



مروری بر پوشش های سد حرارتی جدید، مقایسه خصوصیات و مشخصات

علیرضا فیروزبخت^۱، ملیحه رضاپور^۲، نوشین منصورى نژاد^۳، منصور رضوی^۴

^۱. پژوهشگاه مواد و انرژی (کارشناسی ارشد مهندسی مواد-سرامیک)

^{۲،۳}. پژوهشگاه مواد و انرژی (دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مواد-سرامیک)

^۴. پژوهشگاه مواد و انرژی (استادیار، عضو هیئت علمی)

چکیده

بهبود در عملکرد توربین های گازی نیازمند عملکرد بهتر، عمر و بازده حرارتی بالاتر است. بازده حرارتی در توربین های گازی به طور مستقیم با دمای گاز ورودی رابطه داشته و منجر به افزایش بارهای حرارتی روی قطعات توربین می گردد. به همین منظور پوشش های سد حرارتی جهت محافظت از قطعات توربین استفاده می شود. مواد مورد استفاده برای پوشش های سد حرارتی باید مجموعه ای از خواص از قبیل مقاومت به خوردگی داغ بالا، مقاومت به سایش بالا، رسانایی حرارتی پایین و ضریب انبساط حرارتی متناسب با زیرلایه را شامل شوند تا تحت شرایط کاری بحرانی بازده مورد نظر را داشته باشند. لازم به ذکر است که وجود این خواص به تنهایی در یک ماده امکان پذیر نیست و به منظور تامین خواص مختلف از سیستم های دو یا چندلایه استفاده میشود که میتوان به سیستم های $La_{1.7}Dy_{0.3}Zr_2O_7$ ، $La_2Ce_2O_7$ ، $La_2Zr_2O_7$ و... اشاره کرد. انتخاب مواد مناسب برای پوشش های سد حرارتی بدلیل نیاز به ویژگی های ذکر شده و همچنین بدلیل نیاز به عدم ایجاد اسحاله فازی در دماهای بین دمای اتاق تا دمای کاری، پایداری شیمیایی، چسبندگی خوب به زیرلایه فلزی، محدود میشود. در این مقاله ضمن معرفی این پوشش ها به بیان و مقایسه مشخصات آنها پرداخته میشود.

واژه های کلیدی: پوشش های سد حرارتی جدید؛ سیستم های دولایه؛ YSZ.

