



بررسی مکانیزم خوردگی داغ پوشش سد حرارتی زیر کونیای پایدار شده با سریا

میلاذ بهامیریان^۱، احمد کیوانی^۲، محمدرضا یزدانی^۳، علی شمسی پور^۴

۱. دانشجوی دکتری مهندسی مواد، پژوهشگاه مواد و انرژی، ایران.

۲. استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی مواد، دانشگاه شهرکرد، ایران.

۳. کارشناسی ارشد مهندسی مواد، شرکت صنایع فولاد توان آور آسیا، ایران.

۴. کارشناسی ارشد مهندسی مواد، شرکت مهندسین مشاور و بازرسی طوبی تاک، ایران.

چکیده

در این پژوهش پوشش‌های NiCrAlY/YSZ و NiCrAlY/CSZ با هدف ارتقای مقاومت به خوردگی داغ پوشش‌های سد حرارتی بر پایه YSZ از طریق جایگزینی YSZ با CSZ ، به روش پاشش پلاسمای اتمسفری (APS) بر روی نمونه‌هایی از جنس سوپرآلیاژ پایه نیکل (IN738LC) اعمال شد. رفتار خوردگی داغ پوشش‌های اعمالی به روش کوره‌ای در مخلوط نمک‌های $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-V}_2\text{O}_5$ و در دمای ۱۰۵۰ درجه سانتیگراد مورد بررسی قرار گرفت. برای تعیین مشخصه‌های ساختاری و فازی پوشش‌ها قبل و بعد از آزمایش خوردگی داغ از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM/EDS) و آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD) استفاده شد. نتایج به دست آمده نشان داد که پوشش‌های NiCrAlY/CSZ مقاومت به خوردگی داغ بهتری نسبت به پوشش‌های NiCrAlY/YSZ دارند. این پدیده بر حسب تفاوت در ریزساختار و تغییرات ریزساختاری صورت پذیرفته در مدت زمان آزمایش خوردگی داغ توضیح داده می‌شود.

واژه‌های کلیدی: پوشش سد حرارتی؛ خوردگی داغ؛ پلاسماسپری؛ NiCrAlY/CSZ ؛ NiCrAlY/YSZ

¹ - m.bahamirian@gmail.com

مقدمه

پوشش‌های TBC یا سد حرارتی، 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 پوشش‌ها بر روی سوپر آلیاژها (IN-738) مانند پره توربین‌های گازی تولید الکتریسته و یا توربین هواپیما و همچنین اجزای محفظه‌های احتراق است [۲، ۳]. 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 به آن توجه نمود استحاله تتراگونال به مونوکلینیک در اثر سرد کردن با تغییرات حجمی ۳-۵ درصد همراه بوده که توأم با تخریب است. با اضافه نمودن ترکیباتی نظیر MgO ، CaO ، Y_2O_3 و CeO_2 به ZrO_2 ساختار کریستالی تتراگونال در تمام درجه حرارت‌ها پایدار بوده و هیچ گونه تغییر فازی نمی‌دهد و به زیرکونیای پایدار شده معروف است [۴]. تاکنون ترکیبات متعددی به عنوان پوشش سد حرارتی مورد استفاده قرار گرفته‌اند که از میان آنها زیرکونیای پایدار شده با ایتریا یا YSZ، به دلیل داشتن خواص مطلوب‌تر از قبیل هدایت حرارتی پایین، ضریب انبساط حرارتی بالا و مقاومت به شوک حرارتی مطلوب به عنوان بهترین گزینه مطرح بوده است. در محیط‌های خورنده حاوی اکسیدهای وانادیم و سولفات سدیم، YSZ به دلیل واکنش وانادیم با Y_2O_3 به سرعت تخریب می‌شود. افزودن پایدار کننده‌های اسیدی‌تر مانند سریا (CeO_2) به منظور مقاومت بیشتر در مقابل واکنش‌های شیمیایی باعث پایداری بیشتر پوشش زیرکونیا خواهد شد. 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. 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 بالاتری نسبت به پوشش YSZ قرار دارد [۵]. پوشش زیرکونیای پایدار شده با ایتریا (YSZ)^۱ شامل ($ZrO_2-8wt.\%Y_2O_3$) می‌باشد و پوشش زیرکونیای پایدار شده با سریا (CSZ)^۲ شامل ($ZrO_2-25wt.\%CeO_2-2.5wt.\%Y_2O_3$) بوده که هر دو به عنوان پوشش سد حرارتی (TBC) پیشنهاد شده‌اند. تحقیقات نشان داده است که پوشش CSZ جهت محیط خوردگی داغ مقاومت بهتری نسبت به پوشش YSZ دارد [۶، ۷] در صورت استفاده از پوشش CSZ، استحاله مونوکلینیک لایه زیرکونیا و آسیب دیدن سطح تا حد زیادی کند شده و به تأخیر می‌افتد، در نتیجه بعد از آزمایش‌های ترکیبی (آزمایش‌های خوردگی داغ ترکیب شده با شوک حرارتی) در داخل لایه زیرکونیا، ترک‌های قابل مشاهده تشکیل نمی‌شود. به نظر می‌رسد که به خاطر اسیدیته قوی و مقدار بالای CeO_2 (۲۵ درصد وزنی)، پوشش CSZ، می‌تواند یک پایداری

