

پیش‌بینی عمر تخریب پوشش‌های سد حرارتی نسل جدید تک و دو لایه ZrO_2 - $8Y_2O_3$ / $Gd_2Zr_2O_7$ حرارتی

میلاذ بهامیریان^{۱*}، محسن نوری خضرآباد^۱، محمد ابراهیم پاینده^۱

^۱ گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

(دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۵/۱۷ - پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۶/۲۵)

چکیده

پیش‌بینی عمر تخریب پوشش‌های سد حرارتی بعنوان یکی از چالش‌های مهم در قطعات بخش داغ توربین‌های گازی مطرح است. در این مطالعه به بررسی تنش‌های موثر در تعیین عمر پوشش‌های سد حرارتی نسل جدید تک لایه $(GdZO) Gd_2Zr_2O_7$ و دو لایه $ZrO_2-8Y_2O_3$ (YSZ) / $GdZO$ پرداخته شده است. برای این منظور پوشش‌های سد حرارتی تک لایه $GdZO$ و دو لایه $YSZ / GdZO$ روی $IN738LC / CoNiCrAlY$ به روش پاشش پلاسمای اتمسفری اعمال شدند. سپس رفتار اکسیداسیون سیکلی آن‌ها در دمای $1100^\circ C$ با سیکل‌های ۴ ساعته مورد بررسی قرار گرفت. بررسی‌های ریزساختاری پوشش‌های سد حرارتی (قبل و بعد از اکسیداسیون) توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی انجام شد. علاوه بر این رفتار مکانیکی پوشش‌های سد حرارتی توسط آزمون نانو فرورونده بررسی و سپس تغییرات نرخ آزاد سازی انرژی ناشی از رشد ترک در پوشش‌های سد حرارتی حین سیکل‌های اکسیداسیون محاسبه شد. نتایج نشان داد که تغییرات نرخ آزاد سازی انرژی رشد ترک پوشش سد حرارتی دو لایه $YSZ / GdZO$ نسبت به پوشش سد حرارتی تک لایه $GdZO$ کمتر و در نتیجه عملکرد دما بالای بهتری دارد. بکارگیری یک لایه YSZ مابین دو لایه میانی و بالایی منجر به بهبود خواص مکانیکی پوشش‌های سد حرارتی نسل جدید شده و با افزایش مقاومت به اکسیداسیون سبب افزایش طول عمر آن‌ها می‌شود.

کلمات کلیدی: پوشش‌های سد حرارتی، $Gd_2Zr_2O_7$ ، اکسیداسیون سیکلی دما بالا، آزمون نانو فرورفتگی، تنش.

Failure lifetime prediction of single and dual-layer $ZrO_2-8Y_2O_3$ / $Gd_2Zr_2O_7$ new generation thermal barrier coatings undergoing thermal cycling

Milad Bahamirian^{1,*}, Mohsen Nouri-Khezrabad¹, Mohammad Ebrahim Payandeh¹

¹ Department of Mining and Metallurgical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran

Abstract

Prediction of the failure lifetime of thermal barrier coatings (TBCs) is usually considered as one of the important challenges in the hot section components of gas turbines. In this study, the effective stresses in determining the lifetime of new-generation single-layer $Gd_2Zr_2O_7$ (GdZO) and dual-layer $ZrO_2-8Y_2O_3$ (YSZ) / $GdZO$ TBCs were investigated. For this purpose, single-layer $GdZO$ and dual-layer $YSZ / GdZO$ TBCs were applied on $IN738LC / CoNiCrAlY$ by atmospheric plasma spraying technique. Then, their cyclic oxidation behavior was studied at $1100^\circ C$ with 4-h cycles. The morphologies of the TBCs (before and after oxidation) were investigated by field emission scanning electron microscopy. In addition, the mechanical behavior of the TBCs was examined by the Nanoindentation test. The variation in the energy release rate of the TBCs during oxidation cycles was calculated. The results showed that the changes in the energy release rate of dual-layer $YSZ / GdZO$ TBC compared to single-layer $GdZO$ TBC are less, and, therefore, have a better high-temperature performance. Applying an intermediate YSZ layer between the bond and top coats enhances the mechanical properties of new-generation TBCs and extends their lifetime by improving their resistance to high-temperature oxidation.

Keywords: Thermal barrier coatings; $Gd_2Zr_2O_7$; High-temperature cyclic oxidation; Nanoindentation test; Stress.

*E-mail: m.bahamirian@yazd.ac.ir

۱- مقدمه

پوشش‌های سد حرارتی سیستم‌های چند لایه‌ای هستند که برای ارتقاء عملکرد قطعات بخش داغ توربین‌های گازی استفاده می‌شوند. این پوشش‌ها شامل دو لایه (۱) فلزی میانی و (۲) سرامیکی بالایی هستند که روی زیرلایه فلزی (معمولا از جنس سوپرآلیاژهای پایه نیکل و کبالت) با استفاده از روش‌های پاشش حرارتی اعمال می‌شوند. لایه فلزی میانی معمولا ترکیبی آلیاژی به صورت $M\text{CrAlY}$ (که M می‌تواند نیکل، کبالت یا ترکیبی از این عناصر باشد) است. امروزه زیرکونیای پایدار شده با ایتریا محتوی ساختار بلوری تتراگونال غیر استحاله پذیر و دارای ترکیب ZrO_2 (YSZ) $8\text{Y}_2\text{O}_3$ بعنوان مشهورترین ماده برای بکارگیری در لایه سرامیکی پوشش‌های سد حرارتی مرسوم استفاده می‌شود [۱-۵].

بکارگیری ترکیب YSZ بعنوان لایه سرامیکی بالایی در پوشش‌های سد حرارتی دارای مزایا و معایبی است. این ترکیب دارای مجموعه‌ای از خواص سودمند شامل (۱) مقاومت به خوردگی داغ، (۲) مقاومت به اکسیداسیون دما بالا و همچنین (۳) خواص مکانیکی و (۴) ترمومکانیکی مناسب است. اگرچه این ترکیب معایبی همچون (۱) عدم پایداری فازی مناسب در محدوده‌های دمایی بالاتر از 1200°C و یا سیکل‌های بیش از ۱۰۰۰۰ ساعت و (۲) زینترینگ تسریع شده در دماهای بالا دارد [۳-۶]. در سال‌های اخیر افزایش عمر پوشش‌های سد حرارتی مرسوم بعنوان یکی از زمینه‌های مهم تحقیقاتی مطرح بوده است. استفاده از ترکیب‌های جدید بعنوان لایه سرامیکی بالایی با هدف افزایش عمر پوشش‌های سد حرارتی مرسوم یکی از رویکردهای مهم در این زمینه است [۴].

گادولونیوم زیرکونیم اکساید با ترکیب $\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ (GdZO) و نام تجاری Metco 6041 یکی از کاندیدهای مشهور برای کاربرد در نسل جدید پوشش‌های سد حرارتی است. بکارگیری ۳۳ درصد مولی گادولونیوم در کنار زیرکونیوم منجر به ایجاد هدایت حرارتی کم (0.7 W/mK) و

همچنین پایداری فازی بهتر GdZO نسبت به YSZ در محدوده دمایی 1200°C - 1100°C شده است. محبوبیت روز افزون ترکیب GdZO با خواص منحصر به فرد آن قابل توجه است. هدایت حرارتی کم و پایداری فازی عالی تنها ویژگی‌های منحصر به فرد این ترکیب نیستند. مقاومت به خوردگی در محیط‌های کلسیم - منیزیم آلومینوسیلیکات، مقاومت به خوردگی داغ در محیط‌های سولفات کلسیم - پنتا اکسید وانادیوم، مقاومت به زینترینگ و مقاومت به اکسیداسیون دما بالا به عنوان ویژگی‌هایی برجسته، این ترکیب را از سایر ترکیب‌های رقیب برای جایگزینی YSZ متمایز کرده است [۷-۱۰].

اگرچه ترکیب GdZO دارای ویژگی‌های منحصر به فردی است اما خواص مکانیکی (به ویژه تانفس شکست) و ترمومکانیکی (هماهنگی ضریب انبساط حرارتی با زیر لایه) آن نسبت به YSZ ضعیف‌تر است. مطابق نتایج پژوهش‌های ارائه شده توسط سایر محققین [۹]، بکارگیری یک لایه YSZ مابین لایه GdZO و MCrAlY در پوشش‌های سد حرارتی می‌تواند منجر به بهبود خواص مکانیکی سیستم و رفع این مشکلات شود.