^۱. alireza_f_1988@yahoo.com

مقدمه

در توربینهای گازی، برای دستیابی به راندمان بالاتر موتور، افزایش درجه حرارت داخلی گاز، مورد نیاز می باشد، در حالیکه درجه حرارت اجزای سازنده فلزی پره های توربین نباید به میزان زیادی افزایش یابد [۱]. چنین پوششهای سپر حرارتی در معرض سیکلهای حرارتی دما بالا قرار میگیرند. پوششهای سد حرارتی به صورت وسیع در توربین های گازی برای محافظت از قطعات توربین در درجه حرارت بالا استفاده میشود. برای راندمان بالاتر توربین، پوششهای سد حرارتی پایدارتر نیاز است. بهبود در عملکرد توربین های گازی نیازمند عملکرد بهتر، عمر و بازده حرارتی بالاتر است [۲]. استفاده از سوپرآلیاژهای پایه نیکل پیشرفته به عنوان پره های توربین با مشکلاتی رو به رو است و هیچ ماده ای نمی تواند در شرایطی که شامل تنش های حرارتی و مکانیکی، خوردگی و سایشی است مقاومت از خود نشان دهد. به همین منظور پوشش های سد حرارتی جهت حفاظت از قطعات توربین استفاده می شود. پوششهای سد حرارتی پیشرفته در مواجهه با دماهای سطحی بالاتر از ۱۴۰۰ سانتیگراد، شامل لایه های گوناگونی حتی تا ۵ لایه نیز هستند [۳]. امروزه به منظور ایجاد پوشش های سد حرارتی روی قطعات از دو روش^۱ APS و^۲ EB-PVD استفاده می شود [۴]. زیرکونیا پایدار شده با ایتریا^۳ (YSZ) و مخصوصاً ZrO₂ با ۸ درصد بیشترین کاربرد را به دلیل هدایت حرارتی کم ($2/1 \text{ W.m}^{-1}.\text{k}^{-1}$)، ضریب انبساط حرارتی نسبتاً بالا ($11 \times 10^{-6} \text{ k}^{-1}$) خنثی بودن از لحاظ شیمیایی در محیط های احتراقی، جهت پوشش دهی قطعات توربین استفاده میشود. اما این ماده نمیتواند به مدت طولانی در دماهای کاری بالاتر از ۱۴۷۳ درجه کلوین راندمان مورد نظر را داشته باشد [۵]. در دماهای بالاتر، فاز تتراگونال t' به تتراگونال و مکعبی (t+C) تبدیل می شود. طی سرمایش، فاز t به فاز مونوکلینیک تبدیل می گردد. افزایش حجم ناشی از تغییرات فازی منجر به ایجاد ترک در پوشش می گردد [۶ و ۷]. به منظور غلبه بر محدودیت YSZ و دست یابی به اهداف مورد نظر، تحقیقات مختلفی جهت بررسی مواد جدید به عنوان کاندیدهای با هدایت حرارتی پایین، دمای کاری بالا، مقاومت به خوردگی داغ و پایداری فازی حتی در دمای بالا صورت گرفته است. انتخاب مواد به عنوان سدهای حرارتی با توجه به برخی عوامل از جمله نقطه ذوب بالا، هدایت حرارتی پایین، ضریب انبساط حرارتی مطابق با زیرلایه فلزی، عدم استحاله فازی بین دمای اتاق و دمای کاری، پایداری شیمیایی، چسبندگی خوب به زیرلایه فلزی و نرخ زینترینگ پایین و ریزساختار متخلخل صورت می گیرد [۸]. با توجه به موارد ذکر شده، موادی که می توان به عنوان پوشش های سد حرارتی از آن ها استفاده کرد محدود می گردد. هیچ ماده ای به تنهایی این قابلیت ها را نداشته و نمی تواند به تنهایی تمام این ویژگی را در برداشته باشد، از این رو از سیستم های دو یا چند لایه استفاده می شود. به منظور غلبه بر ضعف و معایب YSZ تحقیقات بسیاری در دهه اخیر به منظور شناسایی موادی جدید از جمله آلومینا، مولایت، TiO₂، CaO/MgO + ZrO₂، CeO₂+ YSZ، سلیکات

¹ Atmosphere plasma spray

² Electron beam- physical vapor deposition

³ Yttria - stabilized zirconia

ها، آلومینات لانتانیم، زیرکن، کامپوزیت فلز-شیشه و $(Ca/Mg)Zr_4-(PO_4)_6$ به منظور استفاده به عنوان پوشش های سد حرارتی انجام گرفته است [۹].

