فصلنامه سرامیک ایران

عملکرد پوشش‌های سد حرارتی نانوساختار در شرایط شوک حرارتی

افشین آشفته

استادیار مهندسی مکانیک ساخت و تولید، مرکز آموزش عالی محلات

چکیده: *پوشش‌های سد حرارتی جزء جدایی‌ناپذیر قطعات دمابالا نظیر پره‌های توربین هستند که با کاهش ۱۰۰ تا ۲۰۰ درجه‌ای حرارت واردشده به سوپرآلیاژ پایه، قابلیت فعالیت در دماهای کاری بالاتر و در نتیجه راندمان بیش‌تر را فراهم می‌کنند. تغییر جنس این پوشش‌ها به دلیل تعدد عوامل مؤثر، هزینه‌های بالا و پیچیده‌بودن شرایط کاری همواره با چالش‌های زیادی همراه است اما نانوساختارکردن پوشش‌های مرسوم می‌تواند یک گزینه مطمئن و کم‌خطر برای ارتقای عملکرد باشد، زیرا در این فرایند بدون تغییر جنس پوشش، تنها ساختار آن تغییر می‌کند و همین امر بسیاری از ریسک‌های موجود در استفاده از مواد جدید را کاهش می‌دهد. هدف از این پژوهش بررسی تأثیر نانوساختار کردن پوشش زیرکونیای پایدارشده با ایتریا (YSZ) بر عملکرد آن در شرایط شوک حرارتی است. بدین منظور، روی دیسک‌هایی از جنس اینکونل ۷۳۸، پوشش YSZ مرسوم و نانو ساختار اعمال و از روش کوره‌ای برای آزمون شوک حرارتی استفاده شد. نوآوری اصلی این پژوهش، تعیین پارامترهای پاشش با حداقل تغییرات نسبت به فرایند مرسوم بود به‌گونه‌ای که نواحی نانو در پوشش ایجاد شده و به‌صورت یکنواخت توزیع گردند و پس از آن نتایج نشان داد که پوشش نانوساختار می‌تواند عملکرد به مراتب بهتری از پوشش مرسوم داشته باشد.*

کلمات کلیدی: *پوشش‌های سد حرارتی، شوک حرارتی، نانوساختار، YSZ، پره توربین.*

نویسنده اول و مسئول:
دکتر افشین آشفته
مرکز آموزش عالی محلات
* a.ashofte@gmail.com

نوع مقاله: پژوهشی
صفحه‌های: ۲۴ تا ۳۶
شاپا چاپی: ۱۷۳۵-۳۳۵۱
شاپا الکترونیکی: ۲۷۸۳-۳۰۹۷
زبان نشریه: فارسی
دسترس‌پذیر در نشانی:
www.JICERS.ir
تاریخ دریافت:
۱۴۰۳/۰۷/۲۳
تاریخ پذیرش:
۱۴۰۳/۱۰/۰۳
DOR: 20.1001.1.17353351.1403.20.0.2.2

۱- مقدمه

پوشش‌های سد حرارتی[1] (TBCs) به‌عنوان یکی از فناوری‌های کلیدی در بهبود عملکرد و عمر مفید قطعات دمابالای توربین‌های گازی و موتورهای جت محسوب می‌شوند. این پوشش‌ها با تشکیل یک‌لایه محافظ روی سطح قطعات، مانع از انتقال حرارت شدید به زیرلایه می‌شوند و به‌این‌ترتیب دمای کاری قطعه کاهش می‌یابد. کاهش دما باعث کاهش تنش‌های حرارتی، افزایش مقاومت به اکسیداسیون و خوردگی و در نتیجه افزایش عمر مفید قطعات می‌شود. این فناوری، به‌ویژه در صنایعی مانند هوافضا و نیروگاه‌های تولید برق، که قطعات به‌طور مداوم در معرض دماهای بالا و تغییرات حرارتی ناگهانی هستند، نقش حیاتی دارد [۱-۳].

پوشش‌های سد حرارتی به دلیل نقطه ذوب و ضریب انتقال حرارت پایین، از جنس سرامیک انتخاب می‌شوند و ساختاری چندلایه دارند که روی یک زیرلایه از سوپر آلیاژهای پایه نیکل یا کبالت اعمال می‌شود و ویژگی‌های اصلی لایه‌های مختلف آن عبارت‌اند از:

[1] Thermal Barrier Coatings

- لایه اتصالی[1]: ترکیب رایج این لایه MCrAlY (M: فلز، Cr: کروم، Al: آلومینیوم و Y: ایتریوم) بوده و ضخامت آن در محدوده ۵۰–۱۵۰ میکرومتر است. این لایه دارای خواصی بین سرامیک (لایه رویی) و فلز (زیرلایه) بوده و سرشار از آلومینیوم است. نقش اصلی لایه اتصالی، محافظت از سوپر آلیاژ زیرلایه در برابر اکسیداسیون و خوردگی داغ است [۴].
- لایه رویی[2]: این لایه بیرونی‌ترین بخش سیستم TBC است و رایج‌ترین ماده برای آن زیرکونیای پایدارشده با ایتریا (YSZ[3]) است. ضخامت لایه رویی با توجه به شرایط کاری و شرایط محیطی در محدوده ۲۵۰–۶۰۰ میکرومتر تغییر می‌کند [۵]. لایه رویی دارای هدایت حرارتی کم و ضریب انبساط حرارتی (CTE[4]) بالا بوده و همچنین مقاومت زیادی در برابر زینترشدن و پایداری فاز در دماهای بالا دارد و به دلیل ساختار کریستالی خاص خود می‌تواند تنش‌های حرارتی را جذب و توزیع کند که این امر به جلوگیری از ترک‌خوردگی و آسیب پوشش کمک می‌کند. به‌طور معمول لایه رویی دما را ۱۰۰–۲۰۰ کلوین کاهش می‌دهد [۶، ۷].
- لایه اکسید رشدیافته با حرارت (TGO[5]): این لایه بین لایه اتصالی و لایه رویی تشکیل می‌شود و با گذشت زمان ضخیم می‌شود. ترکیب اصلی آن α-Al_2O_3 بوده و ضخامت آن در محدوده ۰٫۱–۱۰ میکرومتر است [۸، ۹]. لایه TGO برای رشد به Al و O نیاز دارد که آلومینیوم از لایه اتصالی تأمین شده و اکسیژن از جو نفوذ می‌کند. عدم تطابق ضریب انبساط حرارتی TGO با لایه‌های بالایی و پایینی باعث ایجاد تنش‌های پسماند فشاری بالا در پوشش می‌شود. تحقیقات نشان می‌دهد که میزان آسیب با ضخامت این لایه ارتباط مستقیم دارد و به‌صورت نمایی زیاد می‌شود [۱۰، ۱۱].

اساس ایجاد پوشش‌های سد حرارتی، ذوب ذرات سرامیکی و اعمال آن‌ها بر روی سطح است و با توجه به نقطه ذوب بالای سرامیک‌ها (حدود ۲۸۰۰ درجه سانتی‌گراد)، در صنعت روش‌های کمی از جمله پاشش پلاسما در هوا (APS[6]) و انباشت بخار فیزیکی پرتو الکترونی (EBPVD[7]) قادر به انجام این کار هستند که اولی به دلیل هزینه کم‌تر و ساختار خاص پوشش ایجادشده، در صنایع نیروگاه‌های کاربرد بیش‌تری دارد [۱۲، ۱۳]. در ساختار پوشش‌های APS عیوبی مانند تخلخل و ریزترک‌ها وجود دارد که باعث کاهش رسانایی حرارتی پوشش و تحمل بهتر کرنش می‌شود و ازاین‌رو این عیوب به‌عنوان یک مزیت برای فعالیت پوشش‌دهی محسوب می‌شوند [۱۴].