وجود تخلخل‌ها و ریز ترک‌ها در لایه سرامیکی پوشش‌های سد حرارتی به دلیل بکارگیری روش‌های پوشش دهی پاشش حرارتی اجتناب ناپذیر است. تخلخل‌ها و ریز ترک‌ها می‌توانند دو نقش متفاوت در کارایی پوشش‌های سد حرارتی داشته باشند. تخلخل‌ها و ریز ترک‌ها از یک طرف می‌توانند منجر به کاهش هدایت حرارتی سیستم شده و بعنوان مزیت در پوشش‌های سد حرارتی مطرح باشند. از طرف دیگر تخلخل‌ها و ریز ترک‌ها بعنوان مسیرهای آسان نفوذ اکسیژن و نمک‌های خورنده می‌توانند اکسیداسیون و خوردگی داغ را تسریع کنند [۸-۱۰].

نفوذ اکسیژن از طریق تخلخل‌ها و ریز ترک‌های موجود در لایه سرامیکی بالایی و در نتیجه اکسیداسیون لایه فلزی میانی (MCrAlY) منجر به تشکیل لایه‌ای مشهور به TGO^۱ در فصل مشترک لایه فلزی میانی و سرامیکی بالایی

^۱ - Thermal growth oxide

مجموع مهمترین تنش‌های ایجاد شده در سیستم شامل (۱) تنش‌های ناشی از تفاوت در ضرایب انبساط حرارتی لایه‌های فلزی و سرامیکی و (۲) تنش‌های ناشی از رشد لایه TGO و بدون در نظر گرفتن آثار مخرب خوردگی داغ محیط سولفات سدیم - پنتا اکسید وانادیوم و خوردگی ناشی از حملات ذرات کلسیم - منیزیم آلومینو سیلیکات، با هدف تخمین عمر پوشش‌های سد حرارتی تک لایه GdZO و دو لایه YSZ / GdZO بررسی و محاسبه شدند.

۲- روش تحقیق

سوپر آلیاژ پایه نیکل (IN738LC) بعنوان زیرلایه برای ایجاد پوشش‌های سد حرارتی انتخاب شد که آنالیز شیمیایی آن در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. مشخصات سوپرآلیاژ پایه نیکل IN738LC مورد استفاده در این پژوهش

Wt.%	ترکیب	Wt.%	ترکیب
۰/۸	Ti	۷۴	Ni
۰/۰۵	C	۱۴/۵	Cr
۰/۰۱۲	B	۴/۲	Mo
۰/۱	Zr	۶/۳	Al

برای جلوگیری از اثرات لبه، نمونه‌ها به صورت دیسکی - شکل و به قطر ۲۵ mm و ضخامت ۵ mm (شکل ۱) آماده شدند. پودرهای مورد استفاده برای لایه‌های مختلف شامل CoNiCrAlY با کد تجاری Amdry 995C، YSZ با کد تجاری Metco 204NS-G و ترکیب GdZO که به روش هم‌رسوبی سنتز شد، انتخاب شدند. برای اینکه پودر GdZO قابلیت پاشش توسط روش پاشش پلاسمای اتمسفری را داشته باشد فرآیند گرانول سازی توسط اسپری درایر انجام شد. نتایج بررسی سنتز و گرانول سازی پودر GdZO در پژوهش‌های قبلی ارائه شده است [۹، ۱۰].

می‌شود. دو رویکرد متفاوت در مورد تشکیل لایه TGO وجود دارد. تشکیل این لایه (معمولاً با ترکیب آلفا-آلومینا) از یک طرف منجر به افزایش مقاومت به اکسیداسیون زیرلایه شده و از طرف دیگر رشد افراطی آن سبب ایجاد تنش مابین لایه‌های فلزی میانی و سرامیکی بالایی شده و منجر به تسریع در تخریب پوشش‌های سد حرارتی می‌شود [۹].

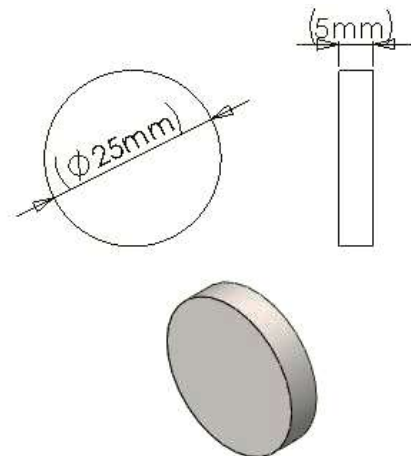
مکانیزم شکست در پوشش‌های سد حرارتی بسیار پیچیده است و معمولاً ترکیبی از چندین مکانیزم در تخریب سیستم دخالت می‌کنند. برخی از مهمترین این مکانیزم‌ها عبارتند از (۱) اختلاف در ضرایب انبساط حرارتی بین لایه‌های میانی و بالایی، (۲) اکسیداسیون لایه میانی و در نتیجه تشکیل و رشد افراطی لایه TGO و انباشت میکرو ترک‌ها حین سیکل حرارتی (۳) زینتریگ لایه سرامیکی بالایی، (۴) خوردگی داغ محیط سولفات سدیم - پنتا اکسید وانادیوم و (۵) خوردگی ناشی از حملات ذرات کلسیم - منیزیم آلومینو سیلیکات. آثار مکانیزم‌های بیان شده معمولاً یا با به وجود آمدن تنش‌های حرارتی - مکانیکی و یا با انجام واکنش‌های شیمیایی مخرب نمایان می‌شوند [۲].

بررسی منشاء و مقدار تنش‌های حرارتی - مکانیکی ایجاد شده در پوشش‌های سد حرارتی می‌تواند گامی موثر در تعیین عمر مفید آن‌ها باشد. امروزه بررسی تغییرات نرخ آزاد سازی انرژی^۲ رشد ترک بر مبنای تنش‌های ایجاد شده بعنوان معیاری در تشخیص عمر پوشش‌های سد حرارتی معرفی شده است [۱۱-۱۳]. بر اساس این معیار تا مادامی که مجموع تنش‌های ایجاد شده کمتر از نرخ آزاد سازی انرژی ناشی از رشد ترک در پوشش‌های سد حرارتی باشد تخریب رخ نخواهد داد [۱۳].

در این پژوهش پوشش‌های سد حرارتی تک لایه GdZO و دو لایه YSZ / GdZO توسط روش پاشش پلاسمای اتمسفری روی زیرلایه IN738LC / CoNiCrAlY اعمال و تحت سیکل‌های حرارتی ۴ ساعته در دمای ۱۱۰۰°C قرار گرفتند. تغییرات نرخ آزاد سازی انرژی رشد ترک بر مبنای

^۲ - Energy release rate

است. برای مثال برای اندازه‌گیری ضخامت لایه TGO در زمان‌های ۲۴، ۴۸، ۹۶، ۱۴۸، ۲۰۰ ساعت، ۲۵ نمونه برای یک نوع پوشش آزمایش شد.



شکل ۱. شماتیک زیرلایه‌های (IN738LC) آماده شده برای اعمال پوشش‌های سد حرارتی.

جدول ۲. پارامترهای مورد استفاده در فرایند پاشش پلاسمای اتمسفری در پژوهش حاضر

پارامتر	لایه‌های بالایی	لایه میانی
Current (A)	۶۲۰	۶۰۰
Voltage (V)	۶۳	۶۰
Primary gas, Ar (l/min)	۳۰	۵۵
Secondary gas, H ₂ (l/min)	۹	۹/۵
Carrier gas, Ar (l/min)	۳	۴/۲
Spray distance (mm)	۱۱۰	۱۴۰
Powder feed rate (g/min)	۱۸	۵۰
Wheel rotation speed (rpm)	۱۰۰	۱۰۰
Traverse speed (rpm)	۱	۱

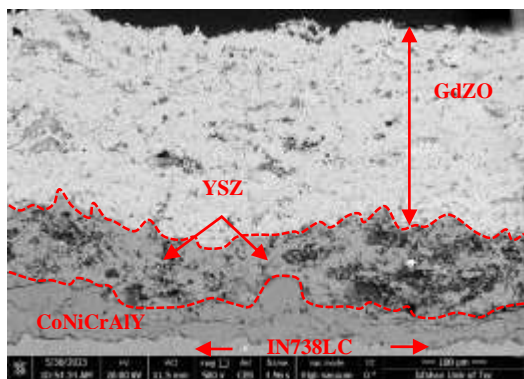
برای مشخصه یابی پوشش‌های سد حرارتی (قبل و بعد از اعمال سیکل‌های حرارتی) از آنالیزهای ارائه شده در جدول ۳ استفاده شد.