در این پژوهش به بررسی انواع مختلف پوشش های سد حرارتی جدید و مقایسه خواص آن ها بایکدیگر پرداخته خواهد شد. در بین موادی که قابلیت استفاده شدن به عنوان پوشش سد حرارتی را دارند می توان به موادی که دارای ساختار هرمی^۱ بوده و علاوه بر آن نقطه ذوب بالایی دارند مانند زیرکونات لانتانیم ($La_2Zr_2O_7$, LZ) اشاره کرد. این گروه از پوشش های سد حرارتی دارای هدایت حرارتی کمتری نسبت به YSZ بوده و دارای ساختار هرمی مکعبی پایدار تا نقطه ی ذوب (۲۳۰۰ درجه سانتیگراد) است [۱۰]. اگرچه ضریب انبساط حرارتی پایین LZ ها منجر به ایجاد تنش حرارتی بین پوشش و پوشش میانی شده و تافنس شکست را کاهش می دهد. با توجه به اینکه CeO_2 دارای ضریب انبساط حرارتی بالایی است، می توان اینگونه استباط نمود که ضریب انبساط حرارتی LZ ها با افزودن CeO_2 افزایش یابد. تاکنون در مورد تاثیر افزودن CeO_2 بر LZ ها مطالعه ای صورت نگرفته و در همین راستا Zhenhua Xu و همکارانش به بررسی پوشش های $La_2(Zr_{0.7}Ce_{0.3})_2O_7$, LZ7C3 پرداخته و نتایج پوشش ایجاد شده به روش EB-PVD را این گونه گزارش کرده اند که بخش اعظم پوشش ایجاد شده LZ با ساختار هرمی بوده که حاوی مقادیر کمی از $LC(La_2Ce_2O)$ نیز با ساختار فلوریتی است. نتایج حاصله نشان داد LZ7C3 از پایداری حرارتی بالایی برخوردار بوده و پس از آنیل شدن تا دمای ۱۵۷۳ درجه سانتیگراد به مدت ۱۴۴ ساعت، هیچگونه تغییر فازی مشاهده نشد. نتایج حاصل از بررسی ضریب انبساط حرارتی LZ، LZ7C3 و YSZ در شکل ۱ نشان داده شده است، همانطور که مشاهده می شود در محدوده دمایی ۱۲۷۳-۷۷۳ درجه سانتیگراد ضریب انبساط LZ7C3 معادل $10^{-6} k^{-1}$ است که بیشتر از ضریب انبساط LZ و تقریباً معاد ضریب انبساط حرارتی YSZ است که این افزایش ضریب انبساط حرارتی در LZ7C3 را می توان به اندازه ی بزرگ یون Ce^{+4} و پیوند ضعیف O^{2-} و Ce^{4+} نسبت داد. در واقع افزایش ضریب انبساط حرارتی در LZ7C3 نسبت به LZ موجب کاهش احتمال ترک در پوشش فوقانی می گردد. از دیگر نتایج حاصل شده می توان به هدایت حرارتی LZ7C3 اشاره کرد که معادل $0.87 W.m^{-1}.k^{-1}$ بوده که حدوداً ۶۰ درصد کمتر از YSZ است که این کاهش هدایت حرارتی به طور قابل توجهی دمای پوشش میانی و زیرلایه را کاهش می دهد. تصاویر میکروسکوپ الکترونی پوشش ایجاد شده از حاکی از آن است که به دلیل اکسیداسیون غیر عادی پوشش لایه میانی و همینطور تنش های فشاری ناشی از سرد شدن موجب ایجاد ترک در پوشش می گردد که در شکل ۲ قابل مشاهده است. در تحقیقات دیگری از تحقیقات صورت گرفته در مورد سیستم پوشش های سد حرارتی Shimei He و همکارانش یک سیستم دولایه $La_2(Zr_{0.7}Ce_{0.3})_2O_7/8YSZ$ را با کمک روش EB-PVD روی سطح زیرلایه ایجاد کردند. نتایج بررسی ها انجام شده روی پوشش های ایجاد شده حاکی از آن است که YSZ و $La_2(Zr_{0.7}Ce_{0.3})_2O_7$ سازگاری شیمیایی

