فصلنامه‌ی علمی پژوهشی

علم و مهندسی سرامیک

دوره‌ی ۵، شماره‌ی ۲، تابستان ۱۳۹۵

بررسی رفتار انبساط حرارتی پوشش‌های سد حرارتی زیرکونیای پایدار شده با ایتریا و سریا

احمد کیوانی*، میلاد بهامیریان

گروه مهندسی متالورژی و مواد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهرکرد

*Keyvani@eng.sku.ac.ir

اطلاعات مقاله:

دریافت: ۱۳۹۵/۵/۱۰

پذیرش: ۱۳۹۵/۹/۲۰

کلید واژه:

NiCrAlY، YSZ، CSZ، ضریب انبساط حرارتی، پوشش سد حرارتی

چکیده:

در این پژوهش پوشش‌های زیرکونیای پایدار شده با ایتریا (YSZ) و سریا (CSZ) با هدف ارتقای خواص ترمومکانیکی پوشش‌های سد حرارتی بر پایه زیرکونیای پایدار شده با ایتریا از طریق جایگزینی YSZ با CSZ، به روش پاشش پلاسمای اتمسفری (APS) برروی نمونه‌هایی از جنس سوپرآلیاژ پایه نیکل (IN738LC) اعمال شدند. رفتار انبساط حرارتی سوپرآلیاژ IN738LC، NiCrAlY، YSZ و CSZ مورد ارزیابی قرار گرفت. برای تعیین مشخصه‌های ساختاری و فازی پوشش‌ها از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD) استفاده شد. نتایج به دست آمده نشان داد که پوشش CSZ دارای ضریب انبساط حرارتی بالاتری نسبت به پوشش YSZ است. همچنین بررسی‌های ریزساختاری پوشش‌ها نشان داد که پوشش CSZ با ساختاری لایه‌ای و متخلخل تشکیل شده، ولی تخلخل‌های آن نسبت به پوشش YSZ کوچک‌تر و یکنواخت‌تر است.

۱- مقدمه

پوشش‌های سد حرارتی[1]، لایه‌های نازک سرامیکی هستند که وظیفه اصلی این پوشش‌ها کاهش حرارت زیرلایه فلزی (جلوگیری از افزایش دمای زیرلایه فلزی)، در برابر درجه حرارت‌های بالا است [۱]. بعضی از کاربردهای این نوع پوشش‌ها برروی سوپرآلیاژها (IN-738) مانند پره توربین‌های گازی تولید الکتریسیته و یا توربین هواپیما و همچنین اجزای محفظه‌های احتراق است [۲]. از مواد قابل استفاده در TBCها می‌توان زیرکونیا (ZrO_2) را نام برد که به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است و به عنوان ماده مورد استفاده در TBCها بکار گرفته می‌شود زیرا کارآیی خوبی را از خود در کاربردهای دما بالا مانند موتورهای دیزلی و توربین‌های گازی نشان می‌دهد و گزارش‌های زیادی از استفاده آن در موارد فوق در دسترس است. زیرکونیای خالص دارای دو استحاله فازی است و باید

[1] Thermal Barrier Coatings (TBCs)

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-09-11]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1395.5.2.4.6]

به آن توجه نمود استحاله تتراگونال به منوکلینیک در اثر سرد کردن با تغییرات حجمی ۵-۳ درصد همراه بوده که توأم با تخریب است. با اضافه کردن ترکیباتی نظیر CaO، MgO، Y_2O_3 و CeO_2 به ZrO_2 ساختار بلوری تتراگونال در تمام درجه حرارت‌ها پایدار بوده و هیچ گونه تغییر فاز روی نمی‌دهد و به زیرکونیای پایدار شده معروف است [۳ و ۴]. تاکنون ترکیبات متعددی به عنوان پوشش سد حرارتی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. هدایت حرارتی پایین، ضریب انبساط حرارتی بالا و مقاومت به شوک حرارتی به عنوان بهترین خواص مورد نیاز برای پوشش‌های سد حرارتی مطرح هستند. به‌طورکلی عوامل مختلف ازجمله ترکیب شیمیایی، ریزساختار،نوع فاز، چسبندگی به زیرلایه یا پوشش لایه‌میانی[1] و تنش‌های پسماند برروی قابلیت‌های کاری پوشش‌های TBC اثر می‌گذارند. مکانیزم‌های تخریب این نوع پوشش‌ها را به دو گروه می‌توان دسته‌بندی کرد: (الف) مکانیزم داخلی[2] که شامل تف‌جوشی پوشش سرامیکی، رشد لایه TGO[3]، خستگی، چروکیدگی‌های[4] لایه میانی، تخلخل پوشش و تنش‌های پسماند است. (ب) مکانیزم خارجی[5] دومین مکانیزم پیشنهادی است که از جمله مهم‌ترین آن‌ها فرسایش[6]، شکست‌های ناشی از شوک حرارتی، خوردگی داغ نمک‌های سولفات، وانادات و سیلیکات‌های مذاب، و همچنین اکسیداسیون و رشد لایه TGO هستند [۵].