جدول ۳. مشخصات تجهیزات مورد استفاده در پژوهش حاضر

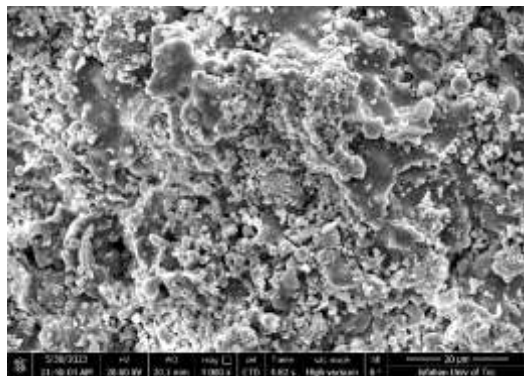
نام دستگاه	مدل	پارامترهای مورد استفاده
میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM)	QUANTA FEG-450; FEI - USA	HV = 25.00 kV
مجهاز به آنالیز EDS		Vac mode: High vacuum
نانو فرورونده*	Agilent Technologies	Max load: 25.00 mN

پوشش‌دهی توسط دستگاه پاشش پلاسمای اتمسفری مجهز به تفنگ Metco F4 انجام شد. سطح زیرلایه قبل از پوشش‌دهی توسط ذرات آلومینا با دانه‌بندی ۸۰ - ۵۰ مش و تحت فشار ۴۰ - ۵۰ psi تحت عملیات سندبلاست قرار گرفته و اکسیدهای سطحی زدوده شده و پس از شستشو در دمای ۹۰°C - ۶۵ پیش‌گرم شدند. در نهایت پوشش‌های CoNiCrAlY / و CoNiCrAlY / GdZO برای YSZ / GdZO به ضخامت تقریبی ۱۰۰ میکرومتر برای لایه میانی و به ترتیب ۵۰ و ۲۵۰ میکرومتر برای لایه‌های YSZ و GdZO روی IN738LC با استفاده از پارامترهای گزارش شده در جدول ۲ اعمال شدند. برای جلوگیری از تاثیر تفاوت در ضخامت لایه‌های میانی و بالایی در رفتار اکسیداسیون دما بالا، در پژوهش حاضر مجموع ضخامت لایه‌ها در پوشش‌های سد حرارتی تک لایه GdZO و دولایه YSZ / GdZO یکسان در نظر گرفته شد.

برای انجام آزمون اکسیداسیون دما بالا نمونه‌ها در یک کوره الکتریکی با اتمسفر هوا در دمای ۱۱۰۰°C به مدت ۲۰۰ ساعت با سیکل‌های ۴ ساعته قرار داده شدند. پس از هر سیکل نمونه‌ها در داخل کوره سرد شدند. مجموع زمان نگهداری نمونه‌ها در دمای ۱۱۰۰°C به ترتیب ۲۴، ۴۸، ۹۶، ۱۴۸ و ۲۰۰ ساعت با هدف بررسی نرخ رشد لایه TGO در نظر گرفته شد. هر یک از داده‌های گزارش شده در مورد تغییرات نرخ رشد لایه TGO میانگینی از نتایج ۵ نمونه



(ب)



(پ)

شکل ۲. تصاویر آنالیز FESEM از سطح مقطع پوشش‌های سد حرارتی (الف) تک لایه GdZO و (ب) دو لایه YSZ / GdZO اعمال شده به روش پاشش پلاسمای اتمسفری، (پ) تصویر سطح لایه GdZO.

وجود تخلخل‌ها و میکروتکرها در ریزساختار پوشش‌های سد حرارتی از جمله ویژگی‌های مرسوم پوشش‌های تولید شده به روش پاشش پلاسمای اتمسفری است [۱۴، ۱۵]. مقدار تخلخل لایه‌های مختلف از سطح مقطع پوشش‌های سد حرارتی تک لایه GdZO و دو لایه YSZ / GdZO توسط نرم افزارهای متالوگرافی به طور تقریبی اندازه‌گیری شد. بر این اساس لایه CoNiCrAlY دارای ۵ - ۳ درصد، لایه YSZ دارای ۱۷ - ۱۵ درصد و لایه GdZO دارای ۱۰ - ۸ درصد تخلخل هستند.

تشکیل میکروتکرها در ریز ساختار لایه‌های سرامیکی به تنش‌های پسماند ایجاد شده طی فرآیند رسوب‌دهی نسبت داده می‌شوند. ذرات رسوب کرده تنش پسماند بالایی دارند. انقباض ذراتی که از حالت مذاب به حالت اسپلت‌های جامد در دمای اتاق کوئنچ شده‌اند و عدم انطباق

Loading rate: 25.00 mN/min	Nanoindenter 6200
Unloading rate: 25.00 mN/min	
Pause: 10.0 s	

* هر یک از داده‌های گزارش شده میانگینی از نتایج ۵ اثر فرورونده در ۵ نمونه مشابه برای هر گروه پوشش در یک زمان خاص است.

۳- نتایج و بحث

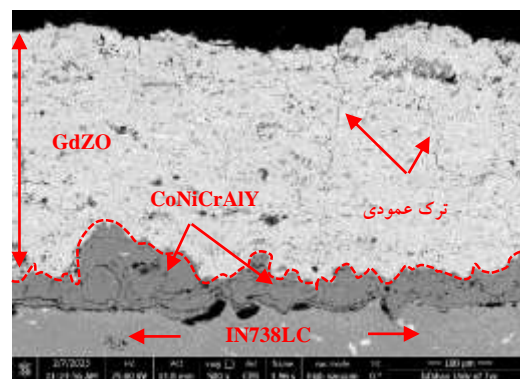
۳-۱- تحلیل میکروساختاری رفتار پوشش‌های سد

حرارتی (قبل و بعد از اعمال سیکل‌های اکسیداسیون)

در شکل ۲ تصاویر FESEM از سطح و سطح مقطع پوشش‌های سد حرارتی تک لایه GdZO و دو لایه YSZ / GdZO / که روی IN738LC / CoNiCrAlY به روش پاشش پلاسمای اتمسفری اعمال شده اند، ارائه شده است.

پوشش سد حرارتی تک لایه GdZO (شکل ۲ الف) شامل یک لایه میانی با ضخامت تقریبی ۱۰۰ میکرومتر و یک لایه بالایی با ضخامت تقریبی ۳۰۰ میکرومتر است. پوشش سد حرارتی دو لایه YSZ / GdZO (شکل ۲ ب) شامل یک لایه میانی با ضخامت تقریبی ۱۰۰ میکرومتر و دو لایه بالایی با ضخامت‌های تقریبی ۵۰ و ۲۵۰ میکرومتر است.

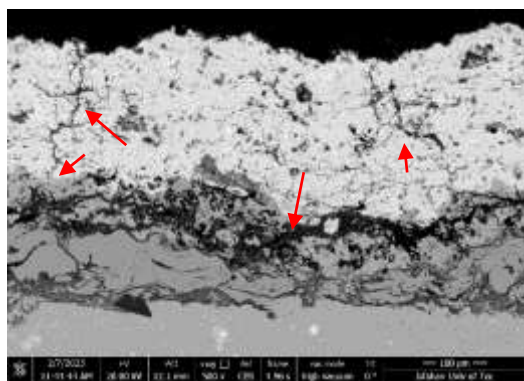
بررسی ریزساختار سطح و سطح مقطع پوشش‌های سد حرارتی تک لایه GdZO و دو لایه YSZ / GdZO (شکل ۲) بیانگر وجود تخلخل‌ها و میکروتکرهایی اغلب در لایه‌های سرامیکی GdZO و YSZ است.