^۱ pyrochlore

خوبی جهت تشکیل پوشش های دو لایه دارند. این پوشش های دو لایه عمر بیشتری نسبت به هریک YSZ از یا $\text{La}_2(\text{Zr}_{0.7}\text{Ce}_{0.3})_2\text{O}_7$ دارند. نرخ زینترینگ پایین برای $\text{La}_2(\text{Zr}_{0.7}\text{Ce}_{0.3})_2\text{O}_7$ ، ضریب انبساط مشابه $\text{La}_2(\text{Zr}_{0.7}\text{Ce}_{0.3})_2\text{O}_7$ با YSZ و ضریب انبساط حرارت مشابه YSZ با TGO، حالت رشد منحصر به فرد ستونی در پوشش های دو لایه باعث افزایش طول عمر پوشش می گردد [۱۲ و ۱۱ و ۵]. در دماهای کاری بالا (۱۳۰۰ درجه سانتیگراد به بالا) موادی با ساختار هرمی و ترکیب $\text{A}_2\text{B}_2\text{O}_7$ خواص قابل توجهی در مقایسه با YSZ از خود نشان می دهند، مخصوصاً هدایت حرارتی پایین تر که توجه خاصی رو به خود جلب کرده است. همین پایداری حرارتی عالی که می تواند ناشی از موقعیت ثابت کاتیون ها در بلور باشد یکی دیگر از ویژگی های مواد با ساختار هرمی است. در میان این مواد LZ ها علی رغم خواصی خوب از جمله پایداری حرارتی تا دمای ۲۰۰۰ درجه سانتیگراد، نرخ زینتر شدن و هدایت حرارتی پایین که دارند، ضریب انبساط حرارتی پایین تری نسبت به YSZ دارند، به همین دلیل به منظور بهبود خواص پوشش از سیستم های دو لایه جهت پوشش دهی زیر لایه ها استفاده می شود. همانطور که در شکل ۳ مشاهده می گردد یک سیستم دو لایه $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7/\text{YSZ}$ جهت پوشش دهی زیر لایه استفاده شده است که تلفیقی از تافنس مناسب و تقریباً نزدیک به تافنس لایه میانی در کنار نرخ زینترینگ پایین و پایداری حرارتی بالا است. R. Vaben و همکارانش به این نتیجه رسیدند که سیستم های دو لایه مواد با ساختار هرمی و YSZ قابلیت پایداری در دمای بالا از خود نشان داده و خواص بهتری نسبت به تک لایه YSZ داشته و در نتیجه عمر کاری بالاتری خواهد داشت. نتایج تست burner rig در مقایسه پوشش های تک لایه و چند لایه و همچنین مقایسه $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ و $\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ با لایه میانی NiCoCrAlY و سوپرآلیاژ IN738 به عنوان زیر لایه نشان داد که تحت شرایط سیکل حرارتی (۵ دقیقه حرارت دهی و ۲ دقیقه سرد کردن) وجود تخلخل حتی به میزان کم (۱۲٪) عمر پوشش را در دماهای بیش از ۱۳۵۰ درجه کلوین به شدت کاهش میدهد. و همچنین نشان داده شده است که YSZ تک لایه بدلائیل ذکر شده عملکرد پایین تری را برای کاربرد بعنوان پوشش سد حرارتی از خود نشان میدهد. با مقایسه $\text{YSZ}/\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ و $\text{YSZ}/\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ که هر دو دارای ساختار هرمی بوده با این تفاوت که $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ با استفاده از اسپری درایر آماده و پوشش داده شده در حالی که $\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ به صورت تجاری و بدون آماده سازی استفاده شده است، نتایج نشان داد که $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ رفتار بهتری از خود نشان می دهد که می توان این را ناشی از نوع مورفولوژی و نوع ترکیب پوشش دانست [۱۳ و ۱۴].

در کنار پوشش های سد حرارتی مطرح شده، می توان به لانتانیم هگزآلومینات (LTA) $\text{LaTi}_2\text{Al}_9\text{O}_{19}$ به عنوان یک پوشش سد حرارتی جدید نام برد که می تواند خواص پوشش ها را بهبود بخشد. Xiaoyun Xie و همکارانش در یک طرح تحقیقاتی به بررسی پوشش های LTA و خواص آن به عنوان یک پوشش سد حرارتی پرداختند و نتایج حاصل حاکی از آن است که این دسته از پوشش های سد حرارتی تا دمای بالاتر از ۱۶۰۰ درجه سانتیگراد از خود پایداری فازی نشان داده اند. از دیگر ویژگی های مطلوب این پوشش ها هدایت حرارتی و ضریب انبساط حرارتی قابل مقایسه آن ها با YSZ است که به ترتیب عبارتند از $1-1/3 \text{ W.m}^{-1}.\text{k}^{-1}$ و

10^{-6} k^{-1} $\times 11/2 - 8$. نتایج تحقیقات نشان داد که پوشش های LTA دارای سختی تقریباً 7 GPa است که نزدیک به سختی YSZ بود اما از طرفی دیگر تافنس شکست آن مواد کمتر از YSZ است. پایین تر بودن تافنس شکست LTA ها موجب شده تا به جای استفاده از سیستم تک لایه، از سیستم دولایه LTA/YSZ استفاده کرد که خواصی بهتر نسبت به سیستم تک لایه LTA دارند. نتایج مربوط به نمونه ی LTA نشان داد که این نمونه در دمای 1373 درجه سانتیگراد 300 سیکل را تحمل کرده در حالی که پوشش LTA/YSZ در همین دما 3000 سیکل را تحمل میکند [15-17].

