

لایه نشانی پلاسمایی MCrAlY/YSZ بر روی سوپر آلیاژ Inconel 738 و بررسی رفتار خوردگی داغ آن

محمد رضا رحیمی پور و محمد صادق مهدی پور

پژوهشکده سرامیک، پژوهشگاه مواد و انرژی

(دریافت مقاله : ۸۹/۱۲/۰۴ - پذیرش مقاله : ۹۰/۰۹/۲۶)

چکیده

یکی از موثرترین روش‌های جلوگیری از تخریب مواد در دماهای بالا، پوشش‌دهی آن‌ها است. خوردگی داغ یکی از عوامل اصلی تخریب این پوشش‌های مقاوم به حرارت (TBCs) است. ایجاد یک لایه میانی کامپوزیتی بین پوشش فلزی و پوشش سرامیکی باعث افزایش مقاومت به خوردگی داغ این پوشش‌ها می‌شود. در این تحقیق ابتدا دو نوع TBC:

(۱) پوشش معمولی MCrAlY و YSZ (Yttria-stabilized zirconia) (۲) پوشش چند لایه MCrAlY و YSZ با تغییر درصد وزنی (100% YSZ, 50% YSZ+50% MCrAlY, 100% MCrAlY) با روش پاشش پلاسمایی بر روی زیرلایه‌هایی از جنس سوپر آلیاژ پایه نیکل ایجاد شدند. جهت بررسی مقاومت به خوردگی داغ نمونه‌ها، آزمون‌های خوردگی داغ روی سطح این پوشش‌ها در نمک مذاب (۵۵٪ وزنی V_2O_5 و ۴۵٪ وزنی Na_2SO_4) در دمای $1050^\circ C$ به مدت ۲۰ ساعت انجام شد. ریزساختار، مورفولوژی، ترکیب شیمیایی سطح و سطح مقطع پوشش‌ها به وسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مجهز به EDS بررسی شد. جهت شناسایی ساختارهای کریستالی تشکیل شده و محصولات خوردگی داغ از آزمون پراش اشعه ایکس (XRD) استفاده شده است. بر اساس نتایج آزمایشات انجام شده، کاهش قابل ملاحظه محصولات مضر خوردگی داغ در نمونه‌های دارای TBC چند لایه نسبت به TBC معمولی به دلیل تشکیل فازهای $AlVO_4$ و $CrVO_4$ در این نمونه‌ها نشان‌دهنده افزایش قابل توجه مقاومت به خوردگی داغ است.

واژه های کلیدی: خوردگی داغ، پوشش‌های سد حرارتی، آنالیز پراش اشعه ایکس.

Synthesis of MCrAlY/YSZ coatings by plasma spray method on the inconel 738 substrates and investigating of their hot corrosion behavior

M. R. Rahimipour and M. S. Mahdipoor

Ceramic Department, Materials and Energy Research Center

(Received 23 February 2011, accepted 17 December 2011)

Abstract

One of the most important methods to prevent the failure of materials in high temperatures is using thermal barrier coatings (TBC). Hot corrosion is the most important reason of thermal barrier coatings failure. Synthesis of an interface composite layer between bond coat and top coat could be so useful to increase their hot corrosion resistance. In this study, hot corrosion behavior of two kinds of TBC synthesized by APS were investigated: 1) Common TBC (MCrAlY, YSZ) 2) Multi layers FGM¹, TBC (MCrAlY, 50%YSZ+50%MCrAlY, YSZ). Hot corrosion tests were carried out on the coatings surface in the molten salt of 45%Na₂SO₄+55%V₂O₅ mixture at 1050 °C for 20 hours. Microstructure, morphology and chemical composition of the surface and cross section of the coatings were investigated by SEM equipped with EDS. XRD analysis was used to study microstructure and hot corrosion products. The results indicated that the hot corrosion resistance of FGM, TBC was much better than normal TBC due to the formation of AlVO₄ and CrVO₄ phases in this kind of coating during the hot corrosion test.

Keywords: Hot Corrosion, Thermal Barrier Coatings (TBC), X-Ray Diffraction Analyses.

E-mail of corresponding author: m-rahimi@merc.ac.ir

¹ Functionally graded materials

مقدمه

رفتار خوردگی داغ نمونه مشاهده نمی‌شود. در این تحقیق ابتدا دو نوع (TBC: ۱) پوشش معمولی (YSZ, MCrAlY) (۲) پوشش سه لایه MCrAlY و YSZ با تغییر درصد وزنی (100% YSZ, 50% YSZ+50% MCrAlY, 100% MCrAlY) با روش پاشش پلاسمایی بر روی زیرلایه‌هایی از جنس سوپر آلیاژ پایه نیکل ایجاد شدند. سپس تأثیر محافظتی لایه میانی کامپوزیتی 50% YSZ+50% NiCrAlY و مکانیزم ناپایداری پوشش‌ها در حین خوردگی داغ با استفاده از آنالیز فازی با پراش اشعه ایکس، مشاهده ریزساختار با میکروسکوپ الکترونی روبشی و آنالیز شیمیایی توسط دستگاه SEM مجهز به EDS، مورد بررسی قرار گرفته است.