1 - Ytria Stabilized Zirconia

2 - Ceria Stabilized Zirconia

شانزدهمین سمینار ملی مهندسی سطح

محکم در فاز تراگونال ایجاد کند که نتیجه آن مقاومت به خوردگی داغ بهتر از پوشش YSZ می‌باشد. این نتیجه می‌تواند با توجه به اینکه CeO_2 مقاومت بیشتری در برابر حمله‌های شیمیایی نمک‌هایی چون سولفات‌ها و وانادات‌ها دارد، تأیید شود [۶، ۷]. هدف از انجام پژوهش این است که با تغییر دادن ترکیب و استفاده از CSZ به جای YSZ بتوان باعث افزایش مقاومت به خوردگی داغ پوشش‌های TBC شد.

مواد و روش تحقیق

سوپر آلیاژ اینکونل ۷۳۸ (IN-738LC) به عنوان زیرلایه برای ایجاد پوشش پلاسما اسپری انتخاب شد که آنالیز شیمیایی آن در جدول ۱ آمده است. نمونه‌ها به صورت دیسکی شکل و به قطر ۲۵ mm و به ضخامت ۱۰ mm آماده شدند (شکل ۱). پودرهای مورد استفاده برای لایه میانی و بالایی به ترتیب پودرهای میکرونی با کد تجاری (NiCrAlY) Amdry 962، (YSZ) Metco 204NS-G و (CSZ) Metco 205NS انتخاب شدند. پوشش‌های مورد نظر در این تحقیق توسط فرآیند پلاسما اسپری (APS) و با استفاده از دستگاه Sulzer-Metco F4 plasma gun از نوع Plasma-Technick A-3000 ساخت کشور سوئیس، با ضخامت لایه‌های NiCrAlY، YSZ و CSZ به ترتیب $150\ \mu\text{m}$ ، $250\ \mu\text{m}$ و $250\ \mu\text{m}$ اعمال شدند. قابل ذکر است قبل از پوشش‌دهی، سطح نمونه‌ها توسط ذرات آلومینا با دانه‌بندی ۸۰-۵۰ mesh (اندازه متوسط ۳۶ mesh) و تحت فشار $0.28-0.34\ \text{MPa}$ ($4/5\ \text{bar}$) تحت عملیات ذره پاشی^۱ قرار گرفته و اکسیدها و آلودگی‌های سطحی زدوده شد و یک سطح خشن بدست آمد. سپس پیش‌گرم کردن آنها در دمای $95-65\ \text{C}$ انجام گرفت. از آرگون (Ar) به عنوان گاز اولیه پلاسما و از هیدروژن (H_2) به عنوان گاز ثانویه استفاده شد. پارامترهای مورد استفاده برای هر پوشش در جدول ۲ آمده است. ترکیبات خورنده اصلی در فرآیند خوردگی داغ V_2O_5 و Na_2SO_4 هستند، لذا مواد مذکور از نوع خلوص بالا و به صورت پودری با نسبت وزنی ۵۵ درصد V_2O_5 و ۴۵ درصد Na_2SO_4 مخلوط شده و به مقدار $30\ \text{mg}/\text{cm}^2$ بر روی سطح نمونه‌ها پخش شد تا فیلم یکنواختی از ماده خورنده بر سطح پوشش تشکیل شود. در حین پخش کردن پودر سعی شد که فاصله مواد خورنده از لبه پوشش حدود ۳ mm باشد تا از اثرات خوردگی لبه جلوگیری شود. سپس نمونه‌ها در یک کوره الکتریکی با دمای $1050\ \text{C}$ قرار داده شدند. یادآوری می‌شود گرم شدن نمونه‌ها از دمای محیط تا دمای $1050\ \text{C}$ در داخل کوره انجام شد و بعد از هر ۴ ساعت کوره خاموش و نمونه‌ها بعد از سرد شدن بیرون آورده شده و مورد بازرسی قرار گرفتند و شرایط ظاهری آنها یادداشت شد. بعد از اینکه ترک یا جدایش در لبه پوشش رخ داد ادامه آزمایش در مورد نمونه مربوط متوقف و مدت زمان آزمایش ثبت شد. قابل ذکر است که انتخاب دمای آزمایش و غلظت مواد خورنده به ترتیب بر اساس شرایط دمایی دگرگونی فازی زیرکونیا و انجام یک آزمایش سریع بوده است.