اکسید سریم یا CeO_2 دارای ضریب انبساط حرارتی بالاتر و هدایت حرارتی کمتری نسبت به YSZ بوده و گمان می‌رود افزودن CeO_2 به ترکیب پوشش YSZ در بهبود عمر سیکل حرارتی مؤثر باشد. با افزودن اکسید سریم به YSZ می‌توان قابلیت پذیرش شوک حرارتی پوشش- زیرلایه را افزایش داد. پوشش‌های دوپ شده با سریا دارای مقاومت به شوک حرارتی بهتری هستند زیرا در پوشش‌های $YSZ+CeO_2$ استحاله‌ی فازی منوکلینیک به تتراگونال کمتر رخ می‌دهد [۷-۴]. در زمینه بهبود ترکیب شیمیایی نیز ملاحظه شده، پوشش اخیر از نظر پایداری در دمای بالا، مقاومت به تنش‌های مکانیکی و از نظر خواص عایق حرارتی در شرایط بهتری نسبت به پوشش YSZ قرار دارد [۸]. هدف از انجام پژوهش حاضر، بررسی تغییر ترکیب و استفاده از CSZ به جای YSZ به منظور بهبود خواص ترمومکانیکی پوشش‌های TBC است.

۲- فعالیت‌های تجربی

سوپرآلیاژ اینکونل ۷۳۸ (IN738LC) به صورت دیسکی شکل به قطر ۲۵ mm و با ضخامت ۱۰ mm به عنوان زیرلایه برای اعمال پوشش‌های سد حرارتی به روش پلاسما اسپری و جهت بررسی ریزساختاری و فازی انتخاب شد که آنالیز شیمیایی آن در جدول ۱ ارائه شده‌است. برای تهیه نمونه‌های فلزی، پوشش واسطه فلزی و پوشش سرامیکی به منظور آزمایش انبساط حرارتی ابتدا از آلیاژ اینکونل ۷۳۸ با استفاده از دستگاه برش دقیق، نمونه‌هایی به شکل ورق به ابعاد $۵۰\times۴\times۲mm^3$ تهیه شده و مورد استفاده قرار گرفت. همچنین جهت بررسی رفتار انبساط حرارتی پوشش‌های مذکور، زمینه‌ای از جنس آلومینیم خالص تجاری به شکل ورق به ابعاد $۱۰۰\times۶۰\times۱۰ mm^3$ تهیه شده و مورد استفاده قرار گرفت. قبل

[1] Bond Coat
[2] Intrinsic Mechanisms
[3] Thermal Growth of the Oxide
4 Rumpling
[5] Extrinsic Mechanisms
[6] Erosion

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-09-11]
[DOR: 20.1001.1.23222352.1395.5.2.4.6]

از پوشش‌دهی، تمامی نمونه‌ها (زیرلایه‌های آلومینیومی) تحت عملیات آماده‌سازی سطحی شامل چربی‌گیری، حذف آلودگی‌ها و همچنین زبرسازی سطح نمونه‌ها با استفاده از پاشش ذرات ساینده آلومینا در دستگاه ذره پاشی قرار گرفتند. سپس پوشش‌دهی نمونه‌ها برروی زمینه آلومینیمی جهت بررسی رفتار انبساط حرارتی انجام شد. از هر نوع پوشش ۳ نمونه مجزا با ترکیب مشخص اعمال شد. پودرهای مورد استفاده برای لایه میانی و بالایی به ترتیب پودرهای میکرونی با کد تجارتی Amdry 962 (NiCrAlY)، Metco 204NS-G (YSZ) و Metco 205NS (CSZ) انتخاب شدند. خصوصیت‌های مورد استفاده برای اعمال هر پوشش در جدول ۲ ارائه شده است. پوشش‌های فوق به ضخامت حدود ۲ mm برروی ورق آلومینیمی به روش پاشش پلاسمایی (APS) و با استفاده از دستگاه Sulzer-Metco F4 plasma gun از نوع Plasma-Technick A-3000 ساخت کشور سوئیس اعمال شدند. پس از پوشش‌دهی جهت تهیه نمونه‌های مجزای انبساط حرارتی از پوشش‌های مذکور ابتدا با استفاده از دستگاه برش دقیق، نمونه‌هایی به ابعاد تقریبی $۵۰\times۴\times۴mm^3$ به همراه زمینه آلومینیمی برش خورده و جهت حذف آلومینیم از پوشش‌ها، نمونه‌ها در دمای ۳۵–۲۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱ ساعت در محلول سود NaOH قرار داده شدند. پس از طی این مدت آلومینیم باقیمانده در محلول حل شده و پوشش‌های مجزایی تهیه شد. پس از این مرحله پوشش‌ها آب‌کشی و سپس خشک شدند. قابل توجه است که محلول سود پوشش‌های NiCrAlY و YSZ (ZrO_2-$8\%Y_2O_3$) و CSZ (ZrO_2-$25\%CeO_2$-$2.5\%Y_2O_3$) را تحت تأثیر قرار نمی‌دهد.