مواد و روش تحقیق

مواد و آماده سازی پوشش‌ها

دیسک‌هایی به قطر ۲۴ میلی متر از جنس سوپر آلیاژ پایه نیکل (Inconel 738) که توسط ذرات آلومینا (γ - Al_2O_3) با دانه‌بندی ۱۶-۲۴ میکرون بلاست شده‌اند، به عنوان زیرلایه انتخاب شدند. برای لایه نشانی ۲ نوع پودر تجاری انتخاب شد:

- MCrAlY: AMDRY 962 (Ni22Cr10AlY), Size: 40-60 μm .
- YSZ: (Yttria-Stabilized Zirconia): METCO 204 NSG, Size: 40-60 μm .

به این صورت که پودر MCrAlY به عنوان Band Coat و پودر YSZ به عنوان TBC استفاده شده‌اند. برای تولید پودر اولیه لایه میانی، کامپوزیتی از مخلوط کردن ۵۰ wt% YSZ و ۵۰ wt% MCrAlY به مدت ۳۰ دقیقه تهیه شد. در نهایت پوشش‌های مد نظر توسط روش پاشش پلاسمایی در هوا بر روی زیرلایه‌ها ایجاد شدند که ضخامت آن‌ها در جدول ۱ آمده است. تفنگ پاشش استفاده شده از نوع 3MB Metco بوده که از آرگون (Ar) به عنوان گاز اولیه پلاسمای و از هیدروژن (H_2) به عنوان گاز ثانویه استفاده شده است. پارامترهای لایه نشانی در جدول ۲ آورده شده است.

پوشش‌های مقاوم به حرارت (TBC^1) اغلب برای عایق کردن اجزای موجود در بخش‌های داغ توربین‌های گازی در جهت افزایش دمای کاری و بازدهی این قطعات مورد استفاده قرار می‌گیرند. در حقیقت پوشش‌های مقاوم به حرارت باعث کاهش شدت انتقال حرارت و کاسته شدن از دمای زیر لایه می‌شوند که بهبود مصرف سوخت، قدرت موتور و ماندگاری اجزای موتور را در پی خواهند داشت [۱-۳].

یکی از مهم‌ترین مشکلات این پوشش‌ها، سوخت‌های فسیلی با کیفیت پایین می‌باشند که معمولاً شامل ناخالصی‌هایی همچون وانادیوم و سدیم هستند [۴]. در واقع نمک این عناصر ($NaSO_4$ و V_2O_5) با ایتریا واکنش داده و تولید YVO_4 می‌کند. این واکنش باعث تهی شدن ایتریای پایدارکننده از شبکه زیرکونیا می‌شود. در نتیجه این امر در حین سرد شدن، زیرکونیای تراگونال و مکعبی به فاز زیرکونیای مونوکلینیک تبدیل می‌شود [۵]. این تبدیل همراه با ۳/۵٪ انبساط حجمی است که باعث ترک و تخریب پوشش خواهد شد.

جهت بهینه کردن خواص پوشش‌های مقاوم به حرارت، به خصوص افزایش مقاومت به خوردگی داغ آن‌ها در برابر نمک‌هایی مانند $NaSO_4$ و V_2O_5 ، پیشنهادات زیادی مطرح است که در ادامه به چند مورد از آن‌ها اشاره می‌شود:

۱- استفاده از پایدارکننده‌های قویتری مانند Sc_2O_3 ، In_2O_3 و CeO_2 .

۲- رسوب یک لایه رویی فشرده آلومینا روی سطح YSZ جهت کاهش نفوذ نمک مذاب.

۳- بهینه کردن خود پوشش TBC با روش‌های مختلف مانند ایجاد پوشش‌های چندلایه با شیب غلظتی ملایم (FGM^2) (coatings) [۶-۸]

روش سوم پتانسیل بالایی برای بهبود خواص نهایی TBC دارد که در تحقیقات قبلی، تأثیر استفاده از این روش بر روی

¹ - Thermal barrier coating

² - Functionally graded materials

جدول ۱. مشخصات پوشش‌ها و ضخامت آن‌ها بر حسب میکرومتر

مخفف	YSZ (μm)	MCrAlY+YSZ (μm)	MCrAlY (μm)	نمونه
YSZ	۳۵۰	-	۱۵۰	TBC معمولی MCrAlY, YSZ
FGM, YSZ	۲۰۰	۱۵۰	۱۵۰	TBC چند لایه MCrAlY, 50% YSZ+50% NiCrAlY, YSZ

جدول ۲. پارامترهای لایه نشانی پودرهای مختلف

	جریان (I)	نرخ تغذیه پودر (gr/min)	فاصله تفنگ پاشش تا نمونه (cm)
MCrAlY	۴۵۰	۱۰	۱۵
MCrAlY+YSZ	۵۰۰	۱۰	۱۰
YSZ	۵۰۰	۲۰	۱۰

شد و بعد از هر ۴ ساعت کوره خاموش و نمونه‌ها پس از سرد شدن بیرون آورده شده و مورد بازرسی قرار گرفتند. این آزمون به مدت ۲۰ ساعت بر روی نمونه‌ها انجام شد.

ریز ساختار و آنالیز شیمیایی

ریز ساختار، مورفولوژی و ترکیب شیمیایی سطح و سطح مقطع پوشش‌ها به وسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مجهز به EDS مورد بررسی قرار گرفت. برای مشخص کردن ساختار کریستالی پوشش‌ها و محصولات خوردگی داغ از روش پراش اشعه ایکس (XRD) استفاده شد. دستگاه XRD استفاده شده، ساخت کارخانه unisantis کشور آلمان مدل XMD300 با تارگت Cu است.

