارند. تخلخل‌های ظریف با قطری کمتر از یک میکرومتر، حاوی میکروتورک‌های درون‌اسپلت، شکاف‌های بین اسپلتی ناشی از چسبندگی کم و حفرات کوچک حاصل از ذرات ذوب نشده هستند.

یک موضع از میکروحفرات یا عیوب بزرگ با اندازه حتی تا ۱۰۰ میکرومتر در پوشش حضور دارند، که می‌تواند متناسب به ماکروحفراتی نظیر ترک‌های شاخه‌ای، حفرات بین‌لایه‌ای ناشی از چسبندگی نامناسب و حفرات کروی حاصل از گازهای حبس شده باشند. میزان تخلخل پوشش به صورت قابل توجهی به شرایط پاشش

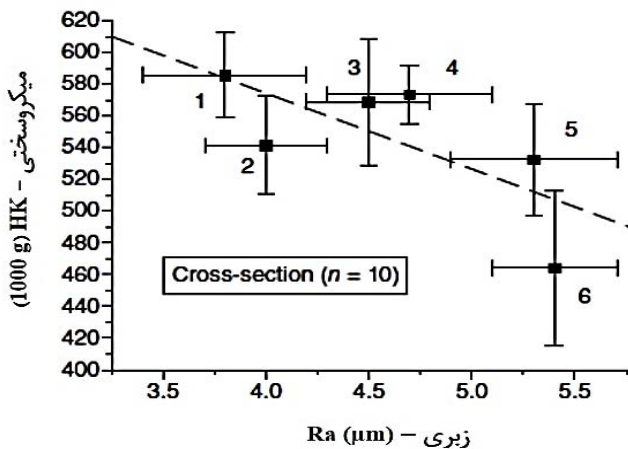
7. Hong Zhou

8. Mercury intrusion

9. Lima



شکل ۳-۷ ارتباط میکروسختی ویکرز - زبری (بار 1000g) برای حالت های متفاوت پارامترهای پاشش (جدول ۱-۳) [۱۳].



شکل ۳-۸ ارتباط میکروسختی Knoop - زبری (بار 1000g) برای حالت های متفاوت پارامترهای پاشش (جدول ۱-۳) [۱۳].

مقادیر مدول الاستیک و ارتباط آن با زبری در شکل ۳-۹ نشان داده شده است. باز هم همان روند مشاهده می شود: پوشش صاف تر، از میکروسختی Knoop و مدول الاستیک بیشتر برخوردار می باشد؛ خط چین در شکل های رسم شده برای درک بهتر این روند مشاهده می شود. مدول الاستیک در پارامترهای پاشش ۱ به ۴ اندکی تغییر کرده، جایی که توان پلاسما یکسان برای نرخ های H₂/Ar متفاوت و تفاوت 2 cm در فاصله پاشش اعمال شده است. این مشاهده تجربی مطابق با مدول الاستیک اندازه گیری شده پوشش های PSZ به کمک آزمون خمش چهار نقطه است، و نشان می دهد که پوشش های PSZ تغییر قابل توجهی را در میزان مدول الاستیک در نتیجه تغییر فاصله پاشش در دو سانتی متر ضمن توان پلاسما یکسان ارائه نمی دهند [۱۳].

پاشش پلاسمایی و با اعمال پارامترهای متفاوت پاشش که در جدول ۳-۱ نشان داده شده اند، بر روی زیرلایه فولادی رسوب دادند.

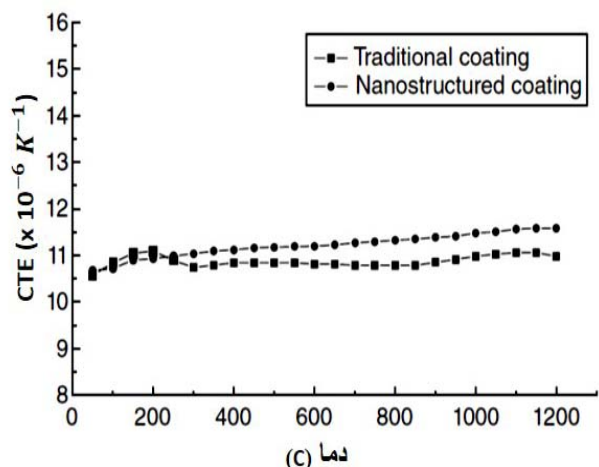
میکروسختی ویکرز اندازه گیری شده بر روی سطح مقطع و سطح بالایی و با بار اعمالی معادل 1000 g در شکل ۳-۷ نشان داده شده است. مقادیر اندازه گیری شده مربوط به سطح بالایی اندکی کمتر از مقادیر اندازه گیری شده مربوط به سطح مقطع هستند. مقادیر میکروسختی Knoop اندازه گیری شده با استفاده از بار اعمالی 1000g بر سطح مقطع در شکل ۳-۸ ارائه شده است.

مقادیر Knoop نسبت به مقادیر ویکرز تحت بار یکسان کمتر هستند. به علاوه اختلاف در مقادیر knoop نسبت به مقادیر ویکرز بیشتر می باشد. هر دو این عوامل نسبتاً مرتبط با تفاوت در هندسه فرورونده ها هستند که نیروهای متفاوتی را در زمینه پوشش ایجاد می کنند.