جدول ۱- مشخصات سوپرآلیاژ اینکونل (IN738LC)

ترکیب	Ni	Cr	Co	Mo	Al	Ti	C	B	Zr	Nb	Si
درصد وزنی	۷۴	۱۲/۵	۱	۴/۲	۵/۳	۰/۸	۰/۰۵	۰/۰۱۲	۰/۱	۱/۵	۰/۵

جدول ۲- خصوصیت‌های مورد استفاده برای اعمال پوشش لایه میانی و بالایی

Parameter	NiCrAlY	YSZ	CSZ
Current (A)	۶۰۰	۶۵۰	۶۰۰
Voltage (V)	۶۰	۷۰	۶۰
Primary gas, Ar (l/min)	۵۵	۳۵	۵۵
Secondary gas, H_2 (l/min)	۹/۵	۱۰	۱۱
Carrier gas, Ar (l/min)	۴/۲	۳/۵	۴/۲
Spray distance (mm)	۱۴۰	۱۲۰	۱۴۰
Powder feed rate (g/min)	۵۰	۲۰	۵۰
Wheel rotation speed (rpm)	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
Traverse speed (rpm)	۱	۱	۱

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-09-11]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1395.5.2.4.6]

پس از تهیه پوشش‌های مجزا، قبل از آزمایش انبساط حرارتی، نمونه‌ها تحت عملیات پایدارسازی و تنش‌گیری قرار گرفتند، به این صورت که تمامی نمونه‌ها به مدت ۴ ساعت در داخل کوره تحت خلاء ۶-۱۰ mmHg تحت عملیات حرارتی قرار گرفتند. دستگاه مورد استفاده جهت بررسی انبساط حرارتی نمونه‌ها، دیلاتومتر BÄHR-Dilatometer DIL80X ساخت GmbH آلمان از نوع نسبی و از نوع افقی با دقت K-1 ۶-۱۰ × ۰/۱ ± بود. به منظور جلوگیری از اکسیداسیون نمونه‌ها و واکنش‌های دیگر، محیط نگهدارنده نمونه‌ها به میزان ۶-۱۰ mmHg تحت خلاء قرار گرفته و سپس بر اساس استاندارد ASTM E228 [۹]، هر نمونه درون دیلاتومتر با سرعت ۱۰°C/min از دمای محیط تا دمای ۱۱۰۰ °C تحت حرارت قرار گرفت. سپس نمونه به مدت ۱۰ دقیقه در دمای مذکور نگهداری شده و با سرعت ۵ °C/min در درون دستگاه سرد شد. تغییرات طولی هر نمونه نسبت به نمونه مرجع که از جنس کوارتز بود در سیکل گرم و سرد شدن اندازه‌گیری شده و منحنی ازدیاد طول و انبساط حرارتی بر حسب دما توسط دستگاه ترسیم شد. قبل از انجام هر آزمایش دستگاه توسط نمونه استاندارد کوارتز کالیبره شده و سپس مورد استفاده قرار گرفت. جهت انجام آزمایش از هر نوع پوشش سه نمونه آزمایش شد. برای تعیین مشخصه‌های ساختاری و فازی پوشش‌ها از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)[1] و آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD)[2] استفاده شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی ریزساختاری و فازی

شکل ۱ (الف و ب) ریزساختار لایه‌های پوشش TBC معمولی (YSZ و CSZ)[3] را نشان می‌دهد که از لایه واسطه NiCrAlY و پوشش سرامیکی YSZ یا CSZ با ساختاری لایه‌ای و متخلخل تشکیل شده که از ویژگی‌های پوشش‌های پاشش پلاسمایی است. همانطور که در شکل ۱ (ب) دیده می‌شود پوشش سرامیکی CSZ با ساختاری لایه‌ای و متخلخل تشکیل شده ولی تخلخل‌های آن نسبت به پوشش YSZ کوچک‌تر و یکنواخت‌تر است. میزان تخلخل در پوشش‌های NiCrAlY، YSZ و CSZ به ترتیب برابر با ۵-۳ درصد، ۱۳-۱۰ درصد و ۱۰-۸ درصد توسط نرم افزار Image Analysis اندازه‌گیری شد.

آنالیز فازی سطح خارجی پوشش‌های TBC (پس از اعمال پوشش بر روی نمونه‌های IN738LC توسط دستگاه پاشش پلاسمای اتمسفری) در شکل ۲ نمایش داده شده و بر این اساس پوشش YSZ فقط دارای فاز زیرکونیای تتراگونال است. پوشش CSZ نیز دارای فاز زیرکونیای تتراگونال و ترکیب CeO_2 با ساختار مکعبی است.