نتایج و بحث

شکل ۱ سطح مقطع پوشش‌های TBC را بعد از اعمال پوشش توسط روش پاشش پلاسمایی نشان می‌دهد. شکل ۱-الف، TBC معمولی که شامل پوشش روکشی MCrAlY و YSZ به عنوان پوشش رویی است را نشان می‌دهد. در شکل ۱-ب، پوشش سه لایه YSZ, 50% YSZ+50% NiCrAlY, MCrAlY مشخص شده است. هر دو تصویر نشان دهنده

آزمون‌های خوردگی داغ

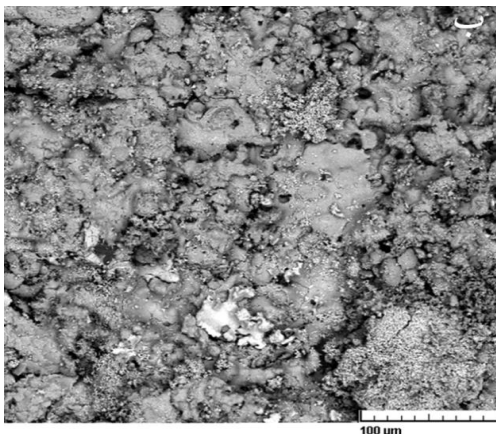
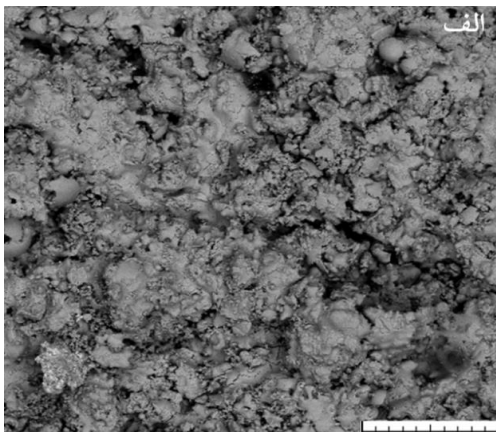
ترکیبات خورنده اصلی در فرآیند خوردگی داغ Na_2SO_4 و V_2O_5 می‌باشند، لذا مواد مذکور از نوع خلوص بالا و به صورت پودری مورد استفاده قرار گرفت. محیط شبیه سازی شده خوردگی با ترکیب نمک‌های V_2O_5 ۵۵٪ - Na_2SO_4 ۴۵٪ در نظر گرفته شد. مشخصات فیزیکی هر نمک در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳. مشخصات فیزیکی نمک‌های آزمون خوردگی داغ

نوع نمک	دمای ذوب (°C)	دانسیته (g/cm^3)
Na_2SO_4	۸۸۴	۲/۷
V_2O_5	۶۹۰	۳/۳

مخلوط‌های آماده شده به مقدار ۳۰ میلی‌گرم بر سانتی‌متر مکعب بر روی سطح نمونه‌ها پخش شد تا فیلم یکنواختی از ماده خورنده به روی سطح پوشش تشکیل شود. در طی پاشیدن پودر سعی شد که فاصله مواد خورنده از لبه پوشش حدود ۲ میلی‌متر باشد تا از اثرات خوردگی لبه جلوگیری شود. سپس نمونه‌ها در یک کوره الکتریکی در دمای ۱۰۵۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند. قابل ذکر است که گرم شدن نمونه‌ها از دمای محیط تا دمای آزمایش در داخل کوره انجام

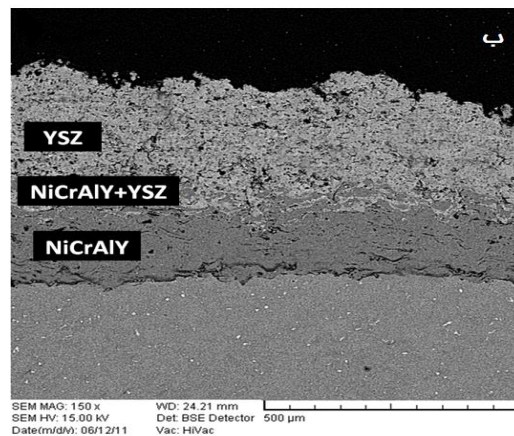
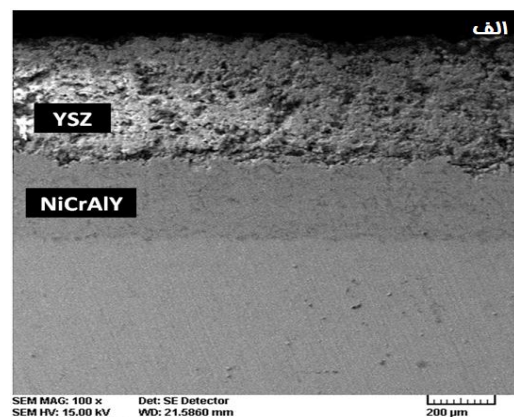
شکل ۲ ریزساختار سطح پوشش‌ها را قبل از آزمون خوردگی داغ نشان می‌دهد. از آن جایی که لایه بالایی هر دو نوع پوشش YSZ می‌باشد، تفاوت چندانی در تصاویر الف، مربوط به پوشش YSZ، و ب، مربوط به پوشش FGM, YSZ، دیده نمی‌شود. نکته قابل توجه در این تصاویر، تغییر شکل ذرات کروی پودر پاشیده شده به ذرات پولکی روی هم قرار گرفته است که نشان دهنده لایه نشانی مطلوب این پوشش‌ها است. بر اساس تحقیقی که توسط پارک و همکارانش در سال ۲۰۰۵ انجام شده است [۴]، ساختار لایه لایه از پودرهای که در طول فرآیند پاشش از حالت کروی تغییر شکل پلاستیک داده و به صورت ذرات پولکی روی هم قرار گرفته‌اند، مهم‌ترین نشانه سنتز مناسب پوشش‌های مقاوم به حرارت با روش پاشش پلاسمایی است که شکل ۱ و ۲ مویید وجود این ساختار برای پوشش‌های سنتز شده در این پژوهش می‌باشد.