برای تعیین مشخصه های ساختاری و فازی پوشش ها قبل و بعد از آزمون خوردگی داغ از میکروسکوپ الکترونی رویشی (SEM/EDS)^۱ و آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD)^۲ استفاده شد.

نتایج و بحث

شکل ۲ ریزساختار لایه های پوشش های TBC را نشان می دهد که از لایه واسط^۳ و پوشش سرامیکی YSZ یا CSZ با ساختاری لایه ای و متخلخل تشکیل شده که از ویژگی های پوشش های پلازما اسپری است. همانطور که در شکل ۲ (ب) دیده می شود پوشش سرامیکی CSZ با ساختاری لایه ای و متخلخل تشکیل شده ولی تخلخل های آن نسبت به پوشش YSZ کوچک تر و یکنواخت تر است. پوشش های TBC (YSZ و CSZ) به ترتیب بعد از ۱۶ و ۲۸ ساعت آزمایش خوردگی داغ در دمای ۱۰۵۰ °C دچار ترک و جدایش شدند. مقایسه تصاویر ریزساختار قبل و بعد از خوردگی داغ در مورد پوشش های TBC (YSZ و CSZ) نشان می دهد که سطح خارجی پوشش های مذکور بعد از فرآیند خوردگی داغ به شدت متخلخل و کریستال هایی در آن ایجاد شده است (شکل ۳، الف و ب). شکل این کریستال ها در مورد پوشش TBC معمولی سوزنی و دارای رشد به سمت بیرون می باشد. آنالیز XRD از سطح پوشش TBC معمولی بعد از خوردگی داغ (شکل ۴) وجود فازهای زیر کونیای منوکلینیک و ترکیب YVO₄ یا CeVO₄ را علاوه بر زیر کونیای تتراگونال که در پوشش اولیه (as-sprayed) وجود دارد (شکل ۲)، آشکار می سازد. بنابراین با توجه به آنالیز EDS از کریستال های سوزنی ایجاد شده در سطح (شکل ۵، الف-د) که مبین وجود عناصر Y، O و V است و آنالیز XRD که ترکیب YVO₄ را در سطح نشان می دهد، می توان پی برد که کریستال های مذکور دارای فرمول شیمیایی YVO₄ یا CeVO₄ می باشند. پوشش CSZ شامل CeO₂-25wt.% Y₂O₃-2.5wt.% ZrO₂ بالاتری از مقاومت به خوردگی داغ را در مقایسه با پوشش های میکرونی YSZ شامل Y₂O₃-8wt.% ZrO₂ از خود نشان می دهد. به طور کلی در مواد سرامیکی تغییرات شبکه ای، نفوذپذیری را تحت تأثیر قرار می دهد. بنابراین نفوذپذیری هنگامی که مواد بکار رفته شده شامل عناصر سنگین یا عناصری با شعاع یونی زیاد باشد، کم خواهد شد. در مواد مرکب نیز هر چه اختلاف وزنی اتم ها بیشتر باشد، نفوذپذیری کاهش می یابد [۸]. بنابراین بالاتر بودن قابلیت جلوگیری از نفوذ اکسیژن و مواد خورنده در پوشش های CSZ نسبت به پوشش های YSZ تا حدودی مربوط به شعاع اتمی آنهاست. مطالعات ریزساختاری نیز نشان داده که پوشش های CSZ نسبت به پوشش های YSZ دارای ساختاری ریز دانه تر و متراکم تر هستند. بنابراین دلیل دیگر افزایش قابلیت مقاومت به خوردگی داغ در پوشش CSZ بیشتر بودن مرز دانه و جلوگیری از نفوذ عناصر مخرب است. بنابراین پوشش CSZ می تواند مقاومت به خوردگی داغ را افزایش داده و یک انتخاب مناسب برای TBCها باشد.