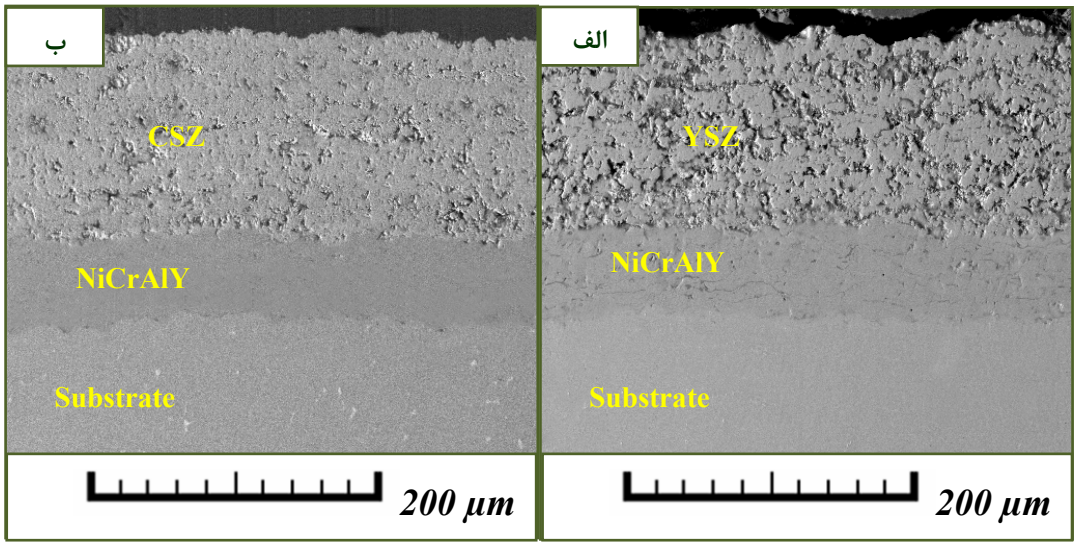
[1] Scanning electron microscopy (SEM, Oxford CAMSCAN- MV2300, UK)

[2] X-ray diffraction (XRD, Philips X'pert) Cu Kα , 40 KV, 30 mA, Step size: 0.02 °

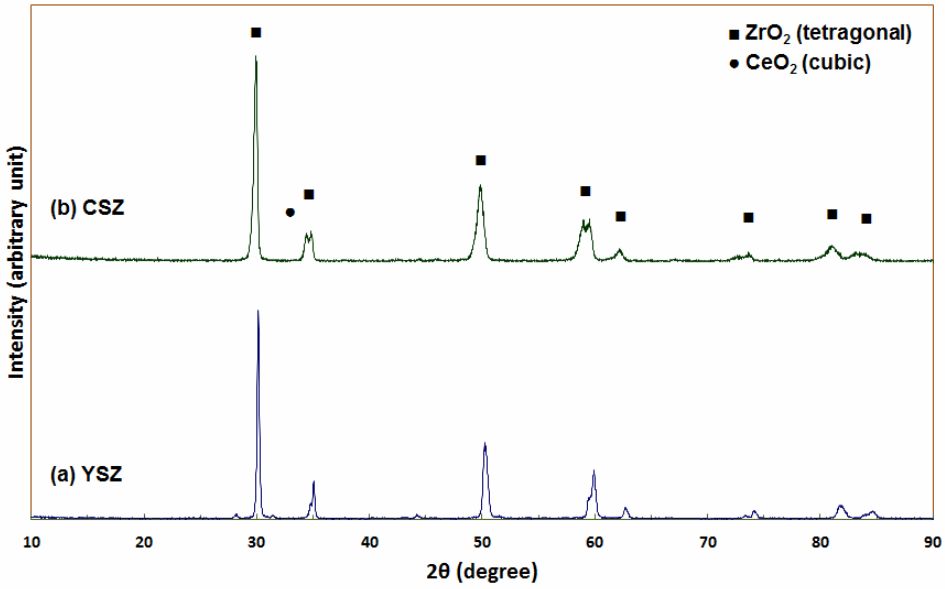
[3] ZrO_2-8%Y_2O_3 and ZrO_2-25%CeO_2-2.5%Y_2O_3

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-09-11]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1395.5.2.4.6]



شکل ۱- تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از سطح مقطع الف) NiCrAlY/YSZ **و ب)** NiCrAlY/CSZ



شکل ۲- آنالیز پراش پرتو ایکس از سطح YSZ **و** CSZ.