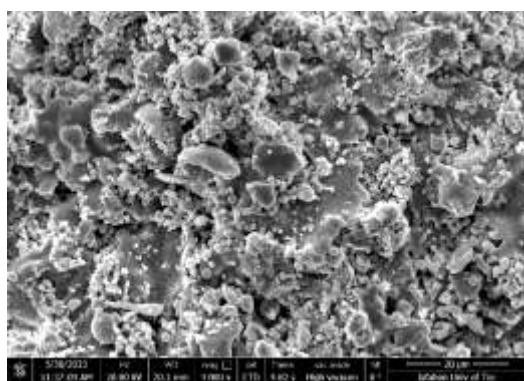
(الف)

از لایه فلزی میانی در پوشش سد حرارتی دو لایه YSZ / GdZO / پس از ۲۰۰ ساعت اکسیداسیون در دمای ۱۱۰۰°C است. شکل ۳ (ب) بیانگر حفظ ساختار لایه بالایی نسبت به حالت اولیه (شکل ۲ (پ)) است.

بررسی شکل ۳ (پ) بیانگر آن است که نه تنها لایه TGO در پوشش سد حرارتی دو لایه YSZ / GdZO تشکیل شده است بلکه اکسیداسیون داخلی^۳ لایه CoNiCrAlY نیز انجام شده است. تشکیل رگه‌های تیره رنگ در تصاویر سطح مقطع پوشش سد حرارتی ارائه شده در شکل ۳ (پ) بیانگر اکسیداسیون داخلی لایه CoNiCrAlY است.



(الف)



(ب)

ضریب انبساط حرارتی لایه‌های سرامیکی و فلزی، دو منبع تولید تنش هستند. به منظور آزاد شدن این تنش‌ها، ترک‌هایی در اسپلت‌های ترد سرامیکی به وجود می‌آید [۱۶].

به طور کلی ساختار ایجاد شده توسط روش پاشش پلاسمای اتمسفری در پوشش‌های سد حرارتی از دو دیدگاه مورد بررسی قرار می‌گیرد:

در دیدگاه اول وجود تخلخل‌ها و میکروتُرک‌هایی (به ویژه میکروتُرک‌های عمودی [۱۷]) با مقدار و توزیع بهینه در لایه سرامیکی پوشش‌های سد حرارتی بعنوان مزیت مطرح هستند. وجود تخلخل‌ها و میکروتُرک‌ها از یک طرف منجر به کاهش هدایت حرارتی سیستم شده و از طرف دیگر حین سیکل‌های حرارتی منجر به کاهش اثرات مخرب ناشی از اختلاف ضرایب انبساط حرارتی لایه‌های سرامیکی و فلزی می‌شوند. وجود تخلخل‌ها و میکروتُرک‌ها به افزایش مقاومت پوشش‌های سد حرارتی در برابر تنش‌های ناشی از انبساط و انقباض لایه سرامیکی حین سیکل‌های حرارتی کمک می‌کند [۱۸، ۱۹].

در دیدگاه دوم وجود تخلخل‌ها و میکروتُرک‌ها در لایه سرامیکی پوشش‌های سد حرارتی بعنوان چالشی مهم و عامل افت خواص دما بالای سیستم مطرح هستند. وجود تخلخل‌ها و میکروتُرک‌ها بعنوان مراکز آسان نفوذ اکسیژن به فصل مشترک لایه‌های سرامیکی بالایی و فلزی میانی مطرح شده و منجر به رشد افراطی لایه TGO خواهند شد. رشد افراطی لایه TGO منجر به ایجاد مراکز تمرکز تنش شده و در نهایت سبب تخریب تسریع شده پوشش‌های سد حرارتی می‌شود. لازم به توضیح است که رشد لایه TGO علاوه بر موارد مذکور به نوع ترکیب، روش پوشش دهی و ریز ساختار لایه میانی نیز وابسته است [۹].

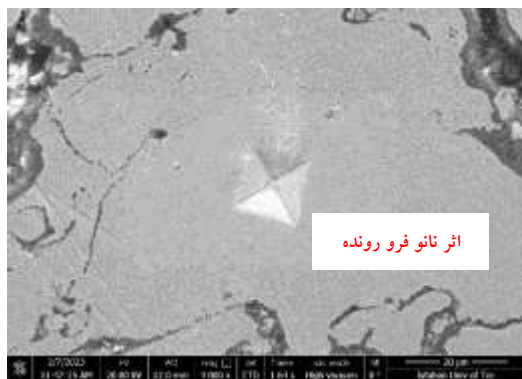
در شکل ۳ تصاویر FESEM از سطح و سطح مقطع پوشش سد حرارتی دو لایه YSZ / GdZO پس از ۲۰۰ ساعت اکسیداسیون در دمای ۱۱۰۰°C ارائه شده است. بررسی شکل ۳ (الف) نشان دهنده جداشدگی لایه سرامیکی بالایی

^۳ - Internal oxidation

این در حالی است که پوشش سد حرارتی تک لایه GdZO پس از ۱۰۰ ساعت اکسیداسیون در دمای 1100°C به طور کامل تخریب شد. تصویر دوربین عکاسی از نمونه تخریب شده در شکل ۵ الف ارائه شده است. همچنین سطح مقطع پوشش سد حرارتی تک لایه GdZO پس از ۱۰۰ ساعت اکسیداسیون در دمای 1100°C در شکل ۵ ب ارائه شده است.



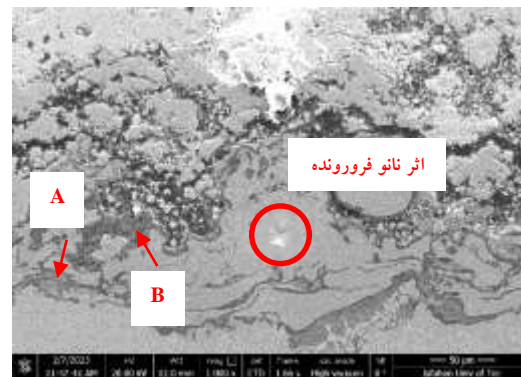
(الف)



(ب)

شکل ۵. (الف) تصویر دوربین عکاسی و (ب) تصویر FESEM از سطح مقطع پوشش سد حرارتی تک لایه GdZO پس از ۱۰۰ ساعت اکسیداسیون در دمای 1100°C .

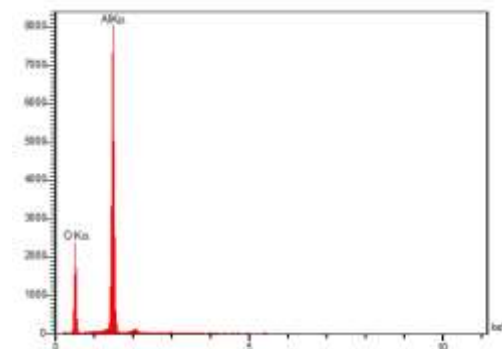
به نظر می‌رسد که مکانیزم تخریب پوشش‌های سد حرارتی تک لایه و دو لایه متفاوت از یکدیگر است. پس از اعمال سیکل‌های حرارتی ترک‌های عمودی در لایه بالایی (لایه GdZO) پوشش سد حرارتی دو لایه گسترش یافته است. با بررسی سطح مقطع پوشش سد حرارتی دو لایه بعد از ۲۰۰ ساعت اکسیداسیون در دمای 1100°C (شکل ۳ الف)) به نظر می‌رسد که میکروتُرک‌های عمودی ایجاد شده ناشی از سیکل‌های حرارتی بعد از برخورد با لایه YSZ متوقف شده‌اند. درحالی‌که در پوشش سد حرارتی تک لایه احتمالاً رشد ترک‌های عمودی و افقی در طی سیکل‌های حرارتی به راحتی انجام شده است. متصل شدن ترک‌های افقی به یکدیگر به همراه گسترش ترک‌های



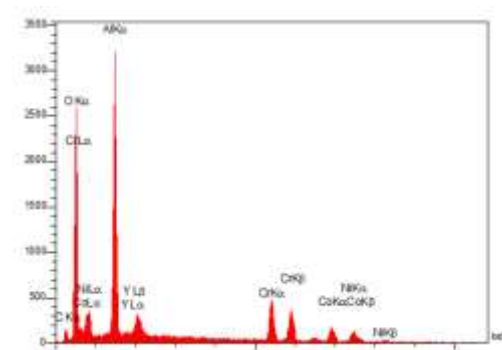
(پ)

شکل ۳. تصاویر آنالیز FESEM از (الف) سطح مقطع و (ب) سطح پوشش سد حرارتی دو لایه YSZ / GdZO پس از ۲۰۰ ساعت اکسیداسیون در دمای 1100°C ، (پ) تصویر شکل ۳ الف) با بزرگنمایی بالاتر.