شکل ۲. مورفولوژی سطحی پوشش‌ها بعد از لایه نشانی

الف - YSZ و ب - FGM, YSZ

ساختار لایه لایه، ویژگی منحصر به فرد پوشش‌های پاشش پلاسمایی [۱]، است. تحقیقات قبلی نشان دهنده نقش بسیار مهم تخلخل پوشش‌ها در مقاومت به خوردگی داغ آن‌ها است [۵]. بر اساس تصاویر سطح مقطع نمونه‌ها که در شکل ۱ آورده شده است، می‌توان تخلخل نسبی پوشش‌ها را ارزیابی کرد. با توجه به ماهیت فلزی پودر MCrAlY و درصد بالای خمیری شدن ذرات حین پاشش [۲]، تخلخل کم‌تر این لایه امری منطقی است. اما تخلخل لایه‌های تشکیل شده از پودرهای YSZ با توجه به ماهیت سرامیکی این ذرات و دمای ذوب بالای آن‌ها بیش‌تر بوده که محل مناسبی برای نفوذ ماده خورنده است. با این وجود مقدار تخلخل مشاهده شده برای هر دو نمونه به میزان قابل قبولی بوده که نشان از انتخاب مناسب پارامترهای لایه نشانی است.



شکل ۱. سطح مقطع پوشش‌های TBC بعد از لایه نشانی توسط

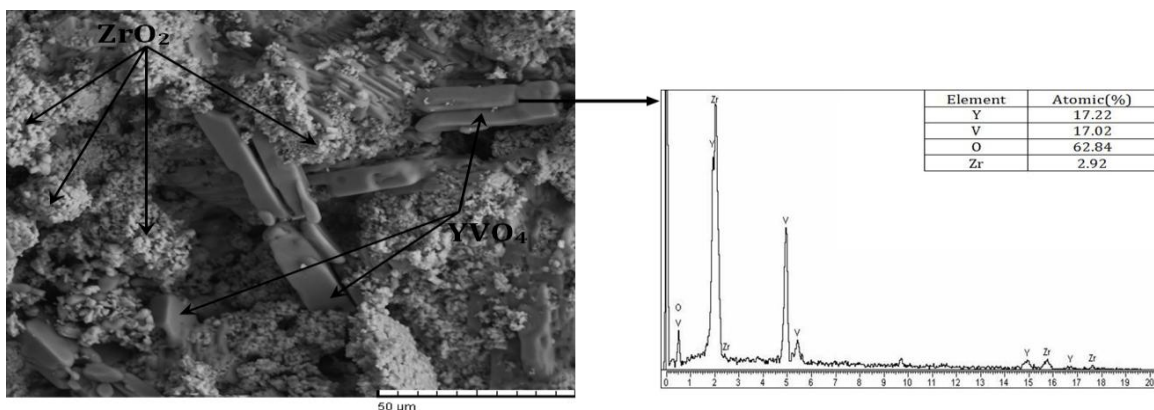
روش پاشش پلاسمایی، الف - YSZ معمولی، ب - FGM, YSZ

تخریب سریع تر TBC باشد.

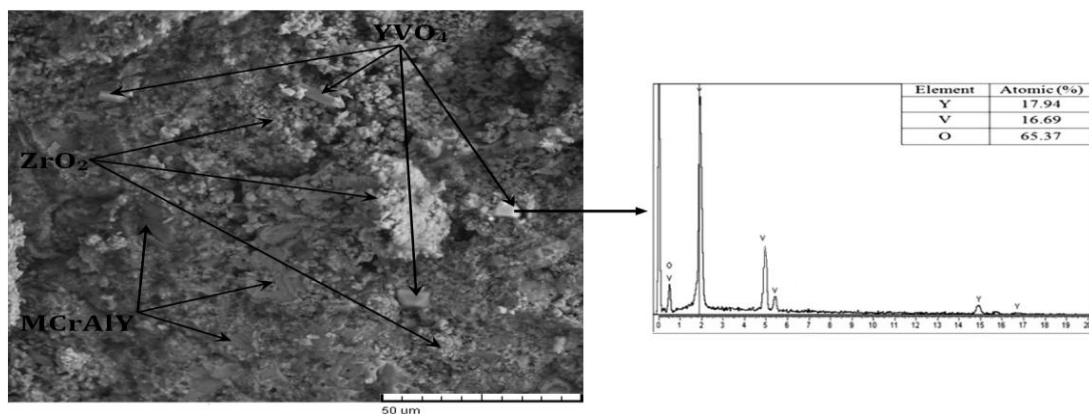
در شکل ۴ ریزساختار سطح پوشش YSZ, FGM بعد از ۲۰ ساعت آزمون خوردگی داغ نشان داده شده است. در این تصویر نیز زمینه زیرکونیایی کاملاً متخلخل مشهود بوده، اما اثری از کریستال‌های $۵۰-۸۰$ میکرومتری YVO_4 دیده نمی‌شود، بلکه چندین کریستال بسیار کوچک‌تر و به مقدار کم‌تر را می‌توان به عنوان YVO_4 در این تصویر مشاهده نمود. آنالیز شیمیایی EDS یکی از این کریستال‌ها در کنار تصویر دیده می‌شود. برای اطمینان از حضور YVO_4 و سایر محصولات خوردگی داغ، در ادامه نتایج آزمون XRD آورده شده است.

