



## ارزیابی مقاومت به شوک حرارتی پوشش سد حرارتی YSZ نانو ساختار پاشش پلاسمایی شده

موسی پوربافرانی<sup>۱</sup>، سعیدرضا بخشی<sup>۲</sup>، رضا شجاع رضوی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>. اصفهان، شاهین شهر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، دانشکده مهندسی مواد (دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مواد)

<sup>۲</sup>. اصفهان، شاهین شهر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، دانشکده مهندسی مواد (استادیار)

<sup>۳</sup>. اصفهان، شاهین شهر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، دانشکده مهندسی مواد (دانشیار)

### چکیده

امروزه تولید پوشش های نانو ساختار زمینه ی جدیدی را در صنعت پاشش حرارتی ایجاد کرده است. توسعه ی پوشش های نانو ساختار YSZ می تواند باعث بهبود کارایی پوشش های سد حرارتی، به دلیل ضریب هدایت حرارتی کم، ضریب انبساط حرارتی بالا و خواص مکانیکی عالی این نوع پوشش ها شود. هدف از این پژوهش بررسی ریزساختار و رفتار شوک حرارتی پوشش های سد حرارتی پاشش پلاسمایی شده نانو ساختار می باشد. بدین منظور، نانو پودر YSZ سنتز شده به روش سل-ژل پلیمری، به روش پاشش خشک آگلومره شد. سپس پوشش سد حرارتی، ابتدا با آستری NiCrAlY و سپس با پودرهای YSZ نانو ساختار آگلومره شده روی سوپرآلیاژ پایه نیکل اینکونل ۷۳۸ به کمک فرایند پاشش پلاسمایی اتمسفری رسوب داده شد. آزمون شوک حرارتی به صورت قرارگیری نمونه ها در دمای  $1000^{\circ}\text{C}$  به مدت ۱۰ دقیقه و کوئچ مستقیم در آب انجام گرفت. به منظور تعیین کانیزم شکست ناشی از شوک حرارتی، بررسی ریزساختاری توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (FESEM)، آنالیز عنصری به کمک طیف سنجی تفکیک انرژی (EDS) و آنالیز فازی توسط پراش پرتو ایکس (XRD) انجام گرفت. نتایج نشان داد مقاومت به شوک حرارتی پوشش سد حرارتی YSZ نانو ساختار نسبت به پوشش متداول به دلیل مدول الاستیک کمتر و تطبیق پذیری کرنشی بیشتر می باشد.

**واژه های کلیدی:** پوشش سد حرارتی نانو ساختار، پاشش پلاسمایی اتمسفری، شوک حرارتی، YSZ.

## مقدمه

پوشش‌های سد حرارتی<sup>۱</sup> (TBCs) از جمله پوشش‌های محافظ هستند که وظیفه کاهش دمای اجزاء و در نتیجه افزایش طول عمر آن‌ها را بر عهده دارند. این پوشش‌ها اصولاً ترکیبی از پوشش‌های چند لایه هستند که هر لایه ملزومات و وظیفه خاصی دارد. لایه رویی، عایق حرارتی بوده و شامل یک سرامیک با هدایت حرارتی پایین می‌باشد. این لایه معمولاً از جنس زیرکینا ( $ZrO_2$ ) است. لایه عایق سرامیکی توسط یک لایه فلزی میانی که به آن آستری گفته می‌شود، روی آلیاژ زیرلایه رسوب داده می‌شود. این پوشش فلزی یا یک آلومیناید نفوذی، مثل آلومیناید پلاتین، یا یک پوشش روکشی<sup>۲</sup> با ترکیب عمومی  $MCrAlY$  است. در طول رسوب‌دهی پوشش سرامیکی و سرویس‌دهی، اکسید روینده حرارتی<sup>۳</sup> (TGO)، که عمدتاً  $Al_2O_3$  است، روی سطح آستری و در فصل مشترک آستری-پوشش رویی تشکیل می‌شود. این اکسید اغلب نقش مهمی در چسبندگی لایه سرامیکی به آستری دارد. بنابراین پوشش‌های سد حرارتی، سیستم‌هایی شامل پوشش رویی سرامیکی، اکسید روینده حرارتی و لایه آستری فلزی روی آلیاژ زیرلایه هستند [۲و۱].