پوشش‌های سد حرارتی نانوساختار پیشرفتی مهم در حوزه TBCs هستند که با استفاده از فناوری نانو بهبود یافته‌اند. تفاوت اصلی پوشش‌های نانوساختار با پوشش‌های مرسوم در اندازه دانه‌ها و ساختار نانویی آن‌ها است. این ساختار نانویی بهبود قابل توجهی در خواص مکانیکی و حرارتی پوشش‌ها به همراه دارد [۱۵]. نانونواحی در داخل پوشش‌های سد حرارتی نانوساختار، به نواحی بسیار کوچکی اشاره دارد که نانوذرات به‌صورت منظم در آن توزیع شده‌اند و ابعاد کلی این نواحی کم‌تر از ۵۰ میکرومتر است. این نانونواحی می‌توانند تنش‌های حرارتی را به‌طور یکنواخت‌تری توزیع کرده و از تمرکز تنش در نقاط خاص جلوگیری کنند. در شرایط شوک حرارتی، توزیع یکنواخت تنش‌ها به جلوگیری از ایجاد ترک و شکست‌های ناگهانی کمک می‌کند. همچنین، نانونواحی به دلیل سطح ویژه بالا و قابلیت تغییر شکل پلاستیک بهتر، می‌توانند انرژی‌های ناشی از شوک حرارتی را بهتر جذب و مستهلک کنند [۱۶–۱۸].

دلایل شکست TBCها در طول فعالیت می‌تواند ایجاد ترک در فصل مشترک لایه‌ها، عدم تطابق حرارتی لایه‌ها و یا بروز ترک در درون ساختار لایه رویی باشد. یکی از دلایل اصلی آسیب به پوشش‌های سد حرارتی، شوک حرارتی است که در آن تغییرات ناگهانی و شدید دما (کاهش حدود ۱۰۰۰ کلوین در زمان بسیارکوتاه) اتفاق می‌افتد و می‌تواند منجر به ترک‌خوردگی و تخریب ساختاری پوشش‌ها شود [۱۹–۲۱]. در صنایع هوافضا و تولید برق، قطعاتی مانند پره‌های توربین به‌طور مکرر در معرض تغییرات ناگهانی و

[1] Bondcoat
[2] Topcoat
[3] Yttria-Stabilized Zirconia
[4] Coefficient of Thermal Expansion
[5] Thermally Grown Oxide
[6] Atmospheric Plasma Spray
[7] Electron Beam Physical Vapor Deposition

شدید دما قرار می‌گیرند (کاهش حدود ۱۰۰۰ کلوین در زمان بسیارکوتاه) که این امر می‌تواند منجر به تخریب پوشش‌های سد حرارتی شود. اهمیت این چالش، محققان را به سمت توسعه پوشش‌های نانوساختار سوق داده است، زیرا این پوشش‌ها می‌توانند در عین کاهش تخلخل و توزیع یکنواخت تنش، عملکرد بهتری در برابر شوک‌های حرارتی ارائه دهند [۲۲، ۲۳].

در این مقاله، به بررسی جامع عملکرد پوشش‌های سد حرارتی نانوساختار در شرایط شوک حرارتی با تمرکز بر روش ایجاد، نانونواحی و نقش آن‌ها در عملکرد پوشش پرداخته می‌شود. ابتدا فرایند و مسیر ایجاد پوشش‌های YSZ نانوساختار و عوامل مهم دخیل در آن ذکر شده و سپس با مقایسه عملکرد آن‌ها با پوشش‌های YSZ مرسوم، دلایل این تفاوت تشریح خواهد شد. نتایج این پژوهش نشان داد، استفاده از پوشش‌های YSZ نانوساختار، به دلیل عدم تغییر در جنس مرسوم پوشش‌ها، از ریسک بسیارکمی برخوردار بوده اما در عین حال، می‌تواند ارتقای ملموسی در عملکرد شوک حرارتی پوشش‌های سد حرارتی ایجاد کند.

۲- مواد و روش تحقیق

۲-۱- مواد

در این پژوهش به‌منظور بررسی عملکرد پوشش‌ها، زیرلایه‌های استوانه‌ای از جنس Inconel 738 به قطر ۳۰ میلی‌متر و ضخامت ۳ میلی‌متر تولید شد. روی سطح همه نمونه‌ها، پوشش اتصالی CoNiCrAlY با برند Amperit415.006 و با ضخامت ۱۵۰ میکرومتر اعمال شد. برای ایجاد لایه رویی از پودر YSZ مرسوم (Metco 234A-8%) و YSZ نانوسایز (Inframat Sprayable NanoxTM S4007) استفاده شد. کلیه نمونه‌ها دارای زیرلایه و پوشش اتصالی یکسان و ضخامت لایه رویی در آن‌ها ۳۰۰ میکرومتر بودند. در شکل ۲، تصویر SEM مقطع دو پوشش قابل مشاهده است.

۲-۲-روش‌ها

تمامی پوشش‌ها اعم از لایه رویی و لایه اتصالی با استفاده از روش APS و تفنگ سری Metco 3MB لایه‌نشانی شدند. قبل از انجام فرآیند پاشش، برای افزایش پیوندهای مکانیکی بین پوشش و نمونه، سطح نمونه‌ها با پاشش Al_2O_3 (مش ۲۵) کمی زبر شد و سپس عملیات پیش‌گرم‌کردن در دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد صورت پذیرفت. عملیات اصلی APS با آرگون و هیدروژن به‌عنوان گازهای اولیه و ثانویه انجام شد که جزئیات آن در جدول ۱ مشاهده می‌شود.

جدول ۱: پارامترهای پوشش‌دهی پودر YSZ مرسوم و نانوسایز

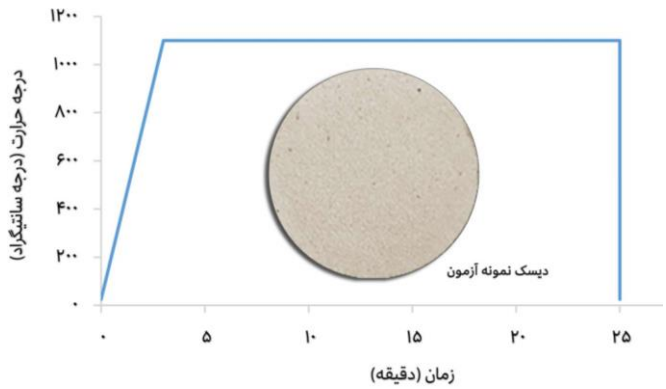
پارامتر پاشش	جریان	ولتاژ	جریان گاز			نرخ تغذیه پودر	فاصله پاشش	سرعت دوران
			اولیه (Ar)	ثانویه (H_2)	حامل (Ar)			
واحد	آمپر (A)	ولت (V)	لیتر نرمال در دقیقه (nlpm)			گرم در دقیقه (gr/min)	میلی‌متر (mm)	دور در دقیقه (rpm)
YSZ مرسوم	۶۰۰	۵۵	۴۰	۹	۲,۵	۵۰	۱۵۰	۱۲۰
YSZ نانو	۶۰۰	۵۵	۴۲	۹	۲,۵	۴۰	۱۵۰	۱۲۰