قابل ذکر است که برای هر یک از نمونه‌ها ۵ تصویر از نقاط مرکزی نمونه و در صورت وجود ترک از مجاورت ترک‌ها تهیه شده است که تمام تصاویر مربوط به یک نمونه تا حد قابل قبولی ریزساختار مشابه از خود نشان داده‌اند.

شکل ۳ نشان دهنده ریزساختار سطح پوشش YSZ بعد از ۲۰ ساعت تست خوردگی داغ است. در این تصویر زمینه زیرکونیایی کاملاً متخلخل است. همچنین در تصویر کریستال‌هایی به طول حدودی $۵۰-۸۰$ میکرومتر با مورفولوژی تقریباً میله‌ای دیده می‌شود. آنالیز EDS از یکی از این کریستال‌های پدیدار شده در کنار تصویر آورده شده است. همان‌طور که پیداست کریستال‌های مذکور از عناصر Y, V, O تشکیل شده‌اند که درصد هر یک از آنها در شکل مشخص است. با توجه به حضور کریستال‌های YVO_4 ، احتمال تبدیل زیرکونیای تتراگونال به زیرکونیای مونوکلینیک وجود دارد که نتایج XRD این احتمال را تایید می‌کند. به نظر می‌رسد مقدار اندک زیرکونیوم شناسایی شده در آنالیز شیمیایی EDS تصویر ۳ مربوط به ذرات کناری کریستال مشخص شده در تصویر باشد. نکته بسیار مهم در این تصویر اندازه $۵۰-۸۰$ میکرومتری کریستال‌های YVO_4 است که می‌تواند نشان دهنده مصرف بیشتر پایدارکننده و به تبع آن



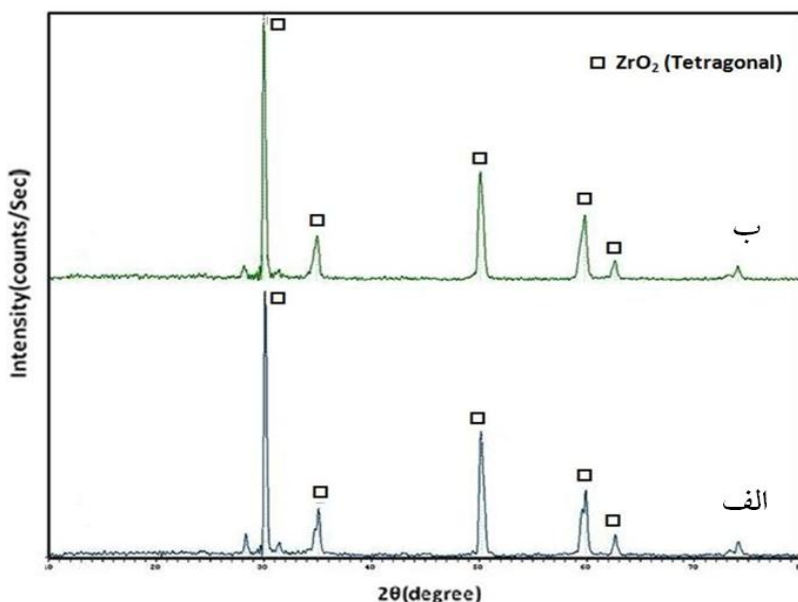
شکل ۳. مورفولوژی سطح YSZ معمولی بعد از انجام آزمون خوردگی و آنالیز شیمیایی EDS از کریستال تشکیل شده.



شکل ۴. مورفولوژی سطح YSZ, FGM بعد از انجام آزمون خوردگی و آنالیز شیمیایی EDS از کریستال تشکیل شده.

شناسایی شده که همان زیرکونیای پایدار شده با ایتریا (YSZ) است. این مطلب نشان دهنده عدم تغییر فاز پودرهای پاشیده شده حین لایه نشانی است.