پوشش‌های سد حرارتی امروزی، به وسیله دو فرایند پاشش پلاسمایی اتمسفری<sup>۴</sup> (APS) و رسوب فیزیکی بخار به کمک پرتو الکترونی<sup>۵</sup> (EB-PVD) رسوب داده می‌شوند. به دلیل هزینه‌های بسیار بالاتر فرایند رسوب فیزیکی بخار، فرایند پاشش پلاسمایی مقبولیت بیشتری پیدا کرده است [۳]. در فرایند پاشش پلاسمایی، از انرژی حرارتی یک جت پلاسما برای ذوب و پرتاب مواد با سرعت بالا روی زیرلایه استفاده می‌شود. ذرات زیرکینای تریق شده به داخل پلاسما، در طی عبور از آن، ذوب می‌شوند (ذرات بزرگتر ممکن است به صورت جزیی ذوب شده و یا اصلاً ذوب نشوند). ذرات ذوب شده به سطح زیرلایه برخورد می‌کنند. این ذرات به وسیله نیروی ضربه‌ای، پهن شده و به صورت اسپلت، با سرعت سرد شدن فوق‌العاده زیاد،  $10^6$  K/s، منجمد می‌گردند. ریزساختار پوشش پاشش پلاسمایی شده شامل شبکه‌ای از ریزترک‌ها و تخلخل‌ها است. مجموعه‌ای از این ریزترک‌ها و تخلخل‌ها موازی سطح زیرلایه و ناشی از اتصال ضعیف بین اسپلت‌های رسوب‌یافته هستند. این ریزترک‌ها و تخلخل‌ها، ناپیوستگی‌هایی را عمود بر شار حرارتی ایجاد کرده و به طور موثری مانع انتقال حرارت می‌شوند. ریزترک‌های عمود بر سطح پوشش ناشی از ترک خوردگی اسپلت‌های منفرد (به علت تنش‌های حرارتی تولید شده در حین سرمایش) می‌باشد [۴و۵].

امروزه توسعه پوشش‌های نانو ساختار YSZ می‌تواند باعث بهبود کارایی پوشش‌های سد حرارتی، به دلیل استحکام چسبندگی خوب، ضریب هدایت حرارتی کم، ضریب انبساط حرارتی بالا و خواص مکانیکی عالی این نوع پوشش‌ها شود. از این رو ساخت پوشش نانو ساختار YSZ برای هدف رسیدن به خواص مقاومت به سیکل‌های حرارتی، اکسیداسیون و خوردگی داغ بیشتر و کاهش نفوذپذیری حرارتی ضروری به نظر می‌رسد.

<sup>۱</sup>. Thermal Barrier Coatings

<sup>۲</sup>. Overlay Coating

<sup>۳</sup>. Thermally Grown Oxide

<sup>۴</sup>. Atmospheric Plasma Spray

<sup>۵</sup>. Electron Beam Physical Vapor Deposition

## مواد و روش تحقیق

در این پژوهش از سوپرآلیاژ پایه نیکل اینکونل ۷۳۸ (IN ۷۳۸) به عنوان زیرلایه استفاده شد. ترکیب شیمیایی این آلیاژ در جدول ۱ آورده شده است. نکته قابل توجه در مورد سوپرآلیاژ اینکونل ۷۳۸، ترکیب استحکام دمایی بالا و مقاومت به خوردگی داغ آن می باشد. تعادل این دو خاصیت برای کاربردهای توربین های گازی بهینه شده است [۱]. سپس نمونه های آزمایش به کمک دستگاه برش سیم<sup>۱</sup> به ابعاد  $15 \times 15 \times 10$  mm بر دیده و سپس سطح نمونه ها چربی زدایی و زنگ زدایی شد<sup>۲</sup> از پودر فلزی NiCrAlY با توزیع اندازه ذره  $50 - 40 \mu m$  به عنوان منبع تغذیه آستری در فرایند پاشش پلاسمایی اتمسفری استفاده شد. شکل ۱ تصویر میکروسکپی الکترونی روبشی این پودر را نشان می دهد. نانوپودر YSZ به روش سل-ژل پلیمری به صورت انبوه تولید (شکل ۲) و سپس به کمک فرایند خشک کردن پاششی به صورت گرانوله های نانو ساختار میکرواندازه (شکل ۳) تجدید ساخت شد. برای انجام فرایند پوشش دهی، از دستگاه پاشش پلاسمایی اتمسفری (APS) پلازما تکنیک<sup>۲</sup> مدل A-3000S موجود در دانشگاه صنعتی مالک اشتر تهران استفاده شد. این دستگاه مجهز به تفنگ F4-MB و سیستم تزریق پودر ۲-10 Twin ساخت شرکت سولزر-متکو<sup>۳</sup> است. ترکیبی از گازهای آرگون و هیدروژن به عنوان گاز کار برای تشکیل پلازما به کار گرفته شد. هم چنین برای انتقال ذرات پودری از منبع تغذیه پودر به مشعل پلازما، از گاز آرگون به عنوان گاز حامل استفاده شد. به منظور افزایش چسبندگی پوشش و به دست آوردن سطحی با پستی و بلندی کافی، قبل از انجام فرایند پوشش دهی، سطح زیرلایه به کمک عملیات ذره پاشی توسط ذرات آلومینا با مش ۳۶، زاویه برخورد ۹۰ درجه، تحت فشار ۴ bar و فاصله ۲۰ cm خشن گردید. این پارامترها در جدول ۲ آورده شده است.