علاوه بر مواد گفته شده برای پوشش های سد حرارتی از سیستم $(\text{La}_{1.7}\text{Dy}_{0.3}\text{Zr}_2\text{O}_7)\text{LDZ}$ استفاده میشود. تحقیقات نشان داد که ترکیبات LDZ در مقایسه با 8YSZ/ پایدارتری فاز ی بهتر، هدایت حرارتی پایین تری را از خود نشان داده اند. الگوی XRD پوشش های LDZ در شکل 5 نشان میدهد که این پوشش ها تنها از فاز LZ تشکیل میشوند و هیچ گونه فاز اضافی وجود ندارد و مشاهده میشود که تحت حرارت دهی تا دمای 1773 درجه کلوین هیچ گونه تغییر فاز رخ نمیدهد و پوشش های LDZ از نظر حرارتی پایدار می باشند. هدایت حرارتی در دمای 1573 درجه کلوین $0.9719 \text{ w.m}^{-1}.\text{k}^{-1}$ گزارش شده است. که چندین برابر کمتر از 8YSZ است. همچنین LDZ خواص ضد خوردگی و عایقی بهتری نسبت به 8YSZ دارد و این نوع پوشش ها در دماهای بین 1573 تا 1773 درجه کلوین محافظ های کارآمدی برای زیرلایه هستند [18]. در نهایت خواص پوشش های ذکر شده در جدول 1 ارائه شده است.

نتیجه گیری

- 1) در سیستم دوتایی $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7/\text{YSZ}$ اگرچه $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ دارای ضریب انبساط حرارتی کمتری نسبت به YSZ است اما از طرفی هدایت حرارتی کمتری دارد و میتوان یک سیستم دولایه از این مواد پوششی با خواص مطلوب ایجاد کرد.
- 2) باتوجه به اینکه CeO_2 دارای ضریب انبساط حرارتی بالایی است، افزودن این ماده به $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ ضریب انبساط حرارتی آن را افزایش می دهد.
- 3) پوشش های $\text{La}_2(\text{Zr}_{0.7}\text{Ce}_{0.3})_2\text{O}_7$ و $\text{La}_{1.7}\text{Dy}_{0.3}\text{Zr}_2\text{O}_7$ خواصی به مراتب مطلوب تر از پوش های YSZ دارند.
- 4) به طور کلی و باتوجه به پژوهش های صورت گرفته می توان گفت پوشش های سد حرارتی جدید دارای خواص مطلوب تری نسبت به پوشش های سد حرارتی رایج از جمله YSZ ها هستند.

مراجع

1. X.Q. Cao, R. Vassen, D. Stoeber, "Ceramic materials for thermal barrier coatings", *Journal of the European Ceramic Society*, 24, 2004,1–10
2. David R. Clarke , Matthias Oechsner , and Nitin P. Padture ,Guest Editors, "Thermal-barrier coatings for more efficient gas-turbine engines " *journal of material advanced society*,10 ,2012,1-9
3. Hongfei Chen,Yun Liu, Yanfeng Gao, Shunyan Tao,and Hongjie Luo,"Design, Preparation, and Characterization of Graded YSZ/La₂Zr₂O₇ Thermal Barrier Coatings", *journal of American ceramic society*, 93,2010,1732-1740
4. J. Singh, D. E. Wolfe," Review Nano and macro-structured component fabrication by electron beam-physical vapor deposition (EB-PVD)", *journal of material science*,40 ,2005, 1–26
5. Z.H. Xu , L.M. He , R.D. Mu, S.M. He, G.H. Huang , X.Q. Cao," Double-ceramic-layer thermal barrier coatings based on La₂(Zr_{0.7}Ce_{0.3})₂O₇/La₂Ce₂O₇ deposited by electron beam-physical vapor deposition", *Journal of Alloys and Compounds* ,256,2010,3661-3668
6. Zhenhua Xu,*, Shimei He, Limin He, Rende Mu, Guanghong Huang, Xueqiang Cao," Novel thermal barrier coatings based on La₂(Zr_{0.7}Ce_{0.3})₂O₇/8YSZ double-ceramic-layer systems deposited by electron beam physical vapor deposition", *Journal of Alloys and Compounds*, 509, 2011, 4273–4283
7. O. Yu. and V. G. Konakov," Phase evolution in Zirconia based systems ", *journal of advanced material science*,36,2014,177-190
8. G.Moskal," characteristics of microstructure and properties, generation and directions of development of bond", *journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*,37,2009,323-332
9. Wen Ma , Shengkai Gong , Huibin Xu , Xueqiang Cao," The thermal cycling behavior of Lanthanum–Cerium Oxide thermal barrier coating prepared by EB–PVD", *journal of Surface and Coatings Technology* ,20 ,2006, 5113 – 5118
10. sophie B and Weber Hilde,"Lanthanium Zirconium thermal barrier coatings deposited by spray pyrolysis", *journal of surface and coatings technology*,227,2013,10-14
11. Zhenhua Xuc, Limin He,*, Xinghua Zhong ,Rende Mu, Shimei He, Xueqiang Cao," Thermal barrier coating of lanthanum–zirconium–cerium composite oxide made by electron beam-physical vapor deposition, *Journal of Alloys and Compounds*, 478, 200) 168–172
12. Wen Ma , Shengkai Gong , Huibin Xu ,, Xueqiang Cao," Thermal barrier coating bonded by (Al₂O₃–Y₂O₃)/(Y₂O₃-stabilized ZrO₂) laminated composite coating prepared by two-step cyclic spray pyrolysis", *journal of Surface and Coatings Technology* ,200, 2006, 5113 – 5118
13. Robert Vaßen, Maria Ophelia Jarligo, Tanja Steinke, Daniel Emil Mack, Detlev Stöver," Overview on advanced thermal barrier coatings", *journal of Surface and Coatings Technology*, 205 ,2010,938–942
- 14 .B. Saruhan*, P. Francois, K. Fritscher, U. Schulz," EB-PVD processing of pyrochlore-structured La₂Zr₂O₇-based TBCs", *journal of Surface and Coatings Technology* 182 ,2004, 175–183
15. Junqi Yao , Yedong He , Deren Wang , Hui Peng, Hongbo Guo , Shengkai Gong , " Thermal barrier coating bonded by (Al₂O₃–Y₂O₃)/(Y₂O₃-stabilized ZrO₂)