برای ایجاد پوشش در مقیاس نانو باید از پودرهایی با اندازه ذرات کم‌تر از ۱۰۰ نانومتر استفاده کرد که این ذرات به دلیل جرم بسیار کم، نمی‌توانند در حین پاشش در جریان پلاسما شتاب بگیرند؛ بنابراین، قبل از عملیات لایه‌نشانی، نانوذرات باید کلوخه شوند. برای ایجاد یک پوشش نانوساختار، پارامترهای پاشش باید به گونه‌ای انتخاب شوند که بخشی از نانوذرات ذوب شوند و وظیفه ایجاد پیوند را ایفا کنند و سایر ذرات به‌صورت ذوب‌نشده یا نیمه‌ذوب‌شده باقی بمانند. اگر تمام نانوذرات ذوب شوند، پوشش میکروساختار خواهد شود. لذا برای ایجاد پوشش YSZ نانوساختار، از فاکتوری به نام پارامترهای بحرانی پاشش پلاسما (CPSP) استفاده می‌شود (معادله ۱) که باید در محدوده ۷۸۰ تا ۱۰۸۰ باشد [۲۴].

$$CPSP = \frac{\text{جریان}(A)\times\text{ولتاژ}(V)}{\text{جریان گاز اولیه}(nlpm)\times 0.93} \qquad (۱)$$

۲-۳- آزمون شوک حرارتی

در این پژوهش برای شبیه‌سازی شرایط شوک حرارتی از آزمون کوره‌ای استفاده شد و در آن نمونه در داخل کوره تا دمای حدود ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد گرم و سپس در آب کوئنچ شد. این روش به دلیل اعمال شوک‌های شدید و مشابهت و با شرایط واقعی یکی از بهترین روش‌ها برای شبیه‌سازی‌ها شرایط شوک حرارتی پوشش‌های سد حرارتی است. سیکل انجام این آزمایش شامل رسیدن دمای کوره به ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد، قراردادن نمونه‌ها در کوره، ۲۵ دقیقه انتظار برای افزایش تدریجی دما نمونه‌ها و رسیدن به دمان ۱۱۰۰ و سپس باقی‌ماندن در آن دما و نهایتاً کوئنچ‌کردن نمونه‌ها در آب ۲۰ درجه سانتی‌گراد بود. حجم مخزن آب به حدی بود که دمای آن قبل و بعد از کوئنچ تغییر چندانی نمی‌کرد. این آزمایش ۷۰ بار برای همه نمونه‌ها تکرار شد و در پایان هر سیکل، از سطح همه نمونه‌ها عکس گرفته شد تا میزان تخریب پوشش در آن سیکل مشخص شود. میزان تخریب از محاسبه درصد مساحت ناحیه جدا شده پوشش از روی دیسک به مساحت کل دیسک محاسبه شد و افزایش درصد تخریب بیانگر رشد آسیب در سیکل‌های مختلف است. در شکل ۱، تغییرات درجه حرارت در هر سیکل آزمون و نیز تصویر یکی از نمونه‌ها در ابتدای آزمون و قبل از اعمال سیکل‌های حرارتی مشاهده می‌شود. علاوه‌بر این، با استفاده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و آنالیز طیف‌سنج پراش انرژی (EDS) ریزساختار پوشش‌ها مورد بررسی قرار گرفت.



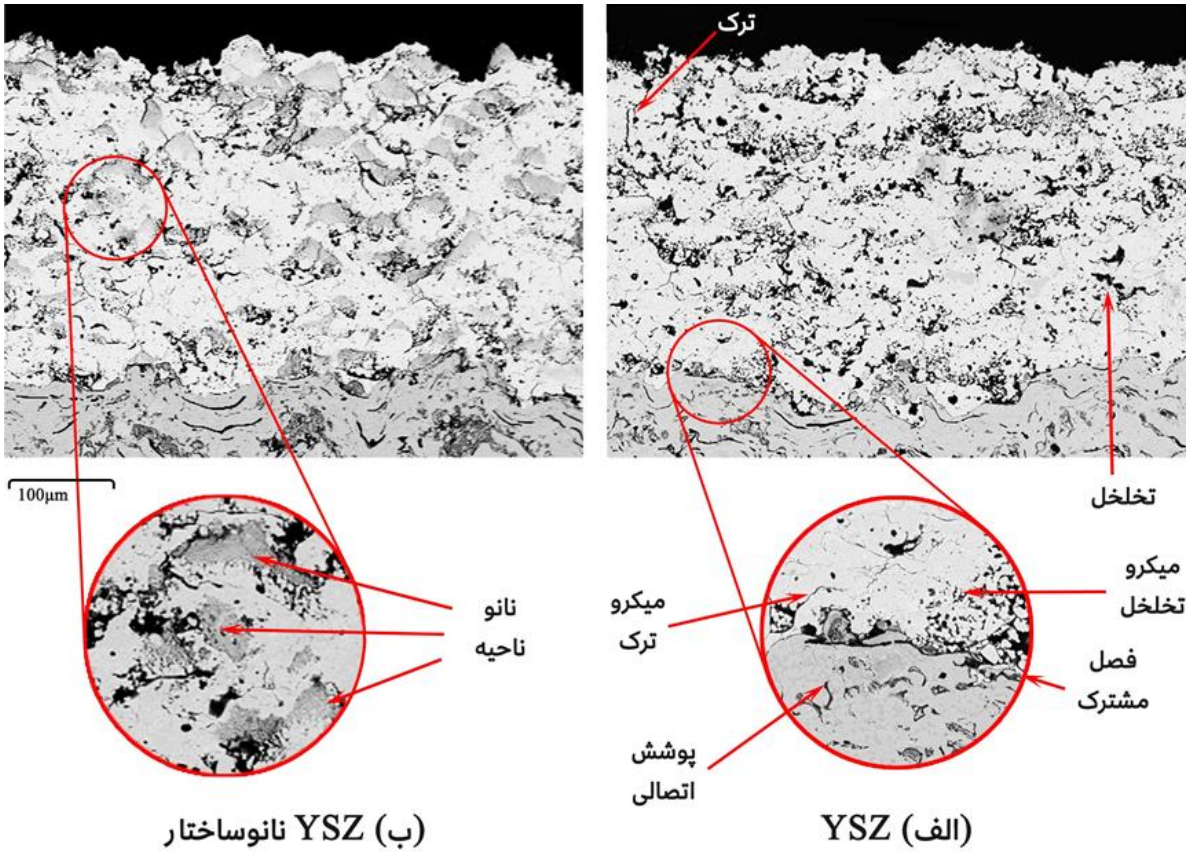
شکل ۱: سیکل آزمون شوک حرارتی (دیسک نشان‌داده‌شده در وسط نمودار: یکی از نمونه‌ها قبل از انجام آزمون شوک حرارتی)