آزمون شوک حرارتی، با استفاده از یک کوره الکتریکی همدمای هواساکن (Nabertherm Nv/H) انجام گرفت. برای این منظور، با رسیدن دمای کوره به  $1000^\circ C$ ، نمونه ها داخل کوره قرار دادند. پس از ده دقیقه گرمایش در این دما، نمونه ها به طور مستقیم در آب کویچ شدند. دمای آب در طی سیکل بین  $25 - 20^\circ C$  بود. پس از کویچ، به منظور برطرف کردن رطوبت سطحی نمونه ها، از خشک کن برقی استفاده شد. در ادامه، نمونه ها برای انجام سیکل بعدی مجدداً داخل کوره قرار دادند. پس از هر چند سیکل، وزن نمونه ها با استفاده از ترازوی دیجیتال مدل Salorius Analytic با دقت چهار رقم اعشار اندازه گیری شد. ورقه ورقه شدن بیش از ۲۰ درصد از سطح کل پوشش به عنوان معیار شکست در نظر گرفته شد.

تصاویر میکروسکپی الکترونی روبشی، به کمک دستگاه میکروسکپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) هیتاچی<sup>۴</sup> مدل S-4160 و دستگاه میکروسکپ الکترونی روبشی (SEM) وگا<sup>۵</sup> تهیه شد. به منظور

<sup>۱</sup>. Wire cut

<sup>۲</sup>. Plasma-Technik AG; Switzerland

<sup>۳</sup>. Sulzer-Metco; Switzerland

<sup>۴</sup>. Hitachi

<sup>۵</sup>. Wega

آنالیز عنصری، از طیف‌سنجی تفکیک انرژی (EDS) با استفاده از دستگاه سانگ و<sup>۱</sup> مدل ۵۵۰i نصب شده روی میکروسکپ الکترونی روبشی سرون تکنولوژی<sup>۲</sup> مدل AIS-۲۱۰۰ با منبع تأمین الکترون کاتد گرم توسط رشته تنگستنی، استفاده شد. به منظور شناسایی فازها، از دستگاه پراش سنج پرتو ایکس بروکر مدل D۸ ADVANCE با فیلتر نیکلی و آند مسی با طول موج (Cu K $\alpha$ ) ۱٫۵۴۰۶ A، با ولتاژ ۴۰ kV و جریان ۴۰ mA استفاده شد. فازشناسی الگوهای پراش سنجی پرتو ایکس توسط نرم‌افزار X'Pert HighScore انجام شد. به منظور تعیین زبری سطح پوشش‌های پاشش پلاسمایی شده از دستگاه اتوماتیک میتوتویو<sup>۳</sup> مدل SJ-۲۰۱P استفاده شد.

### نتایج و بحث

شکل ۴ تصویر میکروسکپی الکترونی روبشی از سطح مقطع پولیش شده سیستم سد حرارتی پاشش پلاسمایی شده را نشان می‌دهد. قسمت‌های مختلف سیستم پوشش سد حرارتی شامل زیرلایه سوپرآلیاژی، آستری NiCrAlY و پوشش رویی YSZ به خوبی در شکل مشخص است. با توجه به نتایج به دست آمده از ارزیابی ضخامت‌سنجی به کمک ریزساختار مقطع پولیش شده پوشش، ضخامت نسبی آستری و پوشش رویی به ترتیب برابر  $20 \pm 135$  و  $25 \pm 360$  میکرون می‌باشد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، فرایند پاشش پلاسمایی به صورت مطلوب انجام شده است؛ به نحوی که لایه‌های پوشش از یکنواختی مطلوب با توزیع تخلخل مناسب برخوردارند و هیچ‌گونه ناپوستگی در پوشش مشاهده نمی‌شود. سطح پوشش رویی و فصل مشترک‌های پوشش رویی/آستری و آستری/زیرلایه، زبر است. زبری فصل مشترک آستری/زیرلایه به دلیل ذره‌پاشی شدن سطح زیرلایه است، اما زبری فصل مشترک آستری/پوشش رویی و سطح پوشش رویی از خواص پوشش‌های پاشش پلاسمایی شده می‌باشد.

نمای سطح رویی پوشش رویی سرامیکی YSZ در شکل ۵ نشان داده شده است. این شکل آخرین لایه منجمد شده در فرایند پاشش پلاسمایی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، این لایه حاوی اسپلت‌هایی است که با درجه پهن‌شدگی متفاوت روی سطح، رسوب کرده‌اند. بر اساس این شکل، در سطح این پوشش علاوه بر اسپلت‌ها، حضور ذرات پودری به طور جزئی ذوب شده یا ذوب نشده نانومتری (شکل ۵-ب) نیز مشاهده می‌شود. عدد زبری این پوشش (Ra) ۸٫۶ میکرون به دست آمد. زبری سطح این پوشش در مقایسه با پوشش‌های سد حرارتی متداول (حدود ۷ میکرون [۵]) بیشتر است. دلیل این امر آن است که ذرات به طور جزئی ذوب شده با برخورد به سطح با درجه پهن‌شدگی کم‌تری در مقایسه با ذرات کاملاً ذوب شده روی سطح می‌نشینند [۵]. بنابراین، از آنجایی که پوشش نانو ساختار حاوی کسر بالایی از ذرات به طور جزئی ذوب شده است، زبری نسبتاً بالاتری را در مقایسه با پوشش‌های متداول نشان می‌دهد.