laminated composite coating prepared by two-step cyclic spray pyrolysis”, *Journal of Corrosion Science*, 80, 2014, 37–45

16. C. Friedrich, R. Gadow, and T. Schirmer, ” Lanthanum Hexaaluminate—a New Material for Atmospheric Plasma Spraying of Advanced

Thermal Barrier Coatings”, *Journal of Thermal Spray Technology*, 10, 2001, 592-598

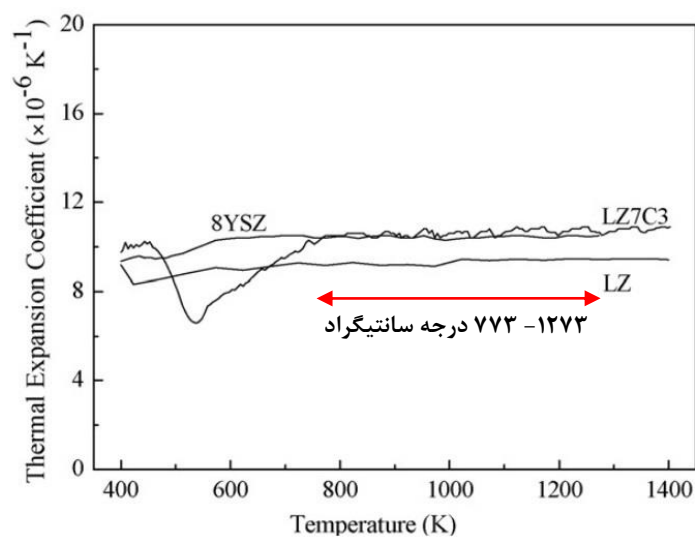
17. Alexander L. Vasiliev , Nitin P. Padture , Xinqing Ma, ” Coatings of metastable ceramics deposited by solution-precursor

plasma spray: I. Binary ZrO_2 – Al_2O_3 system”, *Journal of Acta Materialia*, 54, 2006, 4913–492