آنالیز EDS این نواحی عموماً شامل عناصر آلومینیوم، کروم، نیکل و اکسیژن (احتمالاً اسپینل‌های (Ni/Cr)-O) در شکل ۴ ارائه شده است.

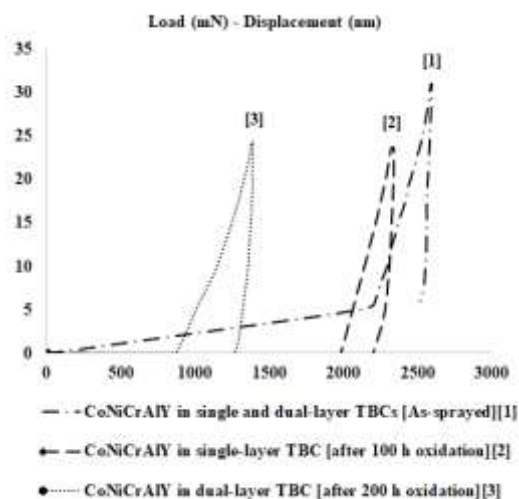


(الف)

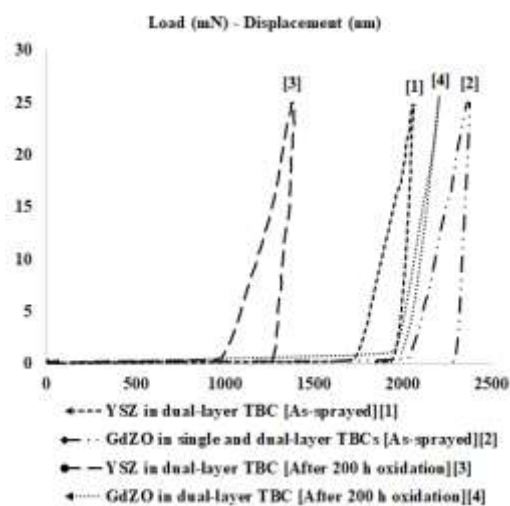


(ب)

شکل ۴. آنالیز EDS از (الف) نقطه A و (ب) نقطه B در شکل ۳ (پ).



(الف)



(ب)

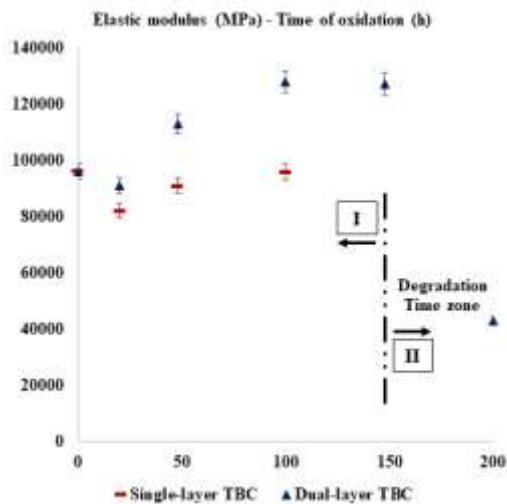
شکل ۶. منحنی نانو فرورونده (قبل و بعد از اکسیداسیون) برای پوشش‌های سد حرارتی تک لایه GdZO / دو لایه YSZ / GdZO، (الف) لایه میانی و (ب) لایه بالایی.

مدول الاستیک لایه‌های سرامیکی YSZ و GdZO در پوشش سد حرارتی دو لایه YSZ / GdZO بعد از اکسیداسیون در دمای 1100°C و به مدت ۲۰۰ ساعت از ۹۶ GPa به ۴۳ GPa (برای GdZO) و از ۱۰۶ GPa به ۹۲ GPa (برای YSZ) کاهش یافته است. کاهش مدول الاستیک پوشش‌های سرامیکی سد حرارتی بعد از اکسیداسیون می‌تواند متأثر از رشد میکروترک‌ها و ایجاد تنش‌های مخرب باشد [۹]. بنظر می‌رسد که علت کاهش

عمودی احتمالاً منجر به تخریب زود هنگام (شکل ۵) پوشش سد حرارتی تک لایه شده است. تفاوت در نوع رشد میکروترک‌ها در پوشش‌های سد حرارتی تک لایه و دو لایه احتمالاً به دلیل بکارگیری لایه YSZ با تافنس شکست بالا مابین دو لایه GdZO و CoNiCrAlY است. اگرچه مطالعات مشابه [۹] در مورد پوشش‌های سد حرارتی تک لایه GdZO، واکنش بین این لایه و لایه TGO حین سیکل‌های اکسیداسیون و تشکیل اکسیدهای ترد و شکننده GdAlO_3 را نیز عاملی برای تخریب زود هنگام معرفی کرده‌اند.

۳-۲- تحلیل مکانیکی رفتار پوشش‌های سد حرارتی (قبل و بعد از اعمال سیکل‌های اکسیداسیون)

در شکل ۶ منحنی‌های نانو فرورونده (Load (mN)- Displacement (nm)) لایه‌های مختلف پوشش‌های سد حرارتی تک لایه GdZO و دو لایه YSZ / GdZO قبل و بعد از اکسیداسیون در دمای 1100°C ارائه شده است. مدول الاستیک لایه CoNiCrAlY در پوشش سد حرارتی تک لایه GdZO بعد از ۱۰۰ ساعت اکسیداسیون از ۷۴ GPa به ۱۶۷ GPa افزایش یافته است. این پدیده می‌تواند ناشی از تشکیل اکسیدهای (Ni/Cr)-O [۹، ۲۰] باشد که با افزایش حجم نیز همراه هستند. افزایش حجم اکسیدهای مذکور سبب ایجاد تنش‌های فشاری شده و مدول الاستیک را افزایش می‌دهد، بعلاوه فازهای اکسیدی خود از مدول الاستیک بالاتری برخوردارند [۲۰]. در پوشش سد حرارتی دو لایه YSZ / GdZO نیز شرایط به همین ترتیب البته با شیب تغییرات نسبتاً کمتر (از ۷۴ GPa به ۱۶۳ GPa) و در طول مدت ۲۰۰ ساعت اکسیداسیون (مدت زمان ۲ برابر بیشتر نسبت به پوشش سد حرارتی تک لایه) است. این پدیده احتمالاً ناشی از نفوذ کمتر اکسیژن و در نتیجه تشکیل مقادیر کمتر اسپینل‌های (Ni/Cr)-O در پوشش سد حرارتی دو لایه YSZ / GdZO باشد. همراستا با پژوهش حاضر، این تفسیر در مطالعات سایر محققین نیز اشاره شده است [۹، ۲۰، ۲۱].



شکل ۷. تغییرات مدول الاستیک حین زمان اکسیداسیون برای لایه بالایی پوشش‌های سد حرارتی تک لایه GdZO و دو لایه YSZ / GdZO

بر اساس بررسی‌های ریزساختاری ارائه شده در شکل ۳ کاهش مدول یانگ در این محدوده زمانی (۲۰۰-۱۴۸ ساعت) احتمالاً وابسته به رشد ترک‌های مخرب در بستر لایه سرامیکی بالایی است. آثار مثبت بکارگیری لایه YSZ ($\alpha \approx 11 \times 10^{-6} \cdot K^{-1}$, $K_{IC} \approx 3.5 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) در دو لایه GdZO و CoNiCrAlY در پوشش‌های سد حرارتی دو لایه YSZ / GdZO در نتایج شکل ۷ مبنی بر بهبود خواص مکانیکی سیستم نیز قابل بررسی است. بنظر می‌رسد که لایه YSZ منجر به توقف رشد ترک‌های مخرب در پوشش سد حرارتی دو لایه YSZ / GdZO و در نتیجه بهبود خواص مکانیکی (جلوگیری از رشد ترک) شده است (مقایسه شکل ۳ و شکل ۵).

با توجه به شکل ۵ به دلیل کندگی بخشی از لایه بالایی GdZO بعد از ۱۰۰ ساعت اکسیداسیون در دمای 1100°C امکان بررسی سطح مقطع آن و بیان کمی کاهش مدول یانگ احتمالی نیست.