<sup>۱</sup>. Sung Woo

<sup>۲</sup>. Seron Technology

<sup>۳</sup>. Mitutoyo; Japan

سطح مقطع شکست پوشش YSZ پاشش پلاسمایی شده در شکل ۶ نشان داده شده است. همان طور که در شکل ۶-الف مشاهده می‌شود، پوشش دارای ساختار لایه‌ای و شامل اسپلت‌های دانه ستونی، حفرات و ترک‌های بین اسپلتی و درون اسپلتی است. بر اساس این شکل، ریزساختار پوشش شامل دو ساختار متمایز است. یکی ناحیه کاملاً ذوب شده که شامل بخش کاملاً ذوب شده پودرهای نانوساختار آگلومره شده زیرکنیایی است. مشخصه اصلی این ناحیه، ساختار کریستالی دانه ستونی است. دانه‌های ستونی تا حدود چند میکرون در خلاف جهت انتقال حرارت رشد کرده‌اند. ساختار دیگر به صورت ناحیه ذوب نشده یا به طور جزئی ذوب شده است که شامل جزء ذوب نشده یا به طور جزئی ذوب شده پودر نانوساختار آگلومره شده زیرکنیایی است. شکل ۶-ب تصویر بخش ذوب نشده پوشش را در بزرگنمایی بالاتر نشان می‌دهد. می‌توان مشاهده کرد که ریخت این ناحیه، مشابه ریخت پودرهای نانوساختار آگلومره شده اولیه است. در این ساختار، ذرات بسیار کوچک با اندازه کمتر از ۱۰۰ نانومتر به خوبی قابل مشاهده است. حضور این ذرات نانواندازه در پوشش، نانوساختار بودن آن را اثبات می‌کند. نواحی مشابه آن چه در شکل ۶-ب نشان داده شده است، به "نانو نواحی" موسومند. این نانو نواحی حاوی کسر حجمی بالایی از تخلخل‌هایی با اندازه‌های چند ده تا چند صد نانومتر هستند. بنابراین پوشش سد حرارتی نانوساختار پاشش پلاسمایی شده یک ریزساختار پیچیده منحصر به فرد دونمایه شامل زمینه حاصل از انجماد مجدد بخش ذوب شده پودر و ذرات نانواندازه باقیمانده از پودر (نانو نواحی) را نشان می‌دهند.

الگوی پراش پرتو ایکس از سطح نمونه پوشش YSZ پاشش پلاسمایی شده در شکل ۷ نشان داده شده است. بر این اساس، پوشش تنها حضور فاز تتراگونال استتال ناپذیر زیرکنیا را نشان می‌دهد؛ چرا که بخش ذوب شده پودر در طی سرمایش شدید، فاز t' را تشکیل می‌دهد و بخش ذوب نشده پودر، فاز t' را حفظ کرده است. شکل ۸ تصاویر میکروسکوپی نمونه YSZ نانوساختار را در طی آزمون شوک حرارتی نشان می‌دهد. بر اساس این تصاویر، شکست پوشش به صورت لایه لایه شدن<sup>۱</sup> از وسط نمونه آغاز و در طی سیکل‌های بعدی به نواحی لبه نمونه گسترش یافته است. از سیکل ۴۷۵ به بعد به خاطر اثرات لبه، پوشش از لبه نیز شروع به ورقه ورقه شدن<sup>۲</sup> کرده است. نمودار تغییرات وزن بر حسب تعداد سیکل برای نمونه YSZ نانوساختار در طی آزمون شوک حرارتی در شکل ۹ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود تا ۳۶۵ سیکل افزایش وزن مشاهده می‌شود. از سیکل ۳۶۵ تا ۵۳۷ کاهش تدریجی وزن نمونه مشاهده می‌شود. بنابراین مکانیزم غالب شکست از نوع دلمینیشن (لایه لایه شدن پوشش رویی) است. شکل ۱۰ تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از سطح مقطع عرضی پوشش سد حرارتی را پس از ۵۳۷ سیکل نشان می‌دهد. همان گونه که ملاحظه می‌شود، از ۳۶۰ میکرون ضخامت اولیه پوشش، فقط ۲۰۰ میکرون باقی مانده است. هم‌چنین ترک افقی پیش‌رونده در پوشش رویی دیده می‌شود، لذا، شکست سیستم TBC ابتدا به واسطه لایه لایه شدن پوشش رویی و در نهایت به صورت ورقه ورقه