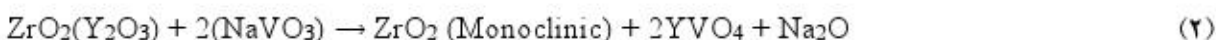
مکانیزم تشکیل زیر کونیای منوکلینیک در طی فرآیند خوردگی داغ مبتنی بر واکنش های ذیل است [۹-۱۳]:

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

2 . X-ray diffraction (XRD, Philips X'pert) Cu K α , 40 KV, 30 mA, Step size: 0.02°

3 - bond coat (NiCrAlY)

شانزدهمین سمینار ملی مهندسی سطح



در ابتدا طبق معادله (۱) بعد از واکنش نمک‌های اولیه ($\text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{V}_2\text{O}_5$) سدیم وانادات (NaVO_3) تشکیل می‌شود، سپس طبق معادله (۲)، NaVO_3 با جزء پایدار کننده زیر کونیا (Y_2O_3 یا CeO_2) واکنش نموده و ZrO_2 منوکلینیک، YVO_4 ، CeVO_4 و Na_2O ایجاد می‌شود. تشکیل زیر کونیای منوکلینیک با استفاده از پایدار کننده‌های اسیدی‌تر مانند CeO_2 به تعویق می‌افتد [۱۴-۱۶].

بر طبق تحقیقات انجام شده، پس از آزمایش خوردگی داغ بر روی CSZ بدلیل مکانیزم تبدیل به حالت معدنی شدن، سریای آزاد بر روی سطح ایجاد شده است ولی با افزایش زمان آزمایش، کریستال‌های CeVO_4 ایجاد می‌شود [۱۷]. نتایج نشان می‌دهد که CeO_2 به عنوان پایدار کننده در CSZ بر طبق مکانیزم معدنی شدن در واکنش خوردگی داغ تمایل دارد که به صورت سریم آزاد تبدیل شود تا اینکه از طریق واکنش شیمیایی با NaVO_3 تولید کریستال‌های CeVO_4 کند (در اوایل آزمایش خوردگی داغ). در ادامه آزمایش خوردگی داغ CeO_2 آزاد و CeO_2 به عنوان پایدار کننده، هر دو با نمک NaVO_3 واکنش داده و تولید کریستال‌های CeVO_4 می‌کنند. نتایج حاکی از این است که تهی شدن CSZ از CeO_2 به دو صورت اتفاق می‌افتد: ابتدا فرآیند تبدیل به حالت معدنی شدن و ایجاد CeO_2 آزاد و سپس واکنش شیمیایی با نمک NaVO_3 و تشکیل کریستال‌های CeVO_4 در مرزها و دیگر عیوب شبکه مانند حفرات و ترک‌های ریز [۱۴، ۱۷].

اکسید سریم تنها دارای یک فاز مکعبی بوده که تا دماهای بالا پایدار می‌باشد. همچنین بدلیل اسیدیته بیشتر نسبت به Y_2O_3 واکنش‌پذیری بسیار کمتری نسبت به Y_2O_3 دارد. تشکیل کریستال‌های CeVO_4 نسبت به YVO_4 نیازمند زمان بیشتری می‌باشد و تشکیل مذاب یوتکتیکی حاوی سریم هم در منابع مختلف ذکر نشده است.

در آزمایش خوردگی داغ بر روی CSZ با وجود اینکه نمک‌های مذاب و وانادیم به درون این پوشش هم نفوذ کرده است ولی تغییر فاز تتراگونال به منوکلینیک به طور مؤثری به تعویق افتاده است و ترک‌های کمتری دیده می‌شود. قدرت اسیدیته بیشتر CeO_2 باعث پایداری بیشتر پوشش CSZ در فاز تتراگونال می‌باشد که این امر باعث افزایش مقاومت به خوردگی داغ آن می‌شود. CeO_2 (بدلیل اسیدیته بالاتر) مقاومت بیشتری در مقابل واکنش شیمیایی با Na_2SO_4 و V_2O_5 نسبت به Y_2O_3 دارد [۱۷، ۱۸].