Parameters	Set 1	Set 2	Set 3	Set 4	Set 5	Set 6
Power (kW)	40	40	40	40	32	24
Current (A)	800	800	800	800	800	600
Voltage (V)	50	50	50	50	40	40
Ar flow plasma (slpm)	48	38	48	38	48	48
H ₂ flow plasma (slpm)	5	5	5	5	4	4
Ar flow carrier gas (slpm)	5	5	5	5	5	5
RPM-Hopper (%)	30	30	30	30	30	30
Spray distance (cm)	6	6	8	8	8	8

جدول ۳-۱ پارامترهای پاشش مورد استفاده برای پوشش های PSZ [۱۳]

با مشاهده ی شکل های ۳-۷ و ۳-۸ می توان نتایجی که در ادامه بیان می شوند را استخراج کرد. در محور Ra از چپ به راست، از پارامترهای پاشش ۱ به ۶، توان مشعل کاهش و فاصله پاشش افزایش می باشد. با کاهش توان مشعل پلاسما و دمای ذرات، سرعت آنها تمایل به قطره شدن خواهد داشت و از پخش بیشتر قطرات پاشیده شده ممانعت خواهد کرد.



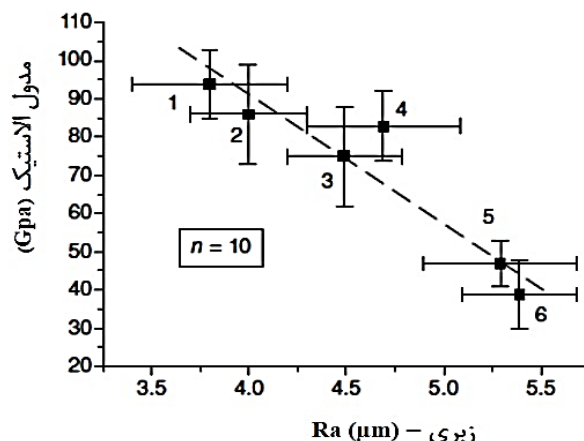
شکل ۳-۱۰ ضریب انبساط حرارتی پوشش نانوساختار زیرکونیم [۸].

نتیجه گیری:

پودرهای نانوساختار به وضوح راندمان رسوب دهی، استحکام چسبندگی و سختی پوشش ها را بهبود می دهند. نانوذرات به صورت مجزا بسیار ریز هستند و امکان استفاده از آنها برای پاشش پلاسمایی وجود ندارد و لذا در این شرایط بایستی پیش از پاشش ذرات ریز پراکنده تا ابعادی در حدود ۱۰۰-۳۰ میکرومتر آگلومره شوند. میکروساختار، چگالی و اندازه دانه پودرها تعیین کننده کیفیت پوشش حاصله است.

منابع:

- [۱] جبین جمالی، راحله احمدی پیمانی، رضا مظفری-تیا، شجاع رضوی، پوشش های سد حرارتی. دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ۱۳۹۳.
- [۲] Y. Zhao, "Evaluation and characterisation of thermal barrier coatings," phd thesis, University of Manchester, 2013.
- [۳] G. Mauer, M. O. Jarligo, D. E. Mack, and R. Vaßen, "Plasma-Sprayed Thermal Barrier Coatings: New Materials, Processing Issues, and Solutions," J. Therm. Spray Technol., vol. 22, no. 5, pp. 646-658, Feb. 2013.
- [۴] H. X. and H. Guo, Thermal barrier coatings. Woodhead Publishing Limited, 2011.
- [۵] G. Mauer, D. Sebold, R. Vaßen, and D. Stöver, "Improving Atmospheric Plasma Spraying of Zirconate Thermal Barrier Coatings Based on Particle Diagnostics," J. Therm. Spray Technol., vol. 21, no. 3-4, pp. 363-371, Nov. 2011.



شکل ۹-۳ ارتباط مدول الاستیک - زبری (بار 1000g) برای حالت های متفاوت پارامترهای پاشش [۱۳].

شکل ۳-۱۰ ضریب انبساط حرارتی پوشش زیرکونیایی نانوساختار را نشان می دهد. میانگین ضریب انبساط حرارتی پوشش های زیرکونیایی در چرخه حرارتی اولیه و چرخه حرارتی ثانویه از دمای اتاق تا دمای ۱۲۰۰ °C بترتیب ۱۱/۰ و ۱۰-۶ °C * ۱۱/۶ می باشد. ضریب انبساط حرارتی پوشش زیرکونیایی، ابتدا افزایش می یابد و سپس از دمای اتاق تا ۳۰۰ °C در چرخه حرارتی اول افزایش می یابد. این رفتار به پدیده از دست دادن اکسیژن در پوشش های سرامیکی ایجاد شده از طریق فرآیند پاشش پلاسمایی اتمسفری نسبت داده شده است.

هنگامیکه پوشش زیرکونیایی پس از پاشش و در شرایط اتمسفری تحت حرارت قرار می گیرد، اتم های اکسیژن مجدداً به تهی- جاهای پوشش افزوده می شوند. این پدیده در چرخه حرارتی ثانویه ناپدید می شود. در حین چرخه حرارتی ثانویه، ضریب انبساط حرارتی به صورت خطی با دما افزایش می یابد [۸].

- [۶] M. O. Jarligo, D. E. Mack, G. Mauer, R. Vaßen, and D. Stöver, "Atmospheric Plasma Spraying of High Melting Temperature Complex Perovskites for TBC Application," *J. Therm. Spray Technol.*, vol. 19, no. 1-2, pp. 303-310, Aug. 2009.
- [۷] M. O. Jarligo, G. Mauer, D. E. Mack, R. Vaßen, and D. Sto, "The Influence of Titania Doping on Plasma-Sprayed YSZ Thermal Barrier Coatings," in *Coatings Proceedings of the 25th International Conference on Surface Modification Technologies (SMT 25)*, 2012, vol. 2011, no. Smt 25.