<sup>۱</sup>. Delamination

<sup>۲</sup>. Spallation

شدن پوشش رویی اتفاق افتاده است. هم‌چنین در شکل ۱۰، اکسید روینده حرارتی نیز (TGO) مشاهده می‌شود که این لایه نیز به شکست زودتر نمونه کمک می‌کند. شکل ۱۱ الگوی پراش پرتو ایکس از سطح پوشش اولیه YSZ را پس از تحمل ۵۳۷ سیکل نشان می‌دهد؛ بر اساس این الگو، همانند شرایط پس از پاشش، پوشش YSZ حاوی فاز تراگونال استحاله ناپذیر می‌باشد. عدم حضور فاز منوکلینیک زیر کونیا در پوشش، نشان می‌دهد که استحاله فازی تراگونال به منوکلینیک در طی آزمون شوک حرارتی انجام نگرفته است. این الگو، هم‌چنین حضور اکسید زیرکسیم کلسیم ( $\text{CaZrO}_3$ ) را در سطح پوشش نشان می‌دهد که دلیل آن، واکنش زیرکسیم با کلسیم موجود در آب در طی سرمایش سریع نمونه‌ها است. شدت بالای پیک‌های مربوط به این اکسید و در نتیجه حضور زیاد آن در سطح پوشش نانوساختار نسبت به پوشش متداول [۶] به دلیل تحمل تعداد سیکل بیشتر پوشش نانوساختار است. تحقیقات نشان می‌دهد که اکسیداسیون آستری و تنش‌های حرارتی، فاکتورهای اصلی تخریب پوشش‌های سد حرارتی در طی سیکل حرارتی هستند. مطالعات نشان می‌دهد که عدم انطباق ضریب انبساط حرارتی بین پوشش رویی سرامیکی و بخش‌های فلزی سیستم، منجر به ایجاد تنش در پوشش می‌شود [۷-۱۰]. با قرارگیری پیوسته پوشش در شرایط سیکل حرارتی، این تنش‌ها می‌تواند منجر به جوانه‌زنی و رشد ترک در پوشش شود. پیوستن این ترک‌ها به یکدیگر و انتشار آن‌ها در پوشش رویی به موازات فصل مشترک، در نهایت موجب ورقه‌ورقه شدن پوشش خواهد شد. بنابراین، تنش‌های ناشی از عدم انطباق ضرایب انبساط حرارتی، عامل اصلی ورقه‌ورقه شدن پوشش سد حرارتی است. این مکانیزم، در تحقیقات دیگر نیز به عنوان مکانیزم شکست ناشی از سیکل حرارتی برای پوشش‌های سد حرارتی پاشش پلاسمایی شده پیشنهاد شده است [۵۵]. نتایج منحنی کاهش وزن (شکل ۹)، الگوی پراش اشعه ایکس (حضور مقدار زیاد ترکیب  $\text{CaZrO}_3$ ) و تصاویر میکروسکوپی (شکل ۸) و میکروسکوپ الکترونی پوشش اصلاح شده (شکل ۱۰) بعد از آزمون شوک نشان می‌دهد که مکانیزم شکست این پوشش ترکیبی از ورقه‌ورقه شدن<sup>۱</sup> و لایه لایه شدن<sup>۲</sup> است.

مقایسه نتایج شوک حرارتی این پژوهش (پوشش نانوساختار) با پوشش متداول YSZ (۳۶۰ سیکل [۱۱]) نشان می‌دهد که پوشش نانوساختار تعداد سیکل بیشتری را تحمل کرده است این امر ناشی از مدول الاستیک پایین‌تر و در نتیجه تطبیق‌پذیری کرنشی بالاتر پوشش نانوساختار در مقایسه با پوشش متداول است. ویژگی‌های ریزساختاری پوشش نانوساختار، این خاصیت را توجیه می‌کند. مطالعات نشان می‌دهد که تداخل‌ها و شبکه ریزترک‌ها، مدول الاستیک پوشش را کاهش داده و سبب افزایش تطبیق‌پذیری کرنشی می‌شوند. این امر، بهبود طول عمر شکست پوشش سد حرارتی را در پی خواهد داشت [۱۱].

### نتیجه‌گیری

(۱) پوشش سد حرارتی نانو ساختار پاشش پلاسمایی شده دارای یک ریزساختار دوگانه شامل دانه‌های

<sup>۱</sup>. Spallation

<sup>۲</sup>. Delamination

پانزدهمین سمینار ملی مهندسی سطح

میکروستونی شکل یافته از انجماد بخش ذوب شده پودر و ذرات نانو اندازه باقیمانده از پودر (نانو نواحی) می باشد.

(۲) مقاومت به شوک حرارتی پوشش سد حرارتی YSZ نانو ساختار نسبت به پوشش متداول به دلیل مدول الاستیک کمتر و تطبیق پذیری کرنشی بیشتر می باشد.

### تشکر و قدردانی

از تمام کسانی که ما را در انجام این تحقیق یاری کردند، به ویژه مسئولان آزمایشگاه‌های دانشگاه صنعتی مالک اشتر اصفهان و دکتر ضیاء والفی، قدردانی می شود.