نتیجه‌گیری

- ۱) مقاومت به خوردگی داغ پوشش NiCrAlY/CSZ بهتر از پوشش NiCrAlY/YSZ است.
- ۲) ترکیب نمک‌های سولفات سدیم و پنتا اکسید وانادیوم در دمای بالا موجب حل کردن پایدار کننده زیر کونیا شده، ترک خوردن و جدا شدن لایه‌های سطحی پوشش را در پی خواهد داشت.

۳) تشکیل کریستال های سوزنی YVO_4 یا $CeVO_4$ ، عاملی برای تخریب پوشش های سد حرارتی زیرکونیایی است.

مراجع

- [1] H.D. Steffens, R. Kaczmarek, "Thermal barrier coatings for heat engines", *Welding in the World*, 1990, Vol. 28, pp.224-230.
- [2] Web Site, Google, "Coating, TBC, EB-PVD, Plasma Spray, Image", <http://www.google.com/search/Coating+TBC+EB-PVD+Plasma+Spray+Image>, 2012.
- [3] C. Funke, J.C. Mailand, B. Siebert, R. Vaßen, D. Stover, "Characterization of ZrO_2 -7wt.% Y_2O_3 thermal barrier coatings with different porosities and FEM analysis of stress redistribution during thermal cycling of TBCs", *Surface & Coatings Technology*, 1997, Vol. 94-95, pp.106-111.
- [4] S.V. Joshi, M.P. Srivastava, "On the thermal cycling life of plasma-sprayed yttria-stabilized zirconia coatings", *Surface & Coatings Technology*, 1993, Vol. 56, pp.215-224.
- [5] 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", *Surface & Coatings Technology*, 2000, Vol. 124, pp.1-12.
- [6] S.Y. Park, J.H. Kim, M.C. Kim, H.S. Song, C.G. Park, "Microscopic observation of degradation behavior in yttria and ceria stabilized zirconia thermal barrier coatings under hot corrosion", *Surface & Coatings Technology*, 2005, Vol. 190, pp.357-365.
- [7] G. Vourlias, N. Pistofidis, P. Psyllaki, E. Pavlidou, G. Stergioudis, K. Chrissafis, "Nanophenomena during exposure of plasma-sprayed ceria stabilised zirconia coatings to oxygen rich environments", *Journal of Alloys and Compounds*, 2009, Vol. 483, pp.378-381.
- [8] W.B. Gong, C.K. Sha, "Microstructures and thermal insulation capability of plasma-sprayed nanostructured ceria stabilized zirconia coatings", *Surface & Coatings Technology*, 2006, Vol. 201, pp.3109-3115.
- [9] M.Saremi, A. Keyvani, M. Heydarzadeh Sohi, Hot corrosion resistance and mechanical behavior of atmospheric plasma sprayed conventional and nanostructured zirconia coatings, *International Journal of Modern Physics*, 2012, Vol. 5, pp. 720-727.
- [10] A. Keyvani, Microstructural stability, oxidation and hot corrosion resistance of nanostructured Al_2O_3/YSZ composite compared to conventional YSZ TBC coatings, *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, Vol. 623, pp. 229-237.
- [11] M. Bahamirian, Sh. Khameneh Asl, An investigation on effect of bond coat replacement on hot corrosion properties of thermal barrier coatings, *Iranian Journal of Materials science and Engineering*, 2013, Vol. 10, PP. 12-21.
- [12] A. Keyvani, M. Saremi, M. Heydarzadeh Sohi, Microstructural stability of zirconia alumina composite coatings during hot corrosion test at 1050 °C, *Journal of Alloys and Compounds*, 2010, Vol. 506, pp. 103-108.
- [13] A. Keyvani, M. Saremi, M. Heydarzadeh Sohi, An investigation on oxidation, hot corrosion and mechanical properties of plasma-sprayed conventional and nanostructured YSZ coatings, *Surface & Coatings Technology*, 2011, Vol. 206, pp. 208-216.
- [14] M. Saremi, M.H. Habibi, "An investigation on hot corrosion resistance of plasma sprayed YSZ-ceria TBC in $Na_2SO_4+V_2O_5$ at 1050°C", *Supplemental Proceedings: Materials Processing and Energy Materials*, 2011, Vol. 1, pp.429-437.
- [15] D.B. Lee, C. Lee, "High-temperature oxidation of $NiCrAlY/(ZrO_2-Y_2O_3$ and $ZrO_2-CeO_2-Y_2O_3)$ composite coatings", *Surface & Coatings Technology*, 2005, Vol. 193, pp.239-242.