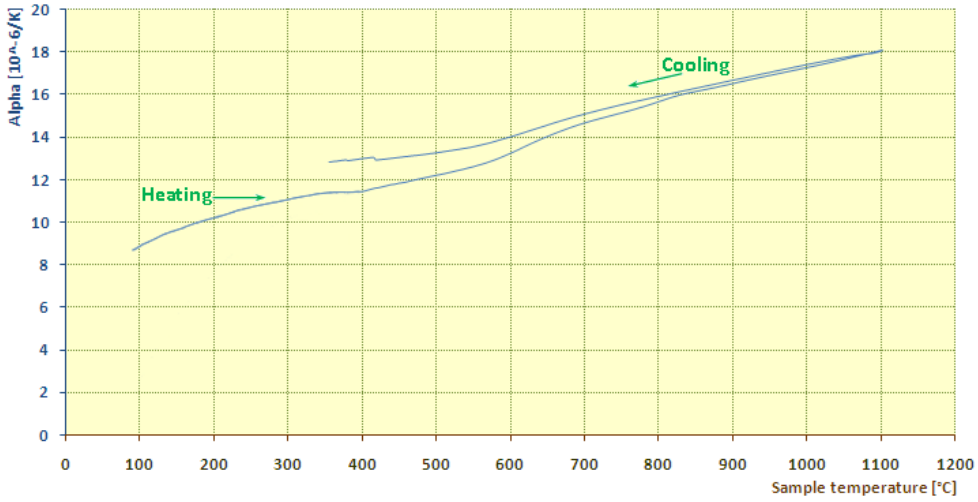
۳-۲- بررسی رفتار انبساط حرارتی

شکل‌های ۳ و ۴ منحنی ضریب انبساط حرارتی (CTE)[1] اینکونل ۷۳۸ و نمونه پوششی لایه میانی NiCrAlY (آماده شده مطابق با توضیحات بخش روش تحقیق) را بر حسب دما نشان می‌دهد.

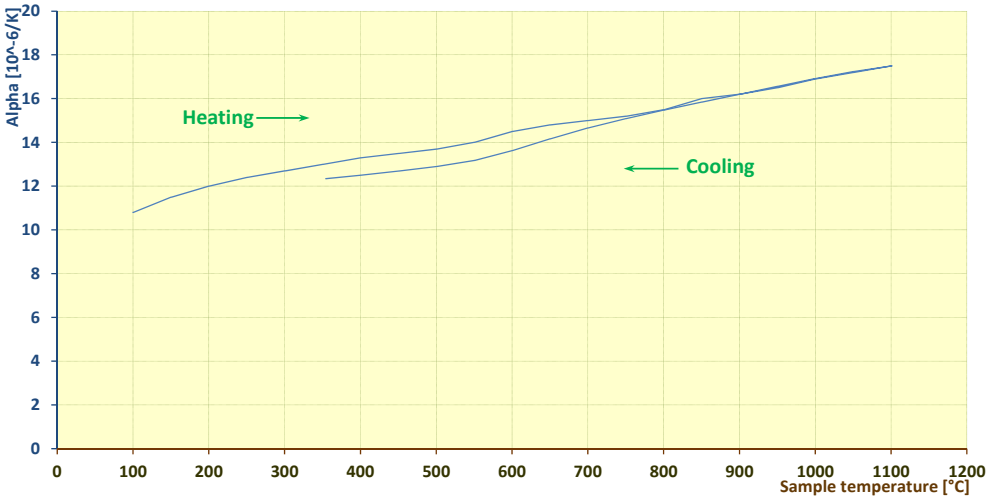
[1] Coefficient of thermal expansion

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-09-11]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1395.5.2.4.6]



شکل ۳- منحنی تغییرات انبساط حرارتی نمونه IN-738 بر حسب دما.

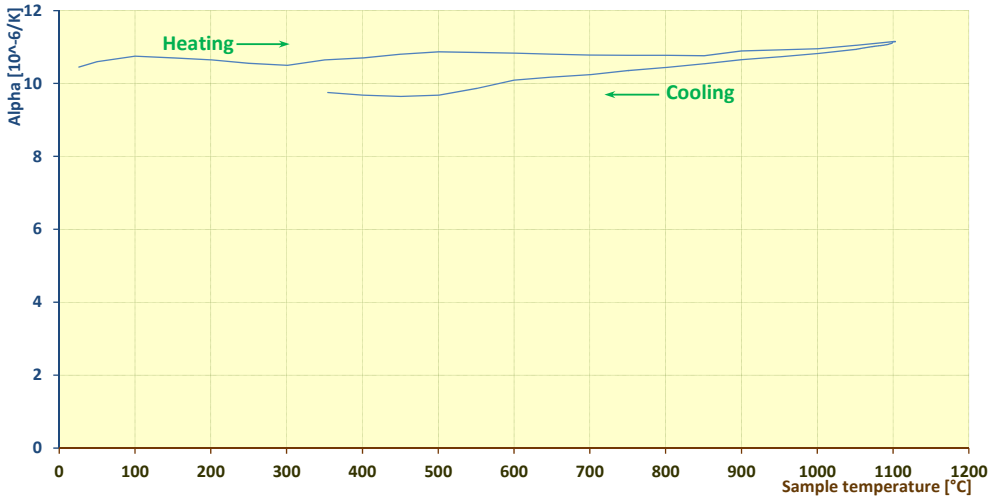


شکل ۴- منحنی تغییرات انبساط حرارتی NiCrAlY بر حسب دما.