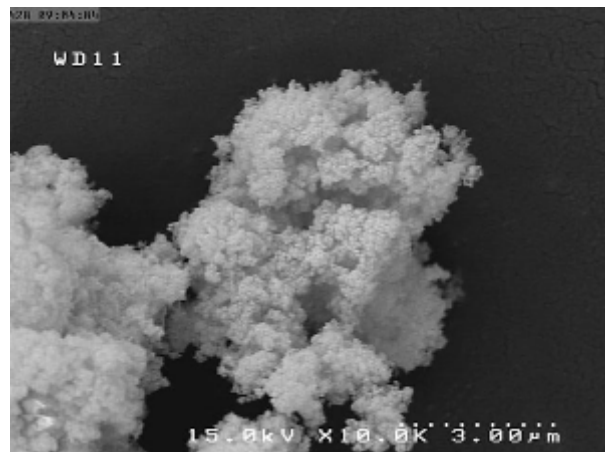
### مراجع

- [1] M.P., Boyce, "Gas Turbine Engineering Handbook", Third Edition, Gulf Professional Publishing, USA, 0. .4
- [0] R.A., Miller, "Current status of thermal barrier coatings", Surface & Coating Technology, 1., #/765, /+0.#
- [1] D.W., Richerson, "Modern Ceramic Engineering: Properties", Processing and Use in Design", CRC Press Taylor & Francis Group, Third Edition, 0. .4. #
- [2] W.B., Gong, C.K., Sha, D.Q., Sun, W.Q., Wang, "Microstructures and thermal insulation capability of plasma-sprayed nanostructured ceria stabilized zirconia coatings", Surface & Coatings Technology, 0., 0. .4, 1/.7+1//3.#
- [3] H.Jamali, R.Shoja-Razavi, R. Mozafarinia, R.Ahmadi-Pidani, and M.R. Loghman-Estarki, "Fabrication and Evaluation of Plasma-Sprayed Nanostructured and Conventional YSZ Thermal Barrier Coatings", Current Nanoscience, 6, 0./0, 2.0+2.7.
- [4] Khan,A. N. Lu J., "Manipulation of Air Plasma Spraying Parameters for the Production of Ceramic Coatings", journal of materials processing technology, 0.7, 0. .7, 03.6-03/2.
- [5] Z. Zhang, J. Kameda, S. Sakurai, M. Sato, Through-thickness dependence of in-plane cracking behavior in plasma-sprayed thermal barrier coatings, Metallurgical and Materials Transactions A, 14 0. .3, /62/+632.
- [6] H.L. Tsai, P.C. Tsai, Performance of laser-glazed plasma-sprayed( $ZrO_2+0wt.\%Y_{0.1}$ )/(Ni+00wt.%Cr+/.wt.%Al/wt.%Y) thermal barrier coatings in cyclic oxidation tests, Surface and Coatings Technology, 5/, /773, 31+37.
- [7] R.V. Hillery, Coatings for high-temperature structural materials: trends and opportunities, National Academy Press, USA, /774.
- [/.] T.S. Hille, A.S.J. Suiker, S. Turteltaub, Microcrack nucleation in thermal barrier coating systems, Engineering Fracture Mechanics 54, 0. .7, 6/1+603.
- [25] H. Jamali, R. Mozafarinia, R. Shoja-Razavi, R. Ahmadi-Pidani, "Comparison of thermal shock resistances of plasma-sprayed nanostructured and conventional yttria stabilized zirconia thermal barrier coatings", Ceramics International, 16, 0./0, 45.3+45/1.#

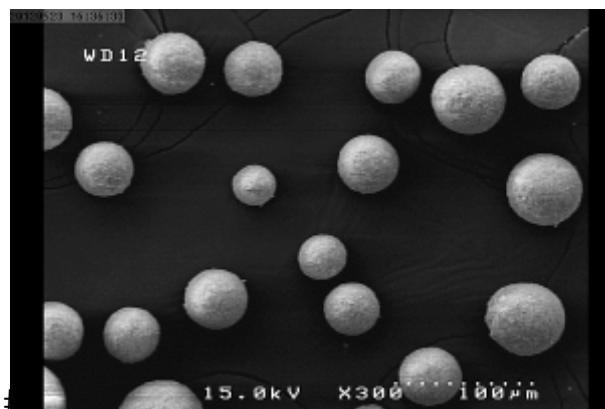




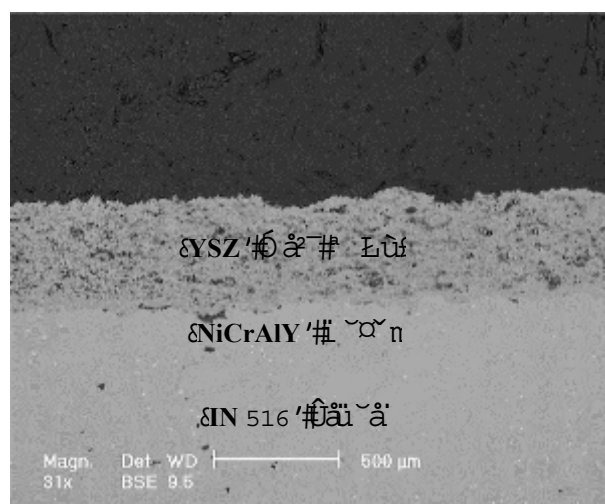
پانزدهمین سمینار ملی مهندسی سطح



شکل ۲: تصویر میکروسکپی الکترونی روبشی گسیل میدانی (FE-SEM) از نانوپودر YSZ با شرایط تولید انبوه.