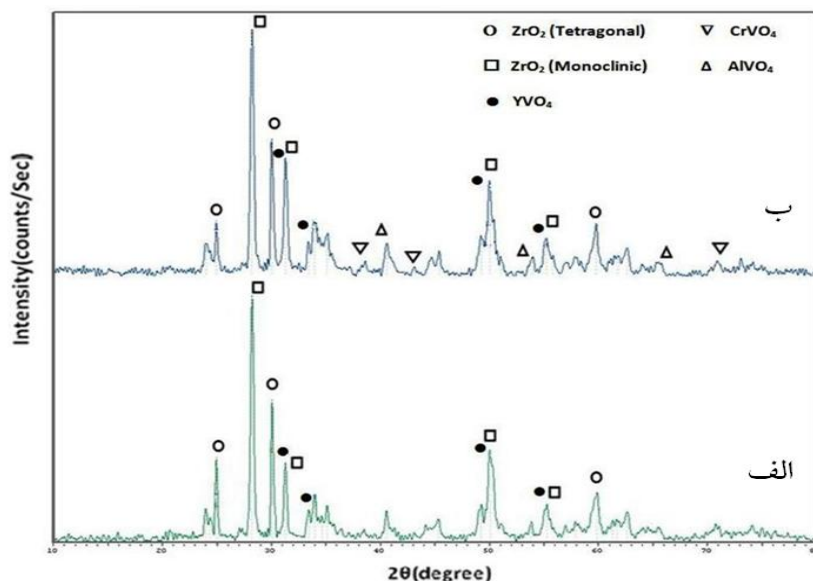
شکل ۵ نتایج آزمون XRD پوشش YSZ معمولی و پوشش YSZ, FGM را بلافاصله بعد از پاشش نشان می دهد. در این شکل برای هر دو نوع پوشش، فاز زیرکونیای تتراگونال کاملاً



شکل ۵ آنالیز XRD پوشش ها بلافاصله بعد از پاشش الف- YSZ معمولی، ب- YSZ, FGM

YVO_4 بر روی سطح تشکیل و در این آزمون شناسایی شدند. این در حالی است که برای پوشش YSZ, FGM علاوه بر محصولات فوق مقدار کمی فازهای CrVO_4 و AlVO_4 نیز نمایان شده اند. همین طور مقدار YVO_4 شناسایی شده در این نمونه نیز کاهش یافته است.

شکل ۶ نتایج XRD نمونه ها را بعد از انجام آزمون خوردگی داغ نشان می دهد. در این شکل می توان فازهای تشکیل شده در اثر خوردگی داغ پوشش ها را کاملاً شناسایی کرد. همان طور که انتظار می رفت برای پوشش YSZ معمولی بعد از انجام تست خوردگی داغ، ZrO_2 مونوکلینیک و کریستال های



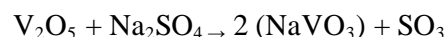
شکل ۶ آنالیز XRD پوشش ها پس از خوردگی داغ الف- YSZ معمولی، ب- YSZ, FGM

می‌اندازد و باعث کاهش میزان شکل‌گیری کریستال‌های YVO_4 می‌شود که نتیجه آن افزایش مقاومت در برابر خوردگی داغ است، البته این تحلیل نیازمند تحقیقات بیشتری است. یکی از اصلی‌ترین روش‌های بررسی رفتار خوردگی داغ، مشاهده نتایج میکروسکوپی است. رفتار خوردگی پوشش‌های مقاوم در برابر حرارت با پایه زیرکونیا به سه بخش مجزا تقسیم می‌شود [۱۰]. شکل ۷ این سه مرحله را به طور شماتیک نشان می‌دهد:

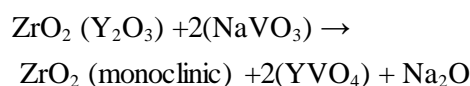
مرحله اول: در این مرحله نفوذ نمک‌های مذاب به درون کل لایه زیرکونیا از طریق عیوب پوشش مانند حفرات و ترک‌های ریز اتفاق می‌افتد. همان‌طور که در شکل ۷ مشخص است این مرحله بسیار سریع پیش می‌رود. در این مرحله، نمک مذاب در همان ساعات اول می‌تواند به نزدیکی فصل مشترک YSZ و $Bond-Coat$ برسد.

مرحله دوم: در این مرحله نمک‌های نفوذ کرده با فاز پایدارکننده زیرکونیا یعنی ایتریا واکنش می‌دهند. تهی شدن فاز پایدارکننده زیرکونیا و در ادامه تغییر فاز به مونوکلینیک می‌تواند بسیار سریع انجام شود. به دلیل اینکه این تغییر فاز با افزایش حجم ۳/۵ درصدی همراه است، در اثر شوک‌های حرارتی و مکانیکی در محیط‌خورنده می‌تواند باعث تخریب پوشش شود.

مکانیزم اصلی تخریب YSZ در طول خوردگی داغ را می‌توان واکنش YSZ با محیط شبیه‌سازی شده و تشکیل YVO_4 دانست. هنگامی که پودر اولیه با نسبت ۵۵٪ وزنی V_2O_5 و ۴۵٪ وزنی Na_2SO_4 در معرض دمای بالا قرار می‌گیرد، ممکن است تحت واکنش زیر وانات سدیم با نقطه ذوب پایین و با اسیدیته کم تشکیل شود.