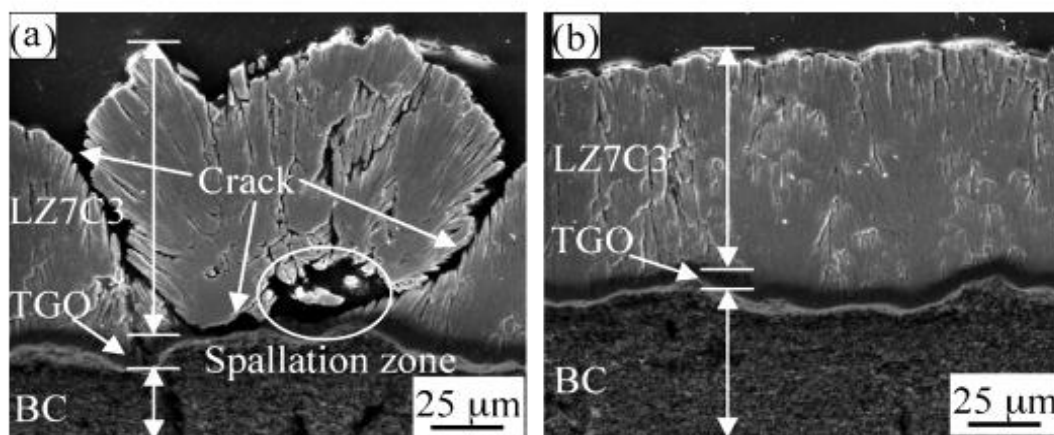
18. Xueying Wang, Shengnan Guo, Lili Zhao, Yongping Zhu, Li Ai, ” A novel thermal barrier coating for high-temperature applications “, *Journal of Ceramics International*, 42, 2016, 2648–2653

جدول ۱: خواص پوشش های سد حرارتی جدید

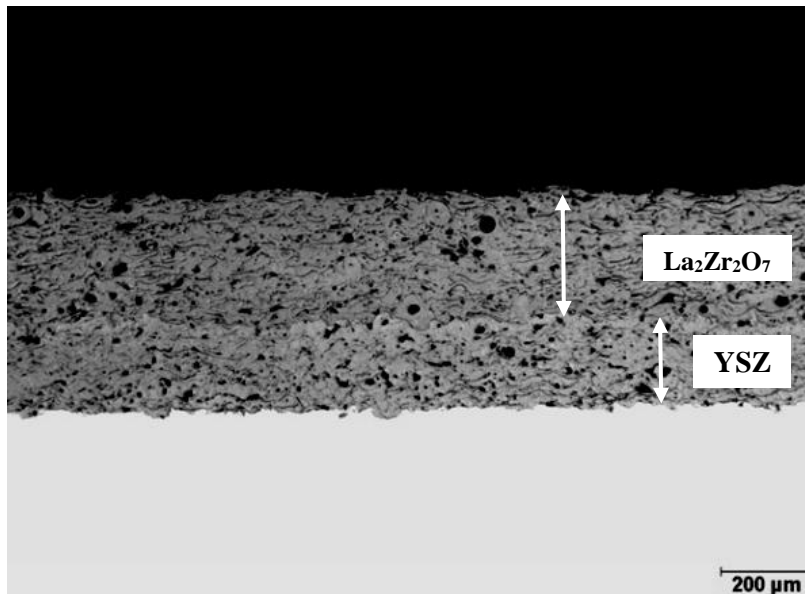
| نوع پوشش / خواص | نقطه ذوب (درجه سانتیگراد) | ضریب انبساط حرارتی ($\times 10^{-6} \text{ k}^{-1}$) | هدایت حرارتی ($\text{W.m}^{-1}.\text{k}^{-1}$) |
|---|---------------------------|--|--|
| YSZ | ۲۶۸۰ | ۱۱ | ۲/۱ |
| $\text{La}_2(\text{Zr}_{0.7}\text{Ce}_{0.3})_2\text{O}_7$ | - | ۱۰/۶۶ | ۰/۸۷ |
| $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ | ۲۳۰۰ | ۹/۱ | ۱/۵۶ |
| $\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ | ۲۱۰۰ | ۱۰/۴ | ۱/۶ |
| $\text{LaTi}_2\text{Al}_9\text{O}_{19}$ | ۱۹۰۰ | ۸-۱۱/۲ | ۱-۱/۳ |
| $\text{La}_{1.7}\text{Dy}_{0.3}\text{Zr}_2\text{O}_7$ | - | ۸/۹ | ۰/۹۷۱۹ |