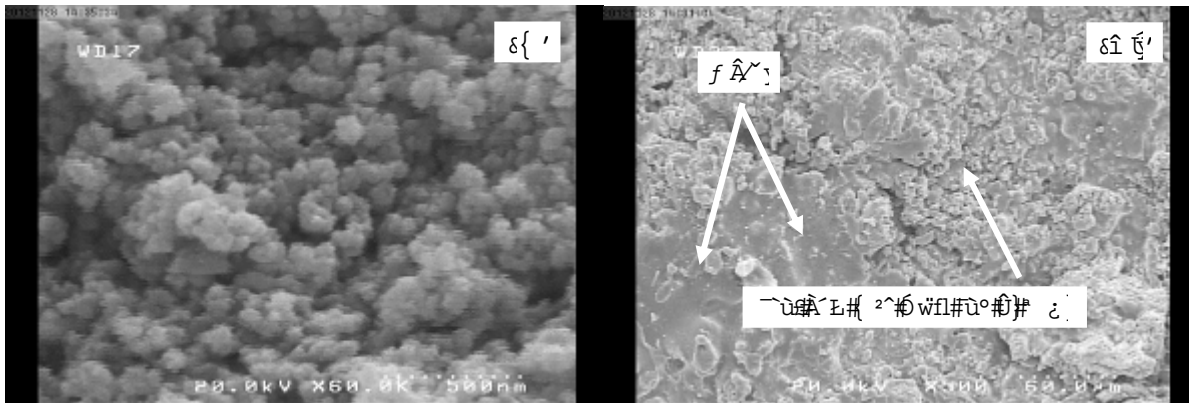


شکل ۳: تصویر میکروسکپی الکترونی روبشی گسیل میدانی از گرانول‌های نانوساختار YSZ.

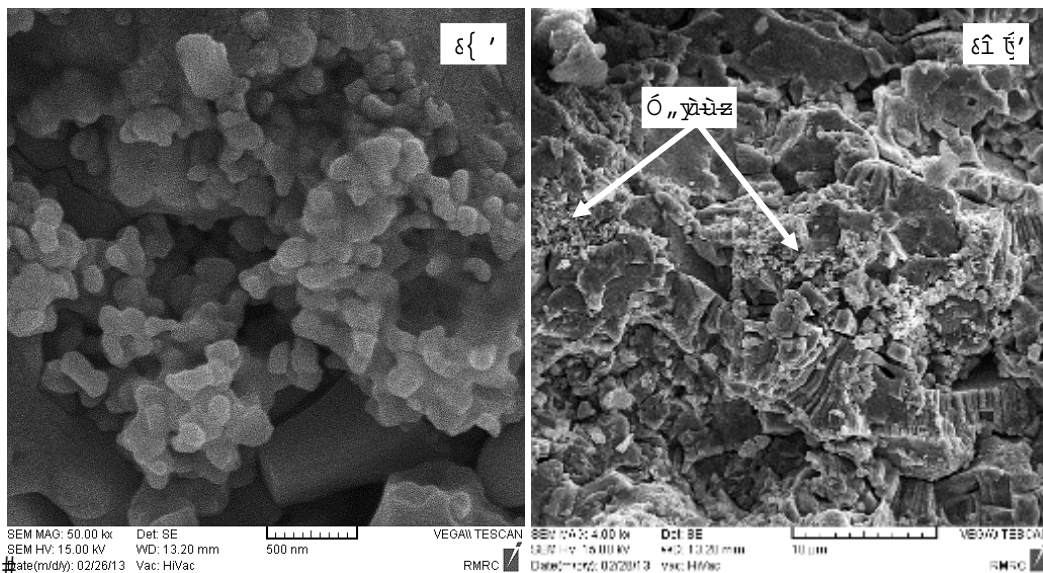


شکل ۴: تصویر میکروسکپی میکروسکپی الکترونی روبشی از سطح مقطع پولیش شده سیستم حرارتی

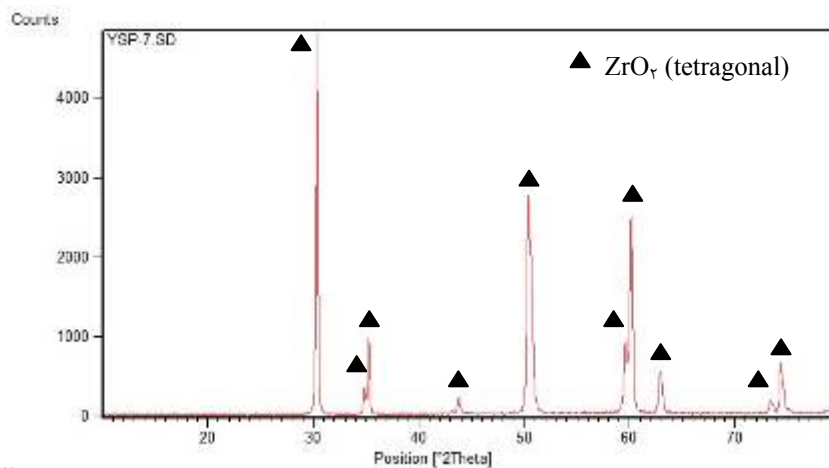
ارزیابی مقاومت به شوک حرارتی پوشش سد حرارتی ...