۳- نتایج و بحث

در شکل ۲، ریزساختار هر دو پوشش YSZ مرسوم و نانوساختار در کنار یکدیگر آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود ساختار پوشش به دلیل ماهیت فرایند لایه نشانی در روش APS، دارای انواع عیوب از جمله تخلخل و ترک در سایزهای مختلف می‌باشد اما در پوشش نانوساختار، مشاهده می‌شود که عیوب بزرگ به میزان کم‌تری در ساختار پوشش وجود دارد. مطالعه کمی نشان می‌دهد که در پوشش YSZ مرسوم، درصد تخلخل حدود ۱۳/۲٪ است، درحالی‌که در پوشش نانوساختار این مقدار به حدود ۹/۴٪ کاهش یافته است. این کاهش، به دلیل نواحی نانو با توزیع یکنواخت‌تر تخلخل‌ها و ابعاد کوچک‌تر ترک‌ها در این ساختار است. نواحی نانو درون پوشش نانوساختار زمانی ایجاد می‌شوند که بخشی از پودر نانوسایز کلوخه‌شده، ذوب‌شده و مابقی ذوب‌نشده باقی بماند. ذرات ذوب‌شده به مانند چسب، سایر ذرات را در بر می‌گیرند و نتیجه آن نواحی هستند که تخلخل‌های در ابعاد نانو و با توزیع یکنواخت دارند. فصل مشترک لایه‌ها در پوشش‌های سد حرارتی نیز از عوامل تأثیرگذار در عملکرد پوشش هستند زیرا در این نواحی جنس و خواص ماده به‌یک‌باره تغییر می‌کند که می‌تواند در شرایط عملکردی و سیکل‌های حرارتی منشأ آسیب پوشش به تخریب آن باشد.

تخلخل‌های موجود در ساختار پوشش‌های سد حرارتی حاوی هوا بوده و به همین جهت رسانایی حرارتی بسیارپایینی دارند و لذا این ساختار معیوب موجب کاهش انتقال حرارت به لایه‌های زیرین می‌شود و ازسوی‌دیگر این عیوب ابزاری برای انطباق آن‌ها با انقباض و انبساط‌های حاصل از سیکل‌های حرارتی هستند. اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهد که هدایت حرارتی پوشش YSZ نانوساختار

به دلیل وجود تخلخل‌های کوچک‌تر و توزیع بهتر، حدود ۲۰٪ کم‌تر از پوشش مرسوم است. این ویژگی به کاهش دمای لایه زیرین تا ۴۰ درجه سانتی‌گراد کمک می‌کند که در افزایش مقاومت به شوک حرارتی مؤثر است. وجه دیگر این عیوب این است که می‌توانند به‌عنوان منشأ بروز آسیب به پوشش یا تخریب آن عمل کنند؛ به‌عنوان مثال ممکن است میکروترک‌ها در سیکل‌های حرارتی رشد کرده و به یکدیگر بپیوندند و یک ترک بزرگ را شکل دهند که این ترک نهایتاً موجب جدایش بخشی از پوشش شود.

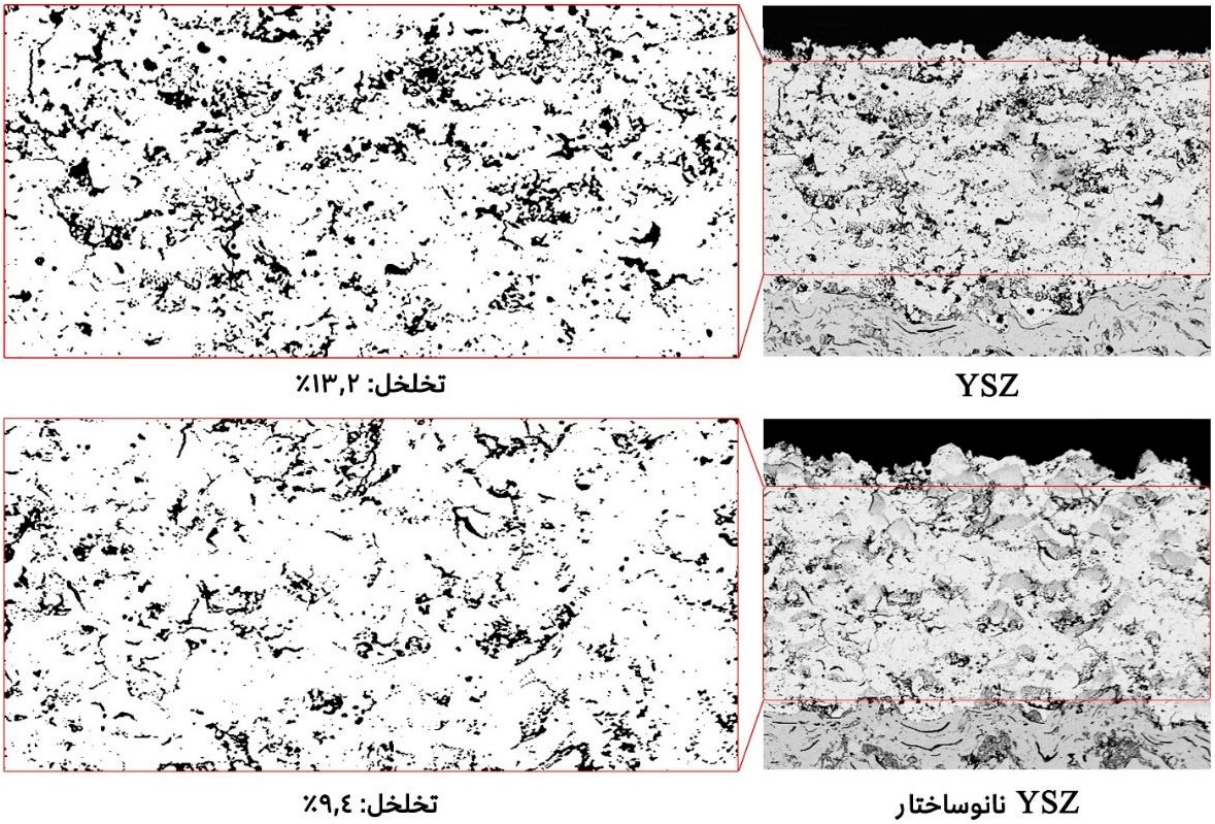


شکل ۲: تصویر SEM مقطع الف) YSZ مرسوم و ب) YSZ نانوساختار قبل از انجام آزمون شوک حرارتی

لذا در عین حال که حضور این عیوب و تخلخل‌ها برای عملکرد بهتر پوشش ضروری است، نباید میزان آن‌ها بسیارزیاد باشد و یا عیوب با سایز بزرگ و یا مجتمع، درون ساختار پوشش وجود داشته باشد. یکی از ابزارهای مناسب برای سنجش این امر، تبدیل تصویر مقطع پوشش به باینری است که در آن هر پیکسل یا سفید و یا سیاه بوده و پیکسل‌های سیاه نشان‌دهنده عیوب ساختاری هستند. در شکل ۳ خروجی باینری تصاویر SEM پوشش YSZ مرسوم و میکروساختار آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، عیوب درون پوشش نانوساختار توزیع یکنواخت‌تری دارند و میزان کلی تخلخل این پوشش، حدود ۴٪ کم‌تر از پوشش مرسوم است. درصد تخلخل هر پوشش از تقسیم تعداد پیکسل‌های سیاه به کل پیکسل‌های ناحیه انتخاب‌شده محاسبه شده است. علاوه‌بر این درون ساختار پوشش میکروساختار، حفره‌های بزرگ، ترک‌های با سایز بیش‌تر و نیز تجمع عیوب در برخی نواحی مشاهده می‌شود.