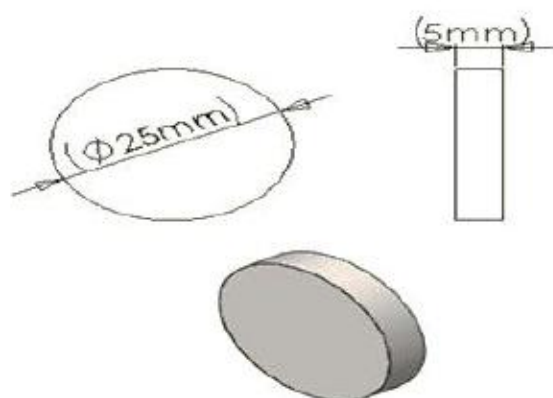
- [16] J.E. Petitjean, R.M. Kearsey, X. Huang, "On the thermodynamics and microstructure of variably cooled and co-doped Y_2O_3 - ZrO_2 for application to thermal barrier coatings", Surface & Coatings Technology, 2010, Vol. 205, pp.1843-1849.
- [17] R.L. Jones, "Some aspects of the hot corrosion of thermal barrier coatings", Journal of Thermal Spray Technology, 1997, Vol. 6(1), pp.77-84.
- [18] 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, 1995, Vol. 32, pp.221-226.

جدول ۱: مشخصات سوپرآلیاژ اینکونل (IN738LC)

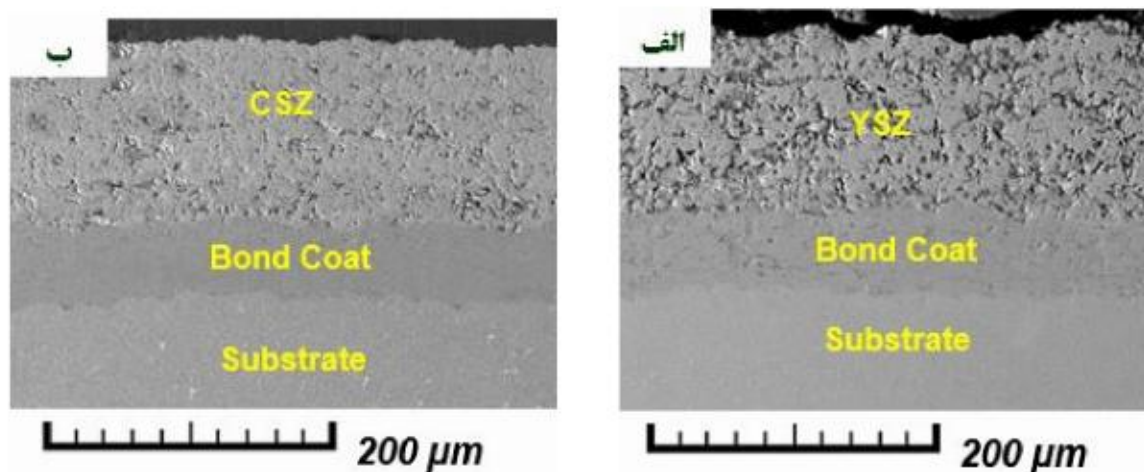
Si	Nb	Zr	B	C	Ti	Al	Mo	Co	Cr	Ni	ترکیب
۰/۵	۱/۵	۰/۱	۰/۰۱۲	۰/۰۵	۰/۸	۵/۳	۴/۲	۱	۱۲/۵	۷۴	درصد وزنی