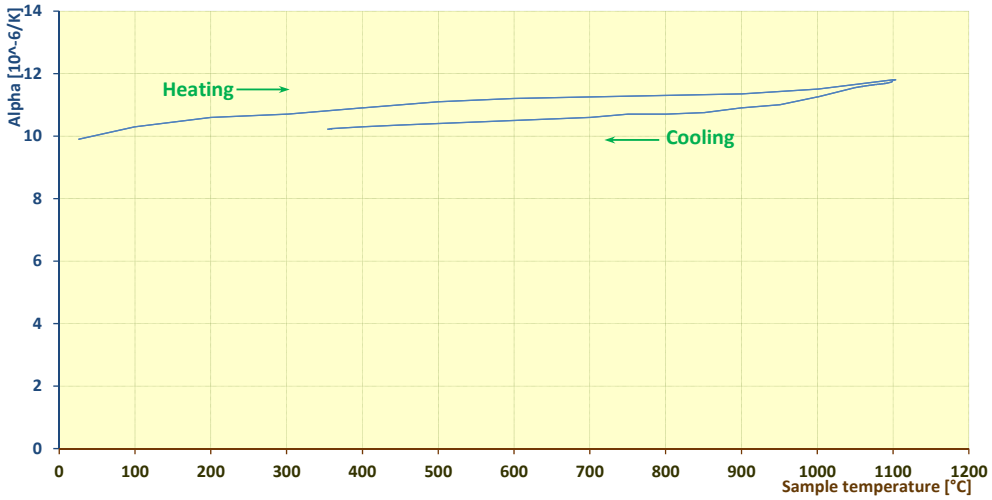
همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود با افزایش دما طول نمونه افزایش می‌یابد. با توجه به شکل ۴ برای NiCrAlY به نظر می‌رسد که منحنی انبساط حرارتی این پوشش تقریباً رفتار خطی را در چرخه‌های گرم و سرد شدن بدون تغییر ناگهانی، نشان می‌دهد. این بیانگر آن است که احتمالاً تغییر فاز قابل توجهی در این پوشش با تغییرات دما ایجاد نمی‌شود. شکل‌های ۵ و ۶ منحنی ضریب انبساط حرارتی YSZ و CSZ را بر حسب دما نشان می‌دهد.

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-09-11]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1395.5.2.4.6]



شکل ۵- منحنی تغییرات انبساط حرارتی YSZ بر حسب دما.



شکل ۶- منحنی تغییرات انبساط حرارتی CSZ بر حسب دما.

منحنی انبساط حرارتی این نمونه‌ها (پوشش‌های YSZ و CSZ) در طی چرخه‌های گرم و سرد شدن تقریباً رفتار خطی از خود نشان می‌دهند بنابراین تغییر فازی در این نمونه‌ها در طی سیکل‌های گرم و سرد شدن ایجاد نمی‌شود. همانطور که آنالیز فازی این نوع پوشش نشان داد، این پوشش‌ها شامل فاز زیرکونیای تتراگونال است که در دمای بالا نیز تغییری در نوع فاز تتراگونال ایجاد نمی‌شود، بنابراین تغییرات حجمی بسیار کمی در پوشش ایجاد شده و در نتیجه تغییر عمده‌ای در رفتار انبساط حرارتی پوشش ایجاد نمی‌کند. ممکن است در دمای بالا و مدت زمان طولانی فاز تتراگونال نیمه پایدار به دو فاز تتراگونال و مکعبی نیز تبدیل شود ولی در این صورت نیز تغییرات حجمی کم است. وجود تخلخل بالا (۱۳-۸ درصد) [۱۰ و ۱۱] در این پوشش‌ها به کاهش بیشتر انبساط حرارتی پوشش کمک می‌کند. مقدار

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-09-11]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1395.5.2.4.6]