در شکل ۴ توزیع عناصر Zr، O و Al در لایه‌های مختلف ساختار پوشش سد حرارتی نشان داده شده است. زیرکونیوم جزء اصلی ZrO_2 است و در هر دو پوشش به شکل تقریباً مشابه وجود دارد. اهمیت اکسیژن و آلومینیوم در تشکیل لایه TGO است، آنجایی که اکسیژن از جو و از طریق عیوب ساختاری به فصل مشترک لایه رویی و پوشش اتصالی نفوذ کرده و آلومینیوم نیز از درون ساختار پوشش اتصالی تأمین می‌شود و واکنش این‌ها با یکدیگر موجب تشکیل Al_2O_3 یا همان TGO می‌شود.

لایه TGO چون ضریب انبساط حرارتی کم‌تری نسبت به پوشش اتصالی و لایه رویی دارد، موجب ناسازگاری در سیکل‌های حرارتی درون سیستم پوشش سد حرارتی شده و می‌تواند وقوع آسیب به پوشش را تسریع کند.



شکل ۳: فرایند محاسبه میزان تخلخل پوشش‌ها از طریق تبدیل مقطع به باینری و محاسبه میزان تخلخل از تقسیم تعداد پیکسل‌های سیاه به کل پیکسل‌ها

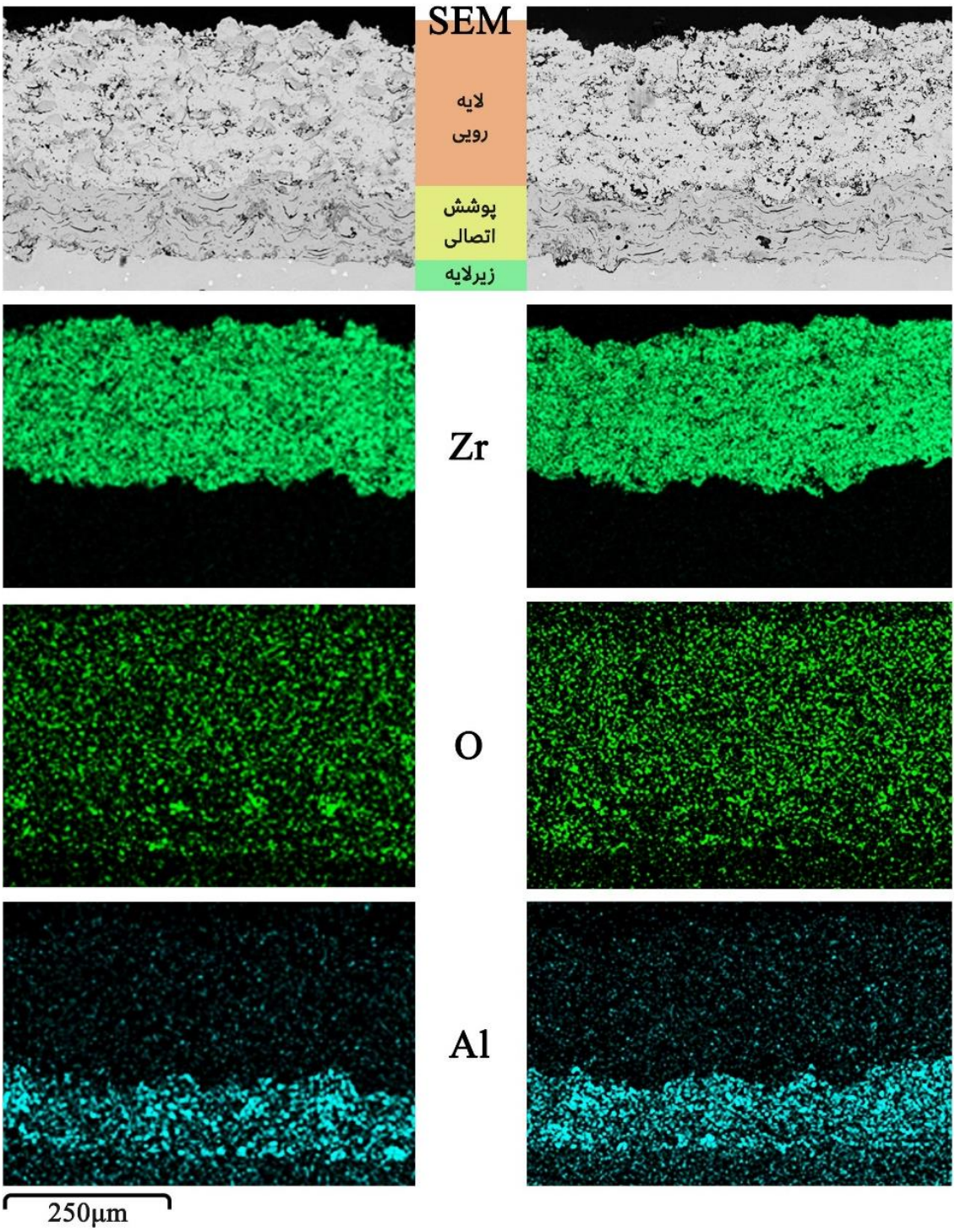
اندازه‌گیری ضخامت TGO نشان می‌دهد که در پوشش YSZ مرسوم، ضخامت TGO پس از ۷۰ سیکل حدود ۵/۵ میکرومتر است، در حالی که این مقدار در پوشش نانوساختار به ۳/۲ میکرومتر کاهش یافته است. این تفاوت نشان می‌دهد که نانونواحی با ایجاد سد در برابر نفوذ اکسیژن، رشد TGO را به تأخیر می‌اندازند. لذا وجود آن تأثیر منفی بر عملکرد پوشش داشته و هر چقدر ضخامت آن بیش‌تر شود، تأثیر منفی آن به‌صورت نمایی زیادتر خواهد شد. دقت در توزیع اکسیژن در هر دو پوشش نشان می‌دهد که پوشش YSZ مرسوم، توزیع یکنواخت‌تری داشته و در اکثر نواحی به‌صورت مشابه وجود دارد اما این توزیع درون ساختار پوشش نانوساختار یکنواخت نیست. در واقع وجود نواحی‌نانو دلیل این غیریکنواختی است و در زمان فعالیت پوشش هم به‌عنوان سدی در مقابل نفوذ اکسیژن عمل کرده و لذا رشد و توسعه TGO را به تأخیر می‌اندازد.

در شکل ۵ نمودار تجمیعی رشد و توسعه آسیب به سطح پوشش آورده شده است. آسیب در این تحقیق جداشدن بخشی از پوشش از سطح نمونه در نظر گرفته شده است؛ اگر این جدایش در لبه نمونه باشد با عنوان آسیب سطحی و اگر در سطح رویی آن باشد به‌عنوان آسیب سطحی معرفی شده است. آسیب لبه‌ای معیاری است که در زمان تحلیل آن باید فاکتورهای اصلاحی نیز در نظر گرفت چون در نمونه‌های واقعی پره توربین، سطح پوشش داده شده توربین، لبه‌هایی نظیر لبه دیسک‌های این پژوهش ندارد و نواحی جدایش پوشش بسیارکوچک هستند اما آسیب سطحی عیناً ممکن است در پره‌های توربین نیز اتفاق بیفتد. نمودار درصد تخریب پوشش به‌صورت دقیق نمایانگر نقش نانونواحی و نانوساختارشدن پوشش در عملکرد آن در شرایط شوک حرارتی است.

همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، رشد آسیب در نمودار آبی رنگ که نشان‌دهنده YSZ مرسوم است، به‌صورت نمایی و افزایشی است و پس از ۷۰ سیکل به حدود ۱۰/۵٪ رسیده است اما در پوشش نانوساختار پس از وقوع آسیب، رشد آن مهار شده است و آسیب نهایی کم‌تر از ۱٪ بوده است. تحلیل نمودار نشان می‌دهد که نرخ رشد آسیب در YSZ مرسوم در ۲۰ سیکل پایانی به ۰/۳۵٪ در هر سیکل افزایش می‌یابد، در حالی که در YSZ نانوساختار این مقدار تنها ۰/۰۵٪ در هر سیکل است. این کاهش به

دلیل نقش نانونواحی در جلوگیری از توسعه ترک‌ها و کاهش تنش‌های متمرکز است. در واقع این نمودار نشان می‌دهد که نانونواحی که تنها پارامتر متفاوت در ساختار دو پوشش هستند، مانع از توسعه سریع آسیب به پوشش شده‌اند. علاوه‌بر این از نمودار مشخص است که شروع آسیب در نمونه نانوساختار، حدود ۲۵ سیکل دیرتر از نمونه مرسوم اتفاق افتاده است.

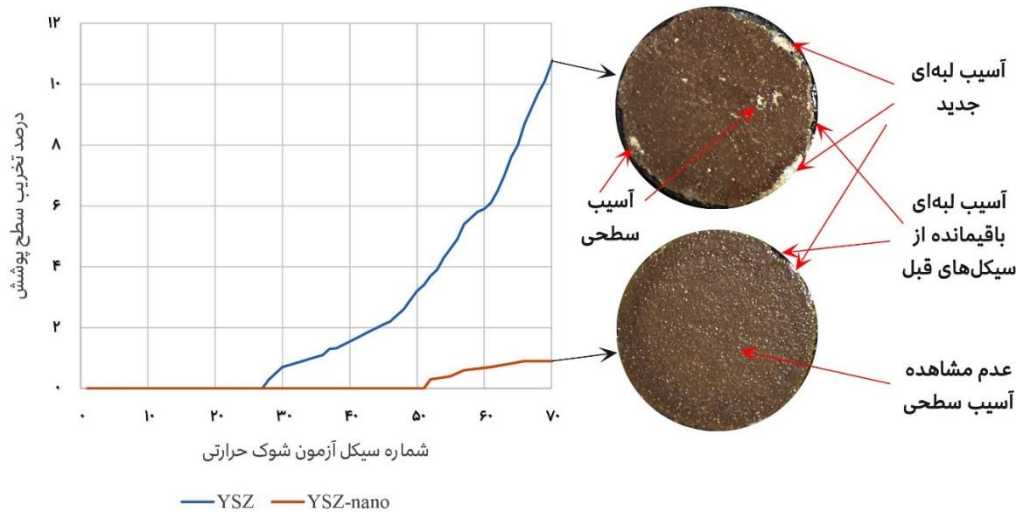
همان‌طور که در تصویر پوشش دیسک‌های شکل ۵ مشاهده می‌شود، در پوشش مرسوم هم آسیب لبه‌ای و هم آسیب سطحی اتفاق افتاده است اما در پوشش نانوساختار تنها آسیب لبه‌ای و آن هم به‌صورت بسیار محدود به وقوع پیوسته است.



(ب) YSZ نانوساختار

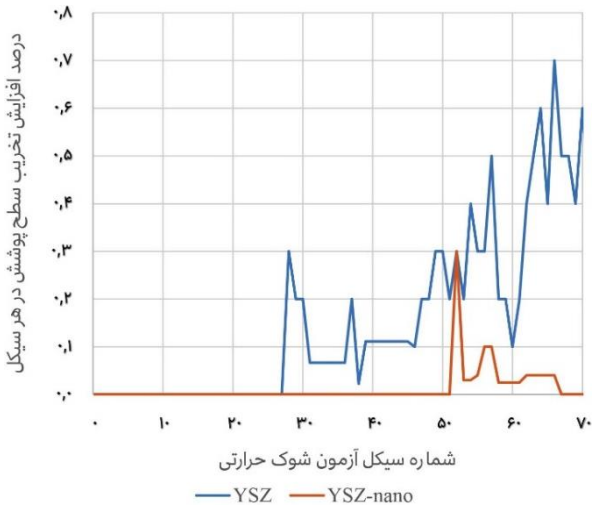
(الف) YSZ

شکل ۴: توزیع عناصر Zr، O و Al در لایه‌های مختلف پوشش سد حرارتی برای پوشش‌های YSZ مرسوم و نانوساختار



شکل ۵: نمودار توسعه آسیب به نمونه‌های آزمون در فرایند سیکل‌های شوک حرارتی

در شکل ۶، میزان افزایش آسیب در هر سیکل آزمون آورده شده است. در نمونه YSZ مرسوم، رشد آسیب هر سیکل، به‌صورت افزایشی است اما در پوشش نانوساختار، پس از وقوع آسیب، رشد آن کنترل شده است.