جدول ۲: پارامترهای مورد استفاده برای پاشش پلاسمایی پودرهای مورد استفاده

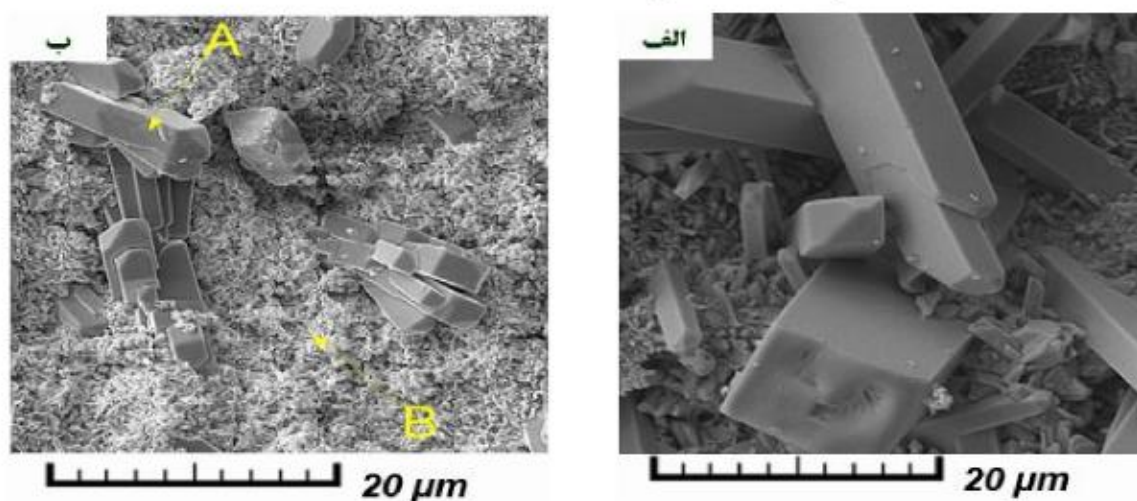
Parameter	NiCrAlY	YSZ	CSZ
Current (A)	۶۰۰	۶۵۰	۶۰۰
Voltage (V)	۶۰	۷۰	۶۰
Primary Gas Flow, Ar (l/min)	۵۵	۳۵	۵۵
Secondary Gas Flow, H ₂ (l/min)	۹/۵	۱۰	۱۱
Carrier gas (Ar) (l/min)	۴/۲	۳/۵	۴/۲
Spray distance (mm)	۱۴۰	۱۲۰	۱۴۰
Powder feed rate (g/min)	۵۰	۲۰	۵۰
Wheel rotation speed (rpm)	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
Traverse speed (m/s)	۰/۱	۰/۱	۰/۱



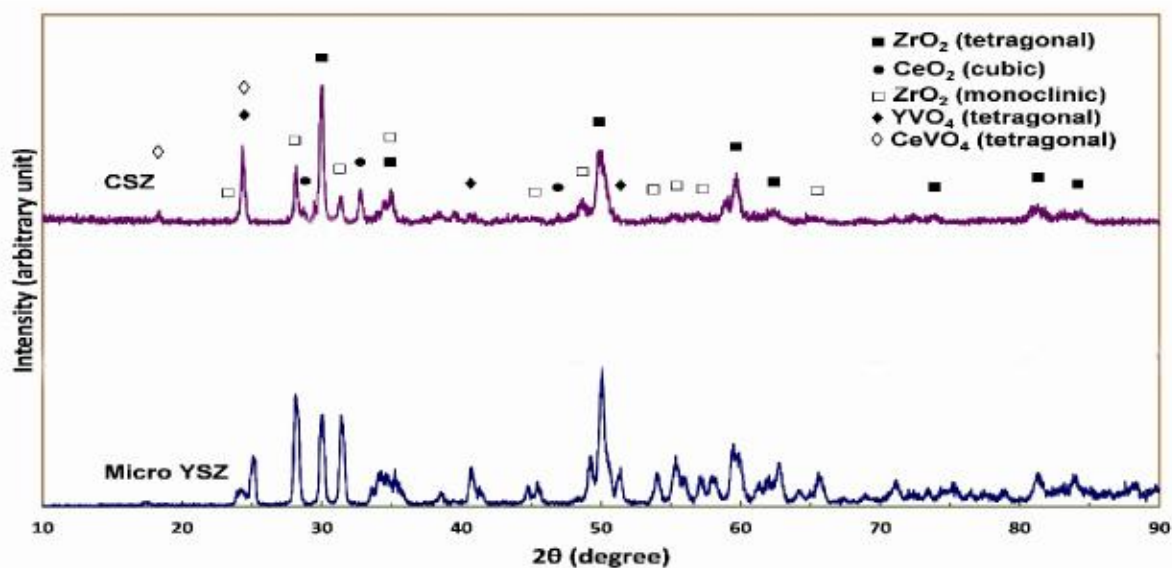
شکل ۱: تصویر طرح وار نمونه های برش داده شده.