تغییر طول این نمونه‌ها در مقایسه با نمونه قبلی همچنان که انتظار می‌رود به دلیل ماهیت سرامیکی پوشش و همچنین وجود معایبی از جمله تخلخل بالا، کمترین مقدار است. با توجه به شکل ۵ دیده می‌شود که برای پوشش YSZ میکرونی تا دمای حدود ۳۰۰ °C ضریب انبساط حرارتی کمی کاهش داشته سپس به حالت معمولی بر می‌گردد که بدلیل وجود جاهای خالی است. در مورد پوشش CSZ می‌توان گفت وجود CeO_2 باعث افزایش ضریب انبساط حرارتی پوشش شده است. همانطور که دیده می‌شود پوشش CSZ میکرونی در موقع گرم و سرد شدن تغییرات کمتری نسبت به پوشش YSZ میکرونی دارد. همان‌طور که از شکل‌های ۳ تا ۶ پیداست ضریب انبساط حرارتی برای اینکونل ۷۳۸، پوشش واسطه (NiCrAlY)، پوشش سرامیکی YSZ و CSZ به ترتیب در محدوده $۸/۵–۱۸ \times ۱۰^{-۶}\ K^{-1}$، $۱۰/۸–۱۷/۵ \times ۱۰^{-۶}\ K^{-1}$، $۱۰/۴۵–۱۱/۱۵ \times ۱۰^{-۶}\ K^{-1}$ و $۹/۹–۱۱/۸ \times ۱۰^{-۶}\ K^{-1}$ است. با توجه به شکل‌های ۵ و ۶ ضریب انبساط حرارتی پوشش‌های YSZ و CSZ از دمای محیط تا دمای ۳۰۰°C در ابتدا افزایش و سپس کاهش پیدا می‌کند که این موضوع در پوشش YSZ واضح‌تر است. با توجه به نتایج چن و همکارانش [۱۲]، در مورد ضریب انبساط حرارتی پوشش زیرکونیا، می‌توان این رفتار را به پدیده کاهش اکسیژن[1] در پوشش‌های سرامیکی پلاسما اسپری نسبت داد. علاوه بر آن وقتی که پوشش زیرکونیا در اتمسفر معمولی گرم می‌شود، اتم‌های اکسیژن به جاهای خالی[2] پوشش اضافه می‌شوند [۱۲]. البته در دماهای بالاتر انبساط حرارتی با افزایش دما به صورت خطی افزایش می‌یابد.

همانطور که در شکل ۶ دیده می‌شود پوشش CSZ دارای ضریب انبساط بالاتری نسبت به پوشش YSZ بوده که با توجه به تحقیقات انجام شده [۷–۵]، می‌توان گفت که CeO_2 دارای ضریب انبساط حرارتی بالاتری نسبت به YSZ است. همچنین نتایج گنگ[3] و همکارانش [۱۳]، نشان دادند که هدایت یونی پوشش‌های CSZ نسبت به پوشش‌های YSZ کمتر بوده که باعث یکنواختی بیشتر افزایش انبساط حرارتی با افزایش دما در حین گرم شدن پوشش شده است.

سریا هدایت حرارتی کمتر و ضریب انبساط حرارتی بیشتری نسبت به زیرکونیا دارا می‌باشد [۵]. زیرکونیای پایدارشده با سریا چقرمگی شکست بالایی دارد. دمای ذوب اکسید سریم در حدود ۳۲۰۰ °C و دمای ذوب ZrO_2 در حدود ۲۷۰۰°C می‌باشد. سریم سنگین‌تر از زیرکونیم بوده و شعاع یونی سریم از شعاع یونی زیرکونیوم بیشتر می‌باشد. با توجه به نتایج محققین هدایت حرارتی با افزایش مقدار CeO_2 کاهش می‌یابد [۱۴]. بنابراین CSZ در مقایسه با YSZ، هدایت حرارتی پایین‌تر و ضریب انبساط حرارتی بالاتری را دارا می‌باشد. در سرامیک‌ها هدایت حرارتی عموماً به وسیله ارتعاش شبکه از طریق ممانعت از انتقال فونون‌ها کنترل می‌شود. بنابراین زمانی که ماده از عناصری با وزن اتمی یا شعاع اتمی بیشتر تشکیل شده باشد، هدایت حرارتی کمتری دارد. زمانی که ماده از محلول جامد با عناصر با عدد اتمی متفاوت و شعاع یونی متفاوت تشکیل شده باشد، هر چه اختلاف بین وزن اتمی مواد بیشتر باشد، هدایت حرارتی

[1] Oxygen loss phenomenon
[2] Vacancies
[3] Gong

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-09-11]
[DOR: 20.1001.1.23222352.1395.5.2.4.6]

کمتر خواهد شد. هدایت حرارتی پوشش ZrO_2-CeO_2، با افزایش مقدار CeO_2 کاهش و ضریب انبساط حرارتی افزایش می‌یابد. کاهش ضریب هدایت حرارتی ترکیبات حاوی اکسید سریم می‌تواند بدلیل اندازه بزرگ Ce^{4+} و پیوند ضعیف Ce^{4+} و O^{2-} باشد [۱۶-۱۴]. نتایج نشان می‌دهد که افزایش CeO_2 به ZrO_2 به صورت کاربردی می‌تواند بعضی خواص TBC را پیشرفت دهد.