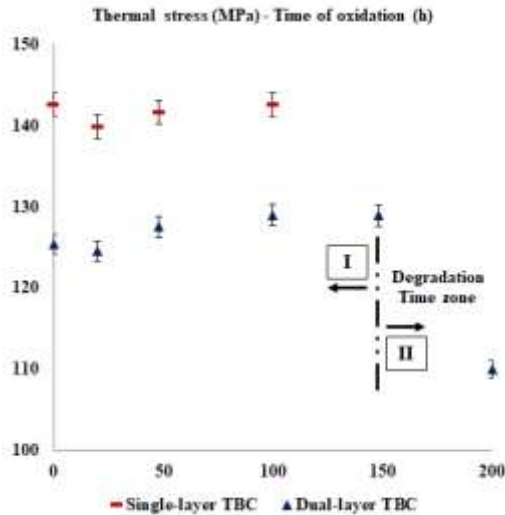
به طور کلی و بر اساس بررسی‌های فازی، میکرو ساختاری و خواص مکانیکی - ترمومکانیکی انجام شده در مورد پوشش‌های سد حرارتی [۲۰] بنظر می‌رسد که آثار (۱) تنش‌های حرارتی (σ_{Th}) ناشی از تفاوت ضرایب انبساط حرارتی لایه‌های میانی فلزی و بالایی سرامیکی و (۲)

مدول الاستیک، شکسته شدن پیوند بین اسپلت‌ها و رشد ترک‌ها است. این نظریه در نتایج سایر محققین نیز اشاره شده است [۹].

یکی از روش‌های بررسی زیتترینگ لایه سرامیکی در پوشش‌های سد حرارتی بررسی تغییرات مدول الاستیک نسبت به زمان حین اعمال سیکل‌های حرارتی است. به طور کلی در پوشش‌های سد حرارتی زیتترینگ لایه سرامیکی بالایی منجر به ایجاد تغییرات ریزساختاری و حذف قابل توجه میکرو تخلخل‌های توزیع شده ناشی از بکارگیری تکنیک پاشش پلاسما می‌شود. این تغییرات ریزساختاری اثر قابل توجهی در افزایش هدایت حرارتی و کاهش تحمل تنش‌های ناشی از انبساط و انقباض لایه سرامیکی حین سیکل‌های حرارتی دارد [۲۰].

در شکل ۷ روند تغییرات مدول الاستیک لایه GdZO نسبت به زمان اکسیداسیون برای پوشش‌های سد حرارتی تک لایه GdZO و دو لایه YSZ / GdZO ارائه شده است. بر اساس نتایج ارائه شده در شکل ۷ در زمان‌های اولیه اکسیداسیون نرخ افزایش مدول یانگ در دو پوشش سد حرارتی تک لایه GdZO و دو لایه YSZ / GdZO نسبت به زمان‌های میانی بیشتر است. این پدیده به دلیل بیشتر بودن سرعت زیتترینگ لایه سرامیکی در زمان‌های ابتدایی نسبت به زمان‌های میانی اکسیداسیون در پوشش‌های سد حرارتی است. علاوه بر این نتایج ارائه شده در شکل ۷ بیانگر کاهش مدول یانگ در محدوده زمانی ۲۰۰-۱۴۸ ساعت برای هر پوشش سد حرارتی دو لایه YSZ / GdZO حین سیکل‌های اکسیداسیون در دمای 1100°C است.

حرارتی نسبت به زمان (شکل ۸) برای پوشش سد حرارتی دو لایه YSZ / GdZO را می‌توان به دو ناحیه تقسیم کرد. در محدوده زمانی ۲۰۰-۱۴۸ ساعت به دلیل رشد ترک‌های مخرب در بستر لایه سرامیکی بالایی (مطابق شکل ۳ الف)) روند تغییرات تنش حرارتی نسبت به زمان متفاوت از محدوده زمانی ۱۴۸-۰ ساعت است.



شکل ۸. تغییرات تنش حرارتی حین زمان اکسیداسیون برای پوشش‌های سد حرارتی تک لایه GdZO / YSZ و دو لایه YSZ / GdZO.

۳-۳- بررسی رفتار رشد لایه TGO حین اکسیداسیون تشکیل لایه TGO با ضخامت کنترل شده یک فاکتور تعیین کننده در عمر پوشش‌های سد حرارتی است. اگرچه رشد افراطی این لایه می‌تواند منجر به آثار مخربی از نظر ایجاد تنش‌هایی در فصل مشترک لایه‌های میانی فلزی و سرامیکی بالایی شود [۹].

در شکل ۹ نتایج تغییرات ضخامت لایه TGO بر حسب زمان اکسیداسیون پوشش‌های سد حرارتی تک لایه GdZO و دو لایه YSZ / GdZO پس از ۱۰۰ و ۲۰۰ ساعت اکسیداسیون در دمای ۱۱۰۰°C ارائه شده است.

تنش‌های ناشی از رشد لایه TGO (σ_{TGO}) مابین لایه میانی فلزی و بالایی سرامیکی حین سیکل‌های اکسیداسیون بعنوان مهمترین عوامل تخریب این پوشش‌ها مطرح باشند. بر این اساس در ادامه به بررسی این تنش‌ها در پوشش‌های سد حرارتی تک لایه GdZO و دو لایه YSZ / GdZO با هدف تعیین نرخ آزاد سازی انرژی ترک و پیش‌بینی عمر آن‌ها پرداخته شده است.

یکی از عوامل مهم در کاهش عمر پوشش‌های سد حرارتی تنش‌های ناشی از عدم تطابق ضرایب انبساط حرارتی لایه سرامیکی با زیر لایه فلزی حین سیکل‌های حرارتی است. تنش‌های حرارتی (σ_{Th}) در پوشش‌های سد حرارتی با استفاده از رابطه ۱ محاسبه می‌شوند [۲۲].

$$\sigma_{Th} = \frac{-E(t, T) (\alpha_{TC} - \alpha_{BC}) \Delta T}{(1 - \nu) \left[1 + 2 \left(\frac{E(t, T)}{E_{BC}} \right) \left(\frac{h_{TC}}{h_{BC}} \right) \right]} \quad \text{رابطه ۱}$$

در این رابطه E مدول الاستیک (نتایج شکل ۷)، α_{TC} (K^{-1}) و α_{BC} ($10^{-6} K^{-1}$) [۲۱] و $[\frac{17}{5} \times 10^{-6}]$ ضرایب انبساط حرارتی لایه سرامیکی بالایی و لایه فلزی میانی، ΔT تغییرات دما (دماهای اکسیداسیون)، ν ضریب پواسون ($0/3$) [۵]، h_{TC} ($300 \mu m$) و h_{BC} ($100 \mu m$) ضخامت‌های لایه سرامیکی بالایی و لایه فلزی میانی هستند.

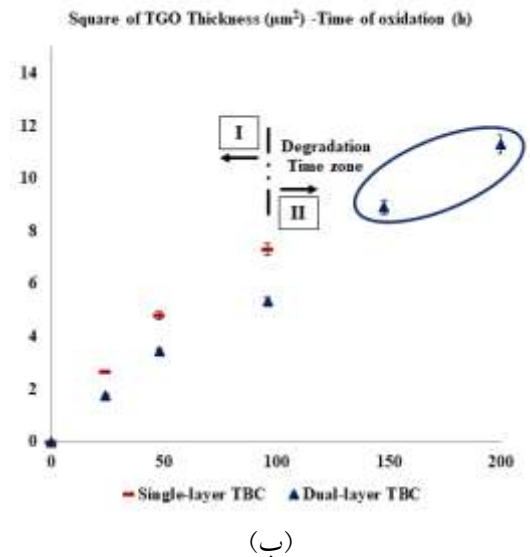
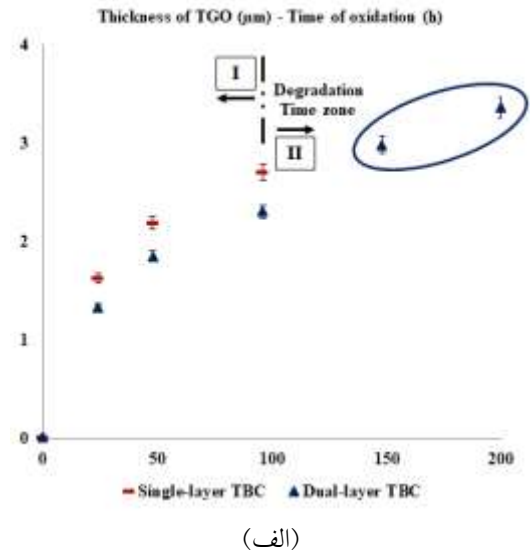
روند تغییرات تنش‌های حرارتی در پوشش سد حرارتی تک لایه GdZO و دو لایه YSZ / GdZO نسبت به زمان اکسیداسیون در شکل ۸ ارائه شده است. این تغییرات بیانگر توزیع تنش‌های حرارتی کمتر در پوشش سد حرارتی دو لایه YSZ / GdZO نسبت به پوشش سد حرارتی تک لایه GdZO حین اعمال سیکل‌های حرارتی است. کاهش تفاوت در ضرایب انبساط حرارتی لایه‌های سرامیکی بالایی و فلزی میانی ناشی از بکارگیری لایه YSZ مابین دو لایه CoNiCrAlY و GdZO در پوشش سد حرارتی دو لایه YSZ / GdZO منجر به آثار مثبت (توزیع تنش‌های حرارتی کمتر) در عملکرد سیستم شده است. روند تغییرات تنش