شکل ۲: ریزساختار مقطع پوشش TBC: (الف) YSZ، (ب) CSZ.

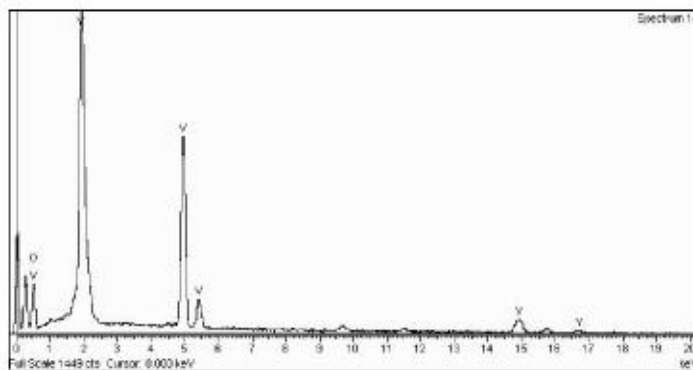


شکل ۳: مورفولوژی سطح خارجی پوشش TBC: (الف) YSZ، (ب) CSZ بعد از ۱۶ و ۲۸ ساعت خوردگی داغ.

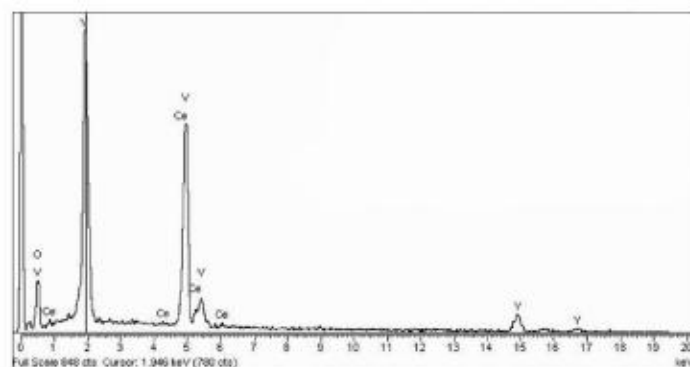


شکل ۴: آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD) از سطح خارجی پوشش: (الف) YSZ میکرونی، (ب) CSZ میکرونی بعد از ۱۶ و ۲۸

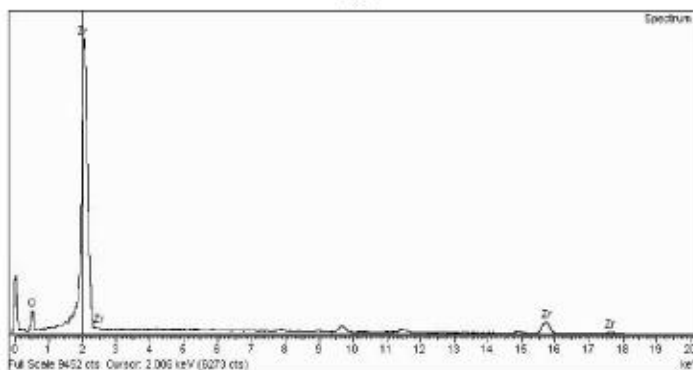
ساعت خوردگی داغ در دمای ۱۰۵۰ °C.



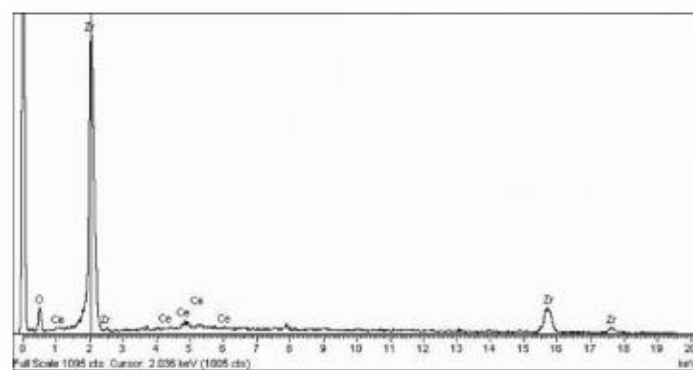
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل ۵: آنالیز نقطه‌ای EDS (الف و ب) از کریستال‌های سوزنی، (ج و د) از زمینه زیرکونیایی در شکل ۳.