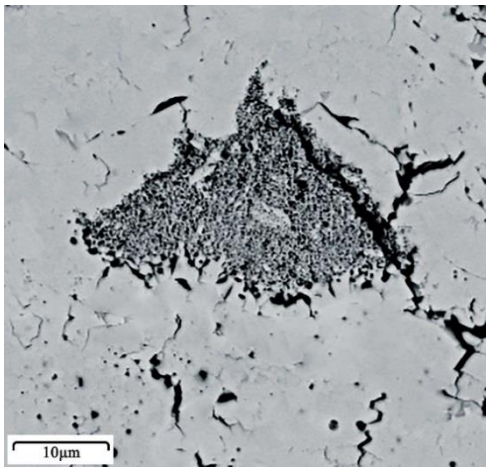


شکل ۶: نمودار درصد افزایش آسیب در هر سیکل از آزمون شوک حرارتی

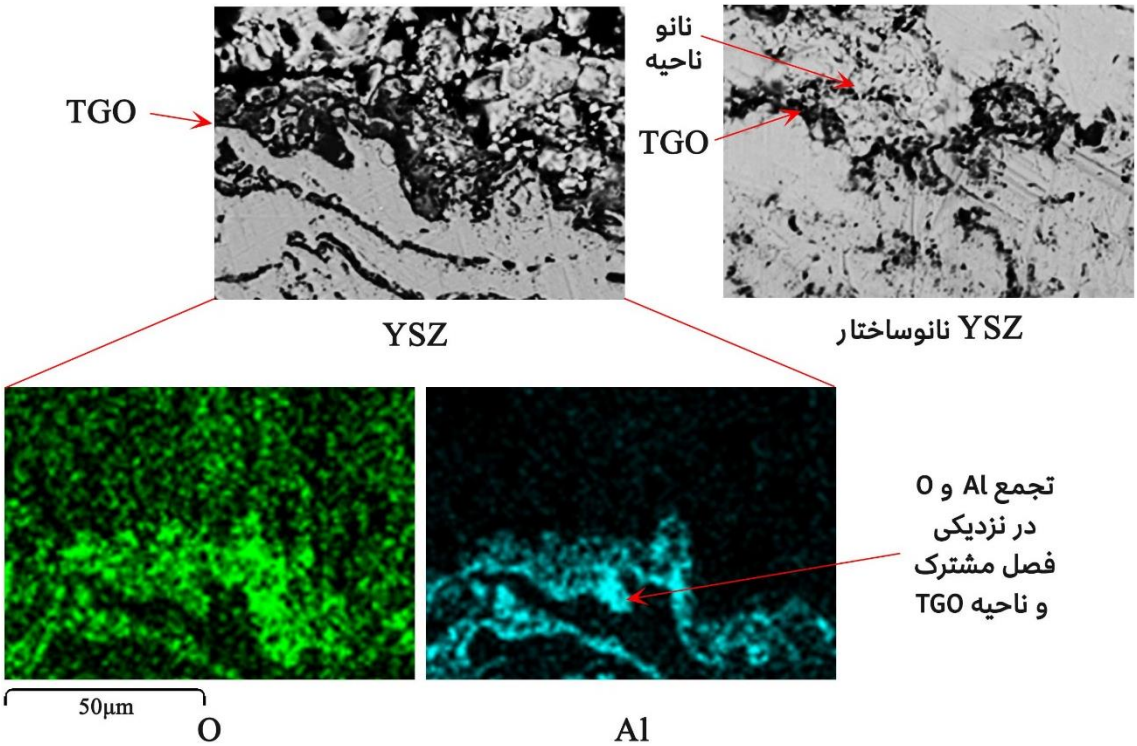
در شکل ۷ یک نانوناحیه با بزرگ‌نمایی بالا نشان داده شده است که در مجاورت آن ترک و چند تخلخل وجود دارد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ترک از وسط ناحیه عبور نکرده است و حتی ترک عرضی هم پس از رسیدن به ناحیه نانو، متوقف شده و در مسیر ترک بزرگ‌تر رشد کرده است. این رفتار ناشی از چقرمگی شکست بالاتر نانو نواحی است که به دلیل ساختار دانه‌ای ریزتر و توزیع یکنواخت‌تر تنش‌ها رخ می‌دهد. مطالعات مکانیکی نشان می‌دهند که چقرمگی شکست در این نواحی تا ۳۰٪ بیش‌تر از پوشش YSZ مرسوم است. ازسوی‌دیگر چندین حفره و تخلخل در قسمت پایینی ناحیه نانو وجود دارد اما درون این ناحیه حفره بزرگی مشاهده نمی‌شود. در واقع این تصویر نشان می‌دهد که نواحی نانو به‌عنوان قفل و مانع در مقابل رشد ترک‌ها عمل می‌کنند که نمونه آن رشد ترک در مرز ناحیه نانو در این تصویر است و همچنین در این نواحی به دلیل ساختار نانوی خود، تخلخل‌ها در ابعاد نانومتری و بسیارکوچک و با توزیع متعادل و یکنواخت هستند که هم موجب کاهش ضریب هدایت حرارتی می‌شوند و هم انطباق در سیکل‌های حرارتی را افزایش می‌دهند.

در شکل ۸، تصاویر SEM مقاطع بعد از انجام سیکل‌های شوک حرارتی و در ناحیه TGO نشان داده شده است. همان‌طور که

مشاهده می‌شود، در پوشش YSZ مرسوم، TGO ضخامت بیش‌تری داشته و نیز نواحی اطراف آن مستعد برای رشد هستند اما TGO در پوشش نانوساختار یکنواخت‌تر بوده و در مجاورت ناحیه نانو، کم‌ترین مقدار خود را دارد. مطابق این مشاهدات ضخامت TGO در نواحی نزدیک به نانونواحی به طور میانگین ۲/۳ میکرومتر کم‌تر از نواحی دیگر است. این ویژگی عملکرد حرارتی پوشش را بهبود داده و عمر پوشش را افزایش می‌دهد. همان‌طور که توزیع عناصر آلومینیوم و اکسیژن در اطراف فصل مشترک در پوشش YSZ مرسوم نشان می‌دهد، این ناحیه کاملاً مستعد ضخیم شدن TGO است که می‌تواند سرعت تخریب پوشش را به‌صورت گسترده و نمایی افزایش دهد که در نمودار شکل ۵ نیز توسعه نمایی آسیب مشاهده می‌شود.



شکل ۷: تصویر یک نانوناحیه درون ساختار پوشش



شکل ۸: ناحیه TGO در هر دو پوشش میکرو و نانوساختار

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، عملکرد پوشش‌های سد حرارتی YSZ مرسوم و نانوساختار در شرایط شوک حرارتی بررسی شد. انتخاب پوشش

نانوساختار ازاین‌رو بود که مطالعات پیشین نشان داده‌اند این نوع پوشش‌ها به دلیل وجود نواحی نانو، مقاومت بیش‌تری در برابر خزش و شوک حرارتی داشته و هدایت حرارتی کم‌تری دارند. بررسی‌ها نشان داد که یکی از مهم‌ترین تفاوت‌های عملکردی این دو پوشش به حضور نواحی نانو در ساختار پوشش نانوساختار باز می‌گردد. این نواحی با کاهش ابعاد تخلخل‌ها و توزیع یکنواخت‌تر آن‌ها، نقش کلیدی در بهبود خواص حرارتی و مکانیکی ایفا می‌کنند. در جریان آزمون‌های شوک حرارتی، مشخص شد که آسیب در پوشش YSZ مرسوم حدود ۲۵ سیکل زودتر از پوشش نانوساختار آغاز می‌شود و به‌صورت نمایی رشد می‌کند. در مقابل، پوشش نانوساختار رشد آسیب کاملاً محدود و کنترل‌شده‌ای دارد. این تفاوت عملکرد به عواملی چون مقاومت نواحی نانو در برابر نفوذ اکسیژن و کاهش ضخامت TGO نسبت داده می‌شود. این لایه در پوشش‌های YSZ نانوساختار حدود ۴۰٪ نازک‌تر از پوشش‌های مرسوم است که این امر نقش مهمی در کاهش تمرکز تنش‌های حرارتی و تأخیر در آغاز ترک‌خوردگی دارد. ازآنجاکه پوشش نانوساختار بدون تغییر جنس پایه پوشش‌های مرسوم طراحی شده است، این فناوری می‌تواند یک گزینه مناسب برای بهبود عملکرد قطعات دمابالا مانند پره‌های توربین در صنایع هوافضا و نیروگاهی باشد. همچنین، ریسک استفاده از این پوشش‌ها به دلیل عدم تغییر در فرآیند تولید و نصب، بسیارکم است.

مراجع

[1]. J. G. Thakare, C. Pandey, M. Mahapatra, R. S. Mulik, Thermal barrier coatings—A state of the art review, Metals and Materials International, Vol. 27, pp. 1947-1968, 2021.