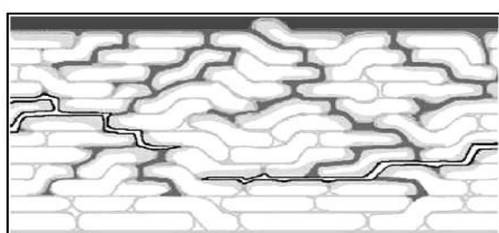


به دنبال آن $NaVO_3$ با نقطه ذوب $910^\circ C$ ، با ایتریایی که به صورت محلول جامد در زیرکونیا وجود دارد واکنش داده و YVO_4 را طبق واکنش زیر تشکیل می‌دهد.

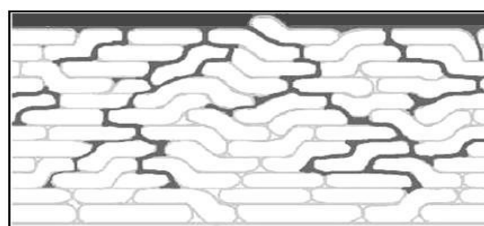


به نظر می‌رسد $NaVO_3$ مذاب، موجب افزایش تحرک اتمی و تهی شدن ZrO_2 از ایتریا و در نتیجه تسریع رشد کریستال‌های YVO_4 شده است [۳ و ۶].

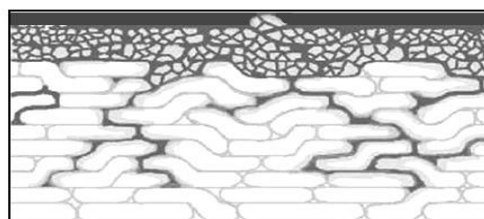
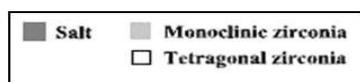
بر طبق الگوی XRD نمونه YSZ , FGM, فازهای $CrVO_4$ و $AlVO_4$ بعد از تست خوردگی داغ شناسایی شده اند. این موضوع می‌تواند نشان دهنده واکنش کم‌تر نمک و انادیموم با ایتریا باشد. مطالعات موهان و همکارانش [۹] نشان می‌دهد که شاید $CrVO_4$ و $AlVO_4$ ایجاد شده، تشکیل کریستال‌های YVO_4 و ZrO_2 مونوکلینیک را به تعویق



مرحله دوم



مرحله اول



مرحله سوم

شکل ۷. شماتیکی از توصیف تخریب به وجود آمده بواسطه خوردگی داغ [۱۲].

مکانیزم‌های آرایه شده با نتایج به دست آمده توسط گانگ و همکارانش در سال ۲۰۰۶ [۱۳] و لیو همکارانش در سال ۲۰۰۹ [۱۴] برای موارد مشابه تطابق قابل قبولی دارد. نکته اصلی برای بالاتر بودن مقاومت به خوردگی داغ YSZ , FGM وجود لایه میانی و کامپوزیتی YSZ+MCrAlY است. به نظر می رسد در این لایه حضور ذرات Al و Cr ، در اثر واکنش با نمک مذاب، منجر به تشکیل CrVO_4 و AlVO_4 به عنوان محصولات دیگر خوردگی داغ می شوند که در نتیجه آن سطح تماس YSZ با نمک‌های مذاب کاهش پیدا می کند. این کاهش تماس منجر به کاهش واکنش میان آن دو و در نتیجه کم شدن میزان تبدیل ZrO_2 تتراگونال به مونوکلینیک و کاهش تشکیل کریستال‌های YVO_4 که دلیل اصلی تخریب پوشش‌های TBC است، می شود. قابل ذکر است در صورت امکان بررسی فازی نمونه‌ها در دماهای بالا می توان تحلیل دقیق تری از مکانیزم تخریب پوشش‌ها آرایه کرد.

نتیجه گیری

بر اساس بررسی‌های انجام شده در این پژوهش نتایج زیر حاصل شده است:

- ۱- امکان پذیری لایه نشانی پوشش‌های TBC به صورت FGM (Functionally Graded Materials) با روش پاشش پلاسمایی در هوا وجود دارد.
- ۲- از هم پاشیدگی پوشش YSZ معمولی حین آزمون خوردگی داغ، به علت نفوذ نمک مذاب و واکنش با ایتربای پایدارکننده است. در این حالت شکل گیری ZrO_2 مونوکلینیک و کریستال‌های YVO_4 منجر به شکست TBC می شوند.
- ۳- در پوشش سه لایه YSZ , FGM حضور ذرات Al و Cr در لایه میانی و کامپوزیتی YSZ+MCrAlY منجر به تشکیل CrVO_4 و AlVO_4 به عنوان محصولات دیگر خوردگی داغ می شود.
- ۴- تشکیل CrVO_4 و AlVO_4 در حین آزمون خوردگی داغ منجر به کاهش سطح تماس YSZ با نمک‌های مذاب شده که نتیجه آن واکنش کم تر پایدار کننده ایتربایی با نمک مذاب،

مرحله سوم: در این مرحله آسیب ماکروسکوپی که نفوذ نمک‌ها کنترل کننده آن است، اتفاق می افتد. با افزایش زمان به تدریج، زیرکونیای مونوکلینیک در کل لایه پوشش تشکیل می شود. تشکیل زیرکونیای مونوکلینیک موجب شکسته شدن پوشش زیرکونیا در فرآیند سرد کردن می شود. تخریب در این مرحله، به دلیل تغییر فاز سریع تتراگونال به مونوکلینیک انجام می شود که می تواند به وسیله استفاده از پایدارکننده‌های اسیدی تر مانند CeO_2 به تعویق افتاده یا به طور کامل متوقف شود [۱۱ و ۱۲].