حسب زمان اکسیداسیون بیانگر آن است که نرخ تغییرات رشد لایه TGO در پوشش سد حرارتی دو لایه YSZ / GdZO نسبت به پوشش سد حرارتی تک لایه GdZO کمتر است. نرخ تغییر ضخامت لایه TGO بعد از ۱۰۰ و ۲۰۰ ساعت اکسیداسیون، در پوشش‌های سد حرارتی تک لایه GdZO و دو لایه YSZ / GdZO به ترتیب $d_{TGO} = 0.2953 (t_{Tmax})^{0.4625}$ و $0.4125 (t_{Tmax})^{0.4236}$ محاسبه و گزارش شد.

تنش‌های ناشی از رشد لایه TGO (σ_{TGO}) در پوشش‌های سد حرارتی با استفاده از رابطه ۲ محاسبه می‌شود [۲۱، ۲۳-۲۵].

$$\sigma_{TGO} = \frac{-E_{TGO} (\alpha_{TGO} - \alpha_{BC}) \Delta T}{(1 - \nu) \left[1 + 2 \left(\frac{E_{TGO}}{E_{BC}} \right) \left(\frac{h_{TGO}}{h_{BC}} \right) \right]} \quad \text{رابطه ۲}$$

در این رابطه E مدول الاستیک (۳۶۰ GPa) [۵]، α_{TGO} ($10^{-6} K^{-1}$) [۵] ضرایب انبساط حرارتی خطی لایه TGO و لایه میانی فلزی، ΔT تغییرات دما، ν ضریب پواسون (۰/۳) [۵]، h_{TGO} (نتایج شکل ۹ الف) و h_{BC} (۱۰۰ μm) ضخامت‌های لایه TGO و لایه میانی فلزی هستند. تنش‌های ناشی از رشد لایه TGO در پوشش‌های سد حرارتی تک لایه GdZO و دو لایه YSZ / GdZO به ترتیب و به طور تقریبی ۰/۸ GPa و ۰/۲۷ GPa محاسبه شد (شکل ۱۰).



شکل ۹. رشد لایه TGO حین زمان اکسیداسیون برای پوشش‌های سد حرارتی تک لایه GdZO و دو لایه YSZ / GdZO در حالت (الف) توان اول و (ب) مربع آن.

همانطور که مشاهده می‌شود در زمان‌های اولیه اکسیداسیون (۲۴ و ۴۸ ساعت) رشد ضخامت لایه TGO با نرخ نسبتاً زیاد انجام شده است (شکل ۹ الف). در فاصله زمانی ۴۸ تا ۱۰۰ (برای پوشش سد حرارتی تک لایه) و ۱۴۸ ساعت (برای پوشش سد حرارتی دو لایه) روند تغییرات نرخ رشد لایه TGO نسبتاً کاهش یافته (با شیب کاهشی افزایش یافته) و در محدوده زمانی ۱۴۸ تا ۲۰۰ ساعت (برای پوشش سد حرارتی دو لایه) به حالت تقریباً یکنواختی نزدیک شده است. مقایسه منحنی‌های تغییرات ضخامت لایه TGO بر

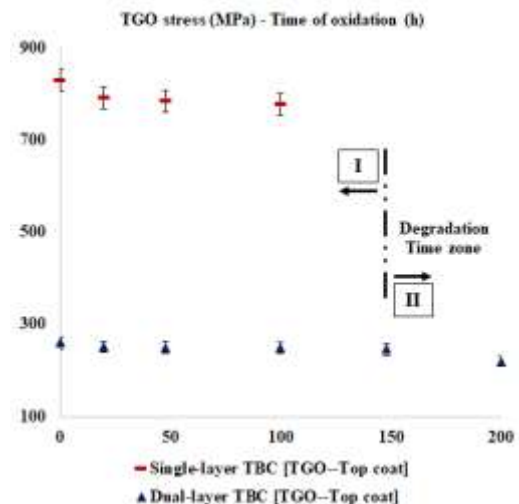
نسبت به پوشش سد حرارتی تک لایه GdZO کمتر است. بنابراین می‌توان انتظار داشت که پوشش سد حرارتی دو لایه YSZ / GdZO مقاومت به اکسیداسیون دما بالای بهتری نسبت به پوشش سد حرارتی تک لایه GdZO داشته باشد.

۴- نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف پیش‌بینی عمر تخریب پوشش‌های سد حرارتی نسل جدید با ترکیب $Gd_2Zr_2O_7$ انجام شده است. برای این منظور پوشش‌های سد حرارتی تک لایه $Gd_2Zr_2O_7$ و دو لایه $ZrO_2-8Y_2O_3 / Gd_2Zr_2O_7$ روی زیرلایه $IN738LC / CoNiCrAlY$ به کمک روش پاشش پلاسمای اتمسفری اعمال شدند. پس از ۲۰۰ ساعت اکسیداسیون در دمای $1100^\circ C$ نتایج زیر بدست آمد:

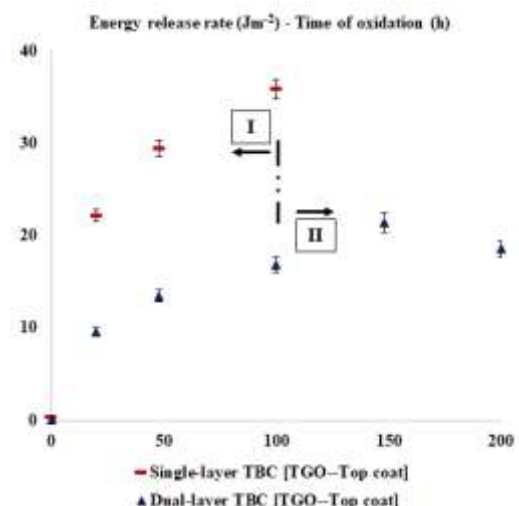
۱- مکانیزم تخریب پوشش‌های سد حرارتی تک لایه $Gd_2Zr_2O_7$ و دو لایه $ZrO_2-8Y_2O_3 / Gd_2Zr_2O_7$ متفاوت است. تخریب پوشش سد حرارتی تک لایه ناشی از رشد افراطی لایه TGO و ترک‌های موجود در بستر پوشش سرامیکی است. این در حالی است که بکارگیری لایه YSZ مابین دو لایه $Gd_2Zr_2O_7$ و $CoNiCrAlY$ منجر به متوقف شدن رشد ترک‌های عمودی شده است. همچنین نرخ رشد لایه TGO را به تاخیر انداخته است.

۲- نرخ آزاد سازی انرژی ناشی از رشد ترک‌های موجود در پوشش سد حرارتی تک لایه $Gd_2Zr_2O_7$ نسبت به پوشش سد حرارتی دو لایه $ZrO_2-8Y_2O_3 / Gd_2Zr_2O_7$ حین سیکل‌های حرارتی بیشتر است. بنابراین شانس تخریب پوشش‌های سد حرارتی تک لایه نسل جدید $Gd_2Zr_2O_7$ نسبت به پوشش سد حرارتی دو لایه $ZrO_2-8Y_2O_3 / Gd_2Zr_2O_7$ بیشتر است.