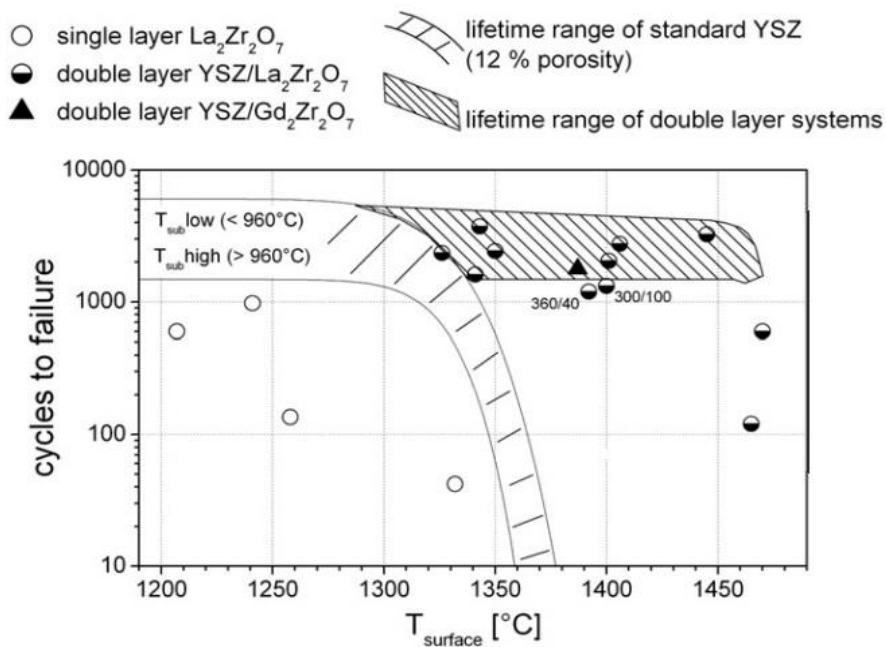
شکل ۱: مقایسه بین ضریب انبساط حرارتی به عنوان تابعی از دما برای ۸YSZ و LZ، LZ7C3.



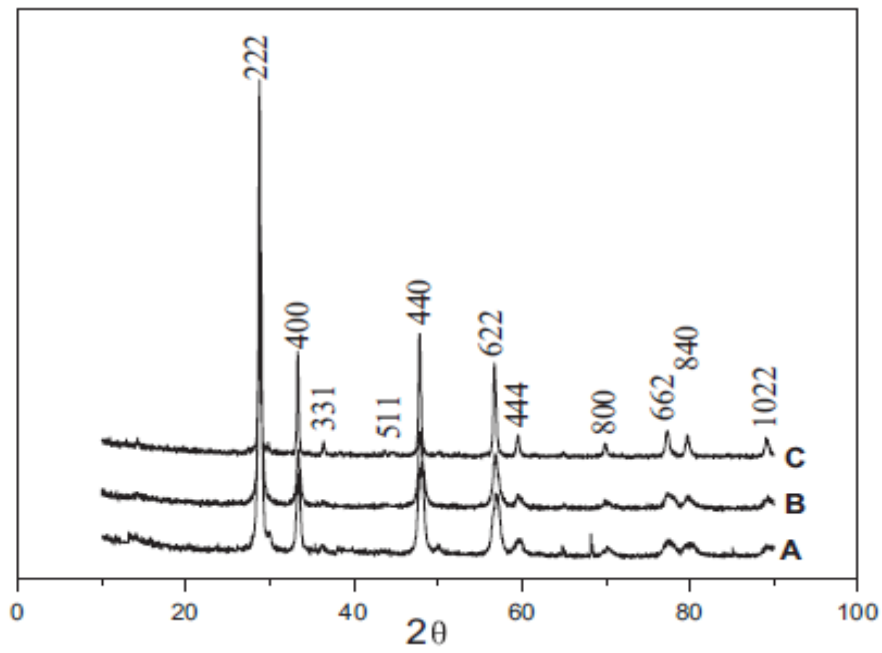
شکل ۲: تصاویر مربوط به میکروسکوپ الکترونی مربوط به پوشش LZ7C3.



شکل ۳: تصویر مربوط به میکروسکوپ الکترونی مربوط به سیستم دولایه $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7/\text{YSZ}$.



شکل ۴: نتایج تست burner rig و تعیین سیکل حرارتی سیستم های سد حرارتی.



شکل ۵: الگوی XRD پوشش LDZ (A) الگوی XRD پوشش LDZ در دمای ۱۵۷۳ و ۱۷۷۳ درجه کلوین. (B و C)