۴- نتیجه‌گیری

- پوشش CSZ دارای ساختاری لایه‌ای و متخلخل، ولی تخلخل‌های آن نسبت به پوشش YSZ کوچک‌تر و یکنواخت‌تر است.
- میزان تخلخل برای پوشش‌های NiCrAlY، YSZ و CSZ به ترتیب برابر با ۵-۳ درصد، ۱۳-۱۰ درصد و ۱۰-۸ درصد اندازه‌گیری شد.
- پوشش‌های NiCrAlY، YSZ و CSZ در طی چرخه‌های گرم و سرد شدن تقریباً رفتار خطی از خود نشان می‌دهند بنابراین تغییر فازی در این نمونه‌ها در طی این چرخه‌ها ایجاد نمی‌شود.
- ضریب انبساط حرارتی برای اینکونل ۷۳۸، پوشش واسطه (NiCrAlY)، پوشش سرامیکی YSZ و CSZ به ترتیب در محدوده $۸/۵-۱۸ \times ۱۰^{-۶}\ K^{-1}$، $۱۰/۸-۱۷/۵ \times ۱۰^{-۶}\ K^{-1}$، $۱۰/۴۵-۱۱/۱۵ \times ۱۰^{-۶}\ K^{-1}$ و $۹/۹-۱۱/۸ \times ۱۰^{-۶}\ K^{-1}$ است.

مراجع

[1] G. Di Girolamo, C. Blasi, A. Brentari, and M. Schioppa, "Microstructure and thermal properties of plasma-sprayed ceramic thermal barrier coatings," Journal of Studi & ricerche, Research papers, pp.69-76, (2013).

[2] S. Ahmaniemi, P. Vuoristo, T. Mantyla, F. Cernuschi, L. Lorenzoni, "Modified thick thermal barrier coatings: thermophysical characterization", Journal of European Ceramic Society, Vol. 24, pp. 2669–2679, (2004).

[3] S. V. Joshi, M. P. Srivastava, "On the thermal cycling life of plasma-sprayed yttria-stabilized zirconia coatings", Journal of Surface & Coatings Technology, Vol. 56, pp.215-224, (1993).

[4] V. Kumar, K. Balasubramanian, Progress update on failure mechanisms of advanced thermal barrier coatings: a review, Journal of Progress in Organic Coatings, Vol. 90, pp. 54-82, (2016).

[5] X. Q. Cao, R. Vassen, D. Stoever, "Ceramic materials for thermal barrier coatings", Journal of European Ceramic Society, Vol. 24, pp.1-10, (2004).

[6] J. Zhang, J. Yu, X. Cheng, S. Hou, "Thermal expansion and solubility limits of cerium-doped lanthanum zirconates", Journal of Alloys and Compounds, Vol. 525, pp.78-81, (2012).

[7] H. Zhang, S. Liao, X. Dang, S. Guan, Z. Zhang, "Preparation and thermal conductivities of $Gd_2Ce_2O_7$ and $(Gd_{0.9}Ca_{0.1})_2Ce_2O_{6.9}$ ceramics for thermal barrier coatings", Journal of Alloys and Compounds, Vol. 509, pp.1226-1230, (2011).

[8] C. H. Lee, H. K. Kim, H. S. Choi, H. S. Ahn, "Phase transformation and bond coat oxidation behavior plasma-sprayed zirconia thermal barrier coating", Journal of Surface & Coatings Technology, Vol. 124, pp.1–12, (2000).

[9] ASTM E228-71, "Linear Thermal Expansion of Rigid Solids with a Vitreous Silica Dilatometer", American Society for Testing and Materials, (1998).

[10] A. Keyvani, M. Bahamirian, "Oxidation

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-09-11]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1395.5.2.4.6]

resistance of Al_2O_3 nanostructured/CSZ composite compared to conventional CSZ and YSZ thermal barrier coatings, Materials Research Express, Vol. 3, pp. 1-12", (2016).

[11] A. Keyvani, M. Saremi, M. Heydarzadeh Sohi, 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, pp. 488-494, (2012).

[12] H. Chen, X. Zhou, C. Ding, "Investigation of the thermomechanical properties of a plasma-sprayed nanostructured zirconia coating", Journal of European Ceramic Society, Vol. 23, pp.1449-1455, (2003).

[13] W. B. Gong, C. K. Sha, "Microstructures and thermal insulation capability of plasma-sprayed nanostructured ceria stabilized zirconia coatings", Journal of Surface & Coatings Technology, Vol. 201, pp.3109-3115, (2006).

[14] S. Sodeoka, M. Suzuki, K. Ueno, H. Sakuramoto, T. Shibata, M. Ando, "Thermal and mechanical properties of ZrO_2-CeO_2 plasma-sprayed coatings", Journal of Thermal Spray Technology, Vol. 6(3), pp.361-367, (1997).

[15] K. Ueno, S. Sodeoka, M. Tsutsumi, "Thermal and mechanical properties of CeO_2-4mol%Y_2O_3 partially stabilized ZrO_2 ceramics", Journal of Thermal Spray Society, Vo1. 32, pp.221-226, (1995).

[16] L. Jin, Q. Yu, L. Ni, C. Zhou, "Microstructure and thermal properties of nanostructured 8 wt.% CeO_2 doped YSZ coatings prepared by atmospheric plasma spraying", Journal of Thermal Spray Technology, Vol. 21(5), pp.928-934, (2012).

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-09-11]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1395.5.2.4.6]