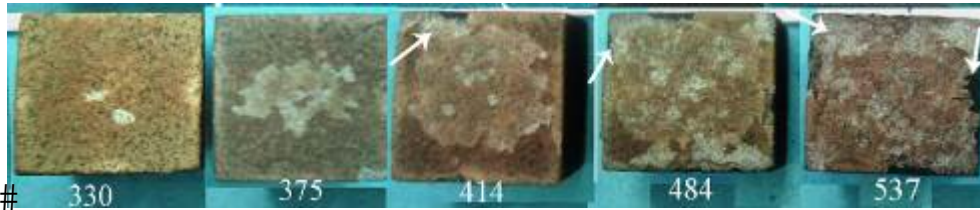
شکل ۵: تصویر میکروسکپی الکترونی روبشی گسیل میدانی الف) سطح رویی پوشش YSZ نانو ساختار و ب) بخش به طور جزئی ذوب شده در تصویر الف.



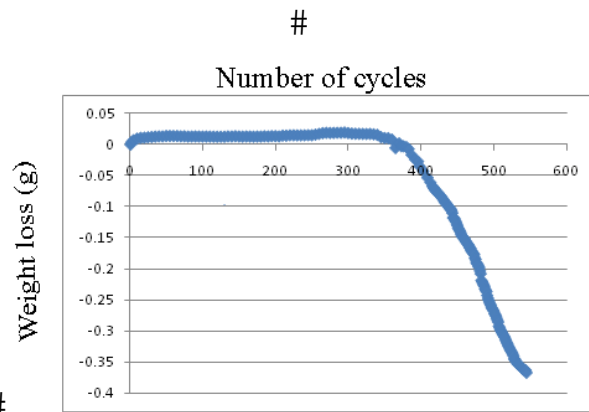
شکل ۶: تصویر میکروسکپی الکترونی روبشی از الف) سطح مقطع شکست پوشش YSZ پاشش پلاسمایی شده و ب) نانوذرات ذوب نشده (نانو نواحی) موجود در پوشش.



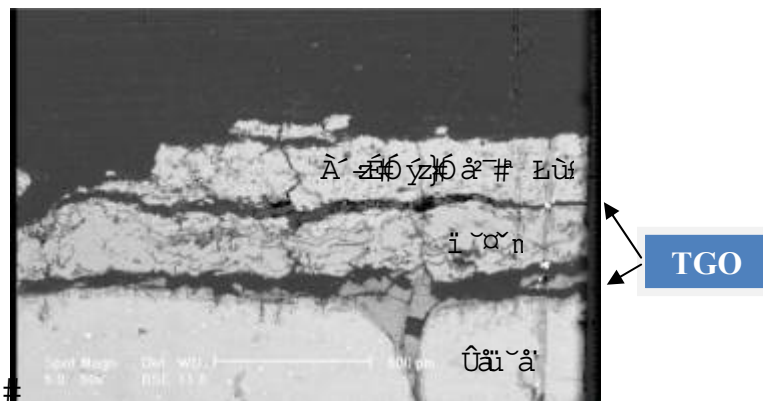
شکل ۷: الگوی پراش پرتو ایکس پوشش YSZ پاشش پلاسمایی شده.



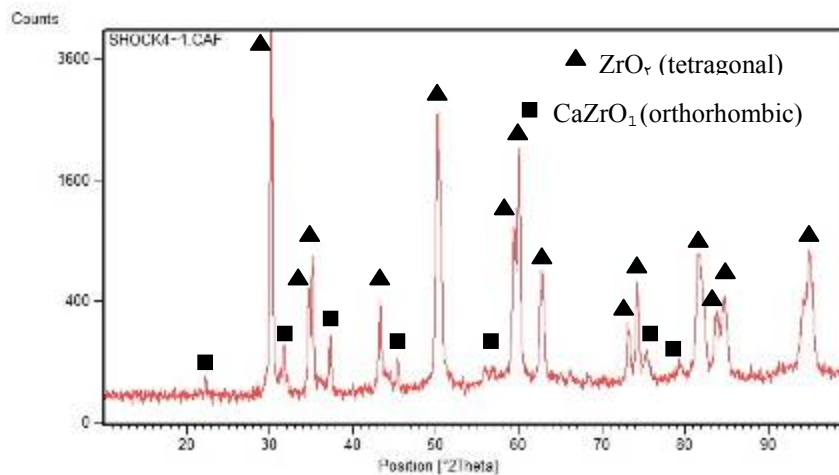
شکل ۸: تصویر ماکروسکوپی نمونه‌های YSZ نانوساختار پس از تحمل سیکل‌های مختلف در آزمون شوک حرارتی.



شکل ۹: نمودار افزایش / کاهش وزن بر حسب تعداد سیکل در طول آزمون شوک حرارتی.



شکل ۱۰: تصویر SEM از سطح مقطع عرضی پوشش YSZ بعد از آزمون شوک حرارتی.



شکل ۱۱: الگوی پراش پرتو ایکس از سطح پوشش YSZ پس از آزمون شوک