[2]. B. Liu, Y. Liu, C. Zhu, H. Xiang, H. Chen, L. Sun, Y. Gao, Y. Zhou, Advances on strategies for searching for next generation thermal barrier coating materials, Journal of Materials Science & Technology, Vol. 35, No. 5, pp. 833-851, 2019.

[3]. E. Bakan, R. Vaßen, Ceramic top coats of plasma-sprayed thermal barrier coatings: materials, processes, and properties, Journal of Thermal Spray Technology, Vol. 26, pp. 992-1010, 2017.

[4]. D. Naumenko, R. Pillai, A. Chyrkin, W. Quadakkers, Overview on recent developments of bondcoats for plasma-sprayed thermal barrier coatings, Journal of Thermal Spray Technology, Vol. 26, pp. 1743-1757, 2017.

[5]. S. Jude, J. W. Jappes, M. Adamkhan, Thermal barrier coatings for high-temperature application on superalloy substrates-A review, Materials Today: Proceedings, Vol. 60, pp. 1670-1675, 2022.

[6]. A. Mehta, H. Vasudev, S. Singh, C. Prakash, K. K. Saxena, E. Linul, D. Buddhi, J. Xu, Processing and advancements in the development of thermal barrier coatings: a review, Coatings, Vol. 12, No. 9, pp. 1318, 2022.

[7]. R. Vaßen, E. Bakan, D. E. Mack, O. Guillon, A perspective on thermally sprayed thermal barrier coatings: current status and trends, Journal of Thermal Spray Technology, Vol. 31, No. 4, pp. 685-698, 2022.

[8]. K. Torkashvand, E. Poursaeidi, M. Mohammadi, Effect of TGO thickness on the thermal barrier coatings life under thermal shock and thermal cycle loading, Ceramics International, Vol. 44, No. 8, pp. 9283-9293, 2018.

[9]. M. Izadinia, R. Soltani, M. H. Sohi, Effect of segmented cracks on TGO growth and life of thick thermal barrier coating under isothermal oxidation conditions, Ceramics International, Vol. 46, No. 6, pp. 7475-7481, 2020.

[10]. Y.-P. Huang, Z.-Y. Wei, H.-N. Cai, Y. Liu, X.-C. Han, The effects of TGO growth stress and creep rate on TC/TGO interface cracking in APS thermal barrier coatings, Ceramics International, Vol. 47, No. 17, pp. 24760-24769, 2021.

[11]. A. C. Karaoglanli, T. Grund, A. Turk, T. Lampke, A comparative study of oxidation kinetics and thermal cyclic performance of thermal barrier coatings (TBCs), Surface and Coatings Technology, Vol. 371, pp. 47-67, 2019.

[12]. T. Wang, N. Wang, Y. Li, H. Wang, J. Tang, Y. Wang, Study on preparation technologies of thermal barrier coatings, Surface Review and Letters, Vol. 24, No. 04, pp. 1730004, 2017.

[13]. M. S. Sahith, G. Giridhara, R. S. Kumar, Development and analysis of thermal barrier coatings on gas turbine blades–A Review, Materials Today: Proceedings, Vol. 5, No. 1, pp. 2746-2751, 2018.

[14]. S. Vagge, S. Ghogare, Thermal barrier coatings, Materials Today: Proceedings, Vol. 56, pp. 1201-1216, 2022.

[15]. Z. Xue, Y. Zhu, H. Yu, M. Shi, X. Liu, S. Zhang, Nano-agglomerated powder and thermal shock cycling property of 8YSZ nano-structured thermal barrier coating, Surface and Coatings Technology, Vol. 433, pp. 128173, 2022.

[16]. K. P. Jonnalagadda, R. Eriksson, K. Yuan, X.-H. Li, X. Ji, Y. Yu, R. L. Peng, Comparison of damage evolution during thermal cycling in a high purity nano and a conventional thermal barrier coating, Surface and Coatings Technology, Vol. 332, pp. 47-56, 2017.

[17]. A. Mehta, H. Vasudev, S. Singh, Recent developments in the designing of deposition of thermal barrier coatings–A review, Materials Today: Proceedings, Vol. 26, pp. 1336-1342, 2020.

[18]. R. Ghasemi, H. Vakilifard, Plasma-sprayed nanostructured YSZ thermal barrier coatings: thermal insulation capability and adhesion strength, Ceramics International, Vol. 43, No. 12, pp. 8556-8563, 2017.
[19]. S. Tao, J. Yang, F. Shao, H. Zhao, X. Zhong, Y. Zhuang, J. Sheng, J. Ni, Q. Li, S. Tao, Atmospheric plasma sprayed thick thermal barrier coatings: microstructure, thermal shock behaviors and failure mechanism, Engineering Failure Analysis, Vol. 131, pp. 105819, 2022.
[20]. Z. Shen, Z. Liu, R. Mu, L. He, G. Liu, Y–Er–ZrO_2 thermal barrier coatings by EB-PVD: Thermal conductivity, thermal shock life and failure mechanism, Applied Surface Science Advances, Vol. 3, pp. 100043, 2021.
[21]. M. R. J. Sigaroodi, E. Poursaeidi, J. Rahimi, Y. Y. Jamalabad, Heat treatment effect on coating shock resistance of thermal barrier coating system with different types of bond coat, Journal of the European Ceramic Society, Vol. 43, No. 8, pp. 3658-3675, 2023.
[22]. G. Mehboob, M.-J. Liu, T. Xu, S. Hussain, G. Mehboob, A. Tahir, A review on failure mechanism of thermal barrier coatings and strategies to extend their lifetime, Ceramics International, Vol. 46, No. 7, pp. 8497-8521, 2020.
[23]. Z. Shen, G. Liu, R. Mu, L. He, Z. Xu, J. Dai, Effects of Er stabilization on thermal property and failure behavior of Gd2Zr2O7 thermal barrier coatings, Corrosion Science, Vol. 185, pp. 109418, 2021.
[24]. M. Djendel, O. Allaoui, M. Maazouz, R. Boubaaya, Impact of critical plasma spraying parameter (CPSP) on plasma-sprayed Al_2O_3–$3TiO_2$ coatings, Acta Physica Polonica A, Vol. 137, No. 4, pp. 505-508, 2020.

The Performance of Nano-Structured Thermal Barrier Coatings in Thermal Shock Conditions

Afshin Ashofteh

Assistant Professor of Mechanical Engineering/Manufacturing, Mahallat Institute of Higher Education

* a.ashofte@gmail.com

Abstract: Thermal barrier coatings are essential for high-temperature components like turbine blades, as they reduce the heat input to the base superalloy by 100 to 200 Kelvin. This reduction enables operation at higher temperatures, thereby enhancing efficiency. Changing the top layer material presents numerous challenges, including multiple influencing factors, high costs, and complex operating conditions. However, nanostructuring conventional coatings offers a safer, low-risk alternative for performance improvement. This process modifies the coating's structure without altering its material, mitigating many risks associated with new materials. This research investigates the effect of nanostructuring yttria-stabilized zirconia (YSZ) coating on its performance under thermal shock conditions. Conventional and nano-structured YSZ coatings were applied to Inconel 738 disks, and thermal shock tests were conducted using a furnace method. The results demonstrated that the nano-structured coating significantly outperformed the conventional coating.

Keywords: Thermal barrier coatings, Thermal shock, Nanostructure, YSZ, Turbine blades.