شکل ۱۰. تغییرات تنش TGO حین زمان اکسیداسیون برای پوشش‌های سد حرارتی تک لایه GdZO و دو لایه YSZ / GdZO.

با استفاده از مدل‌ها و روابط ارائه شده توسط سایر محققین [۱۲، ۱۳، ۲۶، ۲۷]، در شکل ۱۱ تغییرات نرخ آزاد سازی انرژی ترک ایجاد شده نسبت به زمان اکسیداسیون در پوشش‌های سد حرارتی تک لایه GdZO و دو لایه YSZ / GdZO محاسبه و ارائه شده است.



شکل ۱۱. تغییرات نرخ آزاد سازی انرژی ترک حین زمان اکسیداسیون برای پوشش‌های سد حرارتی تک لایه GdZO و دو لایه YSZ / GdZO.

نرخ آزاد سازی انرژی ایجاد شده نسبت به زمان اکسیداسیون در پوشش سد حرارتی دو لایه YSZ / GdZO

- Australian Ceramic Society, vol. 59, (2023), pp. 165–177.
- [9] M. Bahamirian, S. Hadavi, M. Farvizi, A. Keyvani, and M. Rahimipour, "Thermal durability of YSZ / nanostructured $Gd_2Zr_2O_7$ TBC undergoing thermal cycling," *Oxidation of Metals*, vol. 92, no. 5, (2019), pp. 401-421.
- [10] M. Bahamirian, S. Hadavi, M. Farvizi, M. Rahimipour, and A. Keyvani, "Enhancement of hot corrosion resistance of thermal barrier coatings by using nanostructured $Gd_2Zr_2O_7$ coating," *Surface and Coatings Technology*, vol. 360, (2019), pp. 1-12.
- [11] P.-f. Zhao and F.-l. Shang, "Experimental study on the interfacial delamination in a thermal barrier coating system at elevated temperatures," *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, vol. 11, no. 10, (2010), pp. 794-803.
- [12] R. Vaßen, G. Kerkhoff, and D. Stöver, "Development of a micromechanical life prediction model for plasma sprayed thermal barrier coatings," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 303, no. 1-2, (2001), pp. 100-109.
- [13] R. Vaßen, S. Giesen, and D. Stöver, "Lifetime of plasma-sprayed thermal barrier coatings: comparison of numerical and experimental results," *Journal of thermal spray technology*, vol. 18, (2009), pp. 835-845.
- [14] A. Kucuk, C. Berndt, U. Senturk, R. Lima, and C. Lima, "Influence of plasma spray parameters on mechanical properties of yttria stabilized zirconia coatings. I: Four point bend test," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 284, no. 1-2, (2000), pp. 29-40.
- [15] A. Kucuk, C. Berndt, U. Senturk, and R. S. Lima, "Influence of plasma spray parameters on mechanical properties of yttria
- [1] J. G. Thakare, C. Pandey, M. Mahapatra, and R. Mulik, "Thermal barrier coatings—a state of the art review," *Metals and Materials International*, vol. 27, no. 7, (2021), pp. 1947-1968.
- [2] G. Mehboob, M.-J. Liu, T. Xu, S. Hussain, G. Mehboob, and A. Tahir, "A review on failure mechanism of thermal barrier coatings and strategies to extend their lifetime," *Ceramics International*, vol. 46, no. 7, (2020), pp. 8497-8521.
- [3] E. Bakan and R. Vaßen, "Ceramic top coats of plasma-sprayed thermal barrier coatings: materials, processes, and properties," *Journal of Thermal Spray Technology*, vol. 26, no. 6, (2017), pp. 992-1010.
- [4] R. Vaßen, M. O. Jarligo, T. Steinke, D. E. Mack, and D. Stöver, "Overview on advanced thermal barrier coatings," *Surface and Coatings Technology*, vol. 205, no. 4, (2010), pp. 938-942.
- [5] X. Cao, R. Vassen, and D. Stöver, "Ceramic materials for thermal barrier coatings," *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 24, no. 1, (2004), pp. 1-10.
- [6] M. Bahamirian, "A comparative study on phase stability of ZrO_2 -8wt.% Y_2O_3 : nanoparticles and microparticles," *Advanced Ceramics Progress*, vol. 8, no. 2, pp. 53-60, 2022.
- [7] M. Bahamirian, A. Bastani, S. Hasani, M. Farvizi, and A. Seifoddini, " $A_2Zr_2O_7$ (A= La/Gd/Yb): Grain growth effect on phase stability properties at 1300°C," *Ceramics International*, vol. 49, no. 11, A, (2023), pp. 16717-16731.
- [8] M. Bahamirian, "Nanostructured $Gd_2Zr_2O_7$: a promising thermal barrier coating with high resistance to CaO - MgO - Al_2O_3 - SiO_2 corrosion," *Journal of the*

- and Performance, vol. 29, no. 11, (2020), pp. 7080-7093.
- [22] A. Keyvani, M. Saremi, M. H. Sohi, and Z. Valefi, "A comparison on thermomechanical properties of plasma-sprayed conventional and nanostructured YSZ TBC coatings in thermal cycling," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 541, (2012), pp. 488-494.
- [23] A. Reddy, D. Hovis, A. Heuer, A. Paulikas, and B. Veal, "In situ study of oxidation-induced growth strains in a model NiCrAlY bond-coat alloy," *Oxidation of metals*, vol. 67, (2007), pp. 153-177.
- [24] E. Busso, J. Lin, S. Sakurai, and M. Nakayama, "A mechanistic study of oxidation-induced degradation in a plasma-sprayed thermal barrier coating system.: Part I: model formulation," *Acta materialia*, vol. 49, no. 9, (2001), pp. 1515-1528.
- [25] E. Busso, J. Lin, and S. Sakurai, "A mechanistic study of oxidation-induced degradation in a plasma-sprayed thermal barrier coating system.: Part II: Life prediction model," *Acta materialia*, vol. 49, no. 9, (2001), pp. 1529-1536.
- [26] D. Balint, S.-S. Kim, Y.-F. Liu, R. Kitazawa, Y. Kagawa, and A. Evans, "Anisotropic TGO rumpling in EB-PVD thermal barrier coatings under in-phase thermomechanical loading," *Acta Materialia*, vol. 59, no. 6, (2011), pp. 2544-2555.
- [27] M. Ahrens, R. Vaßen, and D. Stöver, "Stress distributions in plasma-sprayed thermal barrier coatings as a function of interface roughness and oxide scale thickness," *Surface and Coatings Technology*, vol. 161, no. 1, (2002), pp. 26-35.
- stabilized zirconia coatings. II: Acoustic emission response," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 284, no. 1-2, (2000), pp. 41-50.
- [16] H. Grünling and W. Mannsmann, "Plasma sprayed thermal barrier coatings for industrial gas turbines: morphology, processing and properties," *Le Journal de Physique IV*, vol. 3, no. C7, (1993), pp. C7-903-C7-912.
- [17] M. Izadina, R. Soltani, M. H. Sohi, and T. Coyle, "Effect of using unpyrolyzed powder on mechanical properties of vertically cracked thermal barrier coatings," *Surface and Coatings Technology*, vol. 459, (2023), p. 129404.
- [18] L. Wang et al., "Influence of pores on the thermal insulation behavior of thermal barrier coatings prepared by atmospheric plasma spray," *Materials & Design*, vol. 32, no. 1, (2011), pp. 36-47.
- [19] I. Golosnoy, A. Cipitria, and T. Clyne, "Heat transfer through plasma-sprayed thermal barrier coatings in gas turbines: a review of recent work," *Journal of thermal spray technology*, vol. 18, (2009), pp. 809-821.
- [20] A. Keyvani, M. Bahamirian, and A. Kobayashi, "Effect of sintering rate on the porous microstructural, mechanical and thermomechanical properties of YSZ and CSZ TBC coatings undergoing thermal cycling," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 727, (2017), pp. 1057-1066.
- [21] M. Bahamirian, S. Hadavi, M. Farvizi, A. Keyvani, and M. Rahimpour, "Microstructure and cyclic oxidation of yttria-stabilized zirconia/nanostructured ZrO_2 9.5Y₂O₃ 5.6Yb₂O₃ 5.2Gd₂O₃ thermal barrier coating at 1373 K," *Journal of Materials Engineering*