بنابراین شکست و تخریب YSZ به علت تبدیل زیرکونیای تتراگونال به مونوکلینیک به سرعت اتفاق می افتد که این تبدیل را می توان به وسیله کاهش سطح تماس YSZ با نمک‌های مذاب به تعویق انداخت و یا مانع شد.

در این تحقیق به جای یک پوشش 350 میکرومتری YSZ بر روی لایه MCrAlY ، از پوشش دو لایه $50\% \text{MCrAlY} + 50\% \text{YSZ}$ به ضخامت 150 و 200 میکرومتر بر روی لایه MCrAlY استفاده شده است. بر طبق نتایج به دست آمده، مکانیزم تخریب پوشش‌های مذکور در حین خوردگی داغ به صورت زیر بیان می شود:

- ✓ پوشش YSZ : تخریب و جدا شدن پوشش بالایی به علت ایجاد تنش‌های داخلی در پوشش YSZ در اثر تغییر حجم ناشی از تبدیل ZrO_2 تتراگونال به مونوکلینیک و تشکیل مقدار زیاد کریستال‌های YVO_4 با اندازه‌های $80-50$ میکرومتری.
- ✓ پوشش YSZ , FGM : برای این پوشش مکانیزم تخریب همان ایجاد تنش‌های داخلی در پوشش YSZ در اثر تغییر حجم ناشی از تبدیل ZrO_2 تتراگونال به مونوکلینیک است با این تفاوت که کریستال‌های YVO_4 با اندازه کوچک تر (تقریباً 10 میکرومتری) و در زمان طولانی تری تشکیل شده اند. دلیل این امر وجود عناصر فعال تر مانند آلومینیوم و کروم در لایه میانی است که در اثر واکنش با وانادیوم، واکنش ایتربوم با وانادیوم را به تعویق انداخته که نتیجه آن مقدار کم تر YVO_4 (محصول اصلی خوردگی داغ و دلیل تخریب نمونه در این فرآیند) است.

منابع

1. A. G. Evans, D. R. Mumm, J. W. Hutchinson, G. H. Meier and F. S. Pettit, *Mechanisms controlling the durability of thermal barrier coatings*, Progress in Materials Science, 46(2001)505-553.
2. M. M. Verdiana, K. Raeissi and M. Saleh, *Corrosion performance of HVOF and APS thermally sprayed NiTi intermetallic coatings in 3.5% NaCl solution*, Corrosion Science, 52(2010)1052-1059.
3. S. Raghavan and M. J. Mayo, *The hot corrosion resistance of 20 Mol% YTaO_4 stabilized tetragonal zirconia and 14 Mol% Ta_2O_5 stabilized orthorhombic zirconia for thermal barrier coating applications*, Surface and Coatings Technology, 160(2002)187-196.
4. S. Y. Park, J.H. Kim, M. C. Kim, H. S. Song and C. G. Park, *Microscopic observation of degradation behavior in yttria and ceria stabilized zirconia thermal barrier coatings under hot corrosion*, Surface & Coatings Technology, 190 (2005) 357– 365.
5. N. Birks, G. Meier, and F. Pettit, *Introduction to the high-temperature oxidation of metals*, cambridge, (2006)205-253.
6. R. L. Jones, *Some aspects of the hot corrosion of thermal barrier coatings*, Journal of Thermal Spray Technology, (1997)77-84.
7. A. Afrasiabi, M. Saremi and A. Kobayashi, *A comparative study on hot corrosion resistance of three types of thermal barrier coatings: YSZ, YSZ + Al_2O_3 and YSZ/ Al_2O_3* , Materials Science and Engineering, 478(2008)264-269.
8. M. P. Borom, C. A. Johnson and L. A. Peluso, *Role of environment deposits and operating surface temperature in spallation of air plasma sprayed thermal barrier coatings*, Surface and Coatings Technology, 86-87(1996)116-126.

تغییر فاز کم تر زیرکونیای تتراگونال به زیرکونیای مونوکلینیک، تغییر حجم و تنش های کم تر و در نهایت طولانی شدن مدت مقاومت پوشش TBC در مقابل خوردگی داغ می شود.

تشکر و قدردانی

بدین وسیله مراتب تشکر و قدردانی خود را از آقای مهندس حمید دهاقین، مسئول بخش پاشش پلاسمایی پژوهشگاه مواد و انرژی و سایر همکاران در آزمایشگاه های شناخت مواد، شکل دادن و خوردگی اعلام می داریم.

9. P. Mohan, T. Patterson, V. H. Desai and Y.H. Sohn, *Degradation of free-standing air plasma sprayed CoNiCrAlY coatings by vanadium and phosphorus pentoxides*, Surface and Coatings Technology, 203(2008)427-431.
10. A. M. Khoddami, A. Sabour and S. M. M. Hadavi, *Microstructure formation in thermally-sprayed duplex and functionally graded NiCrAlY/Yttria-Stabilized Zirconia coatings*, Surface & Coatings Technology, 201(2007)6019–6024.
11. S. Stecura, *Optimization of the NiCrAl-Y/ZrO₂-Y₂O₃ thermal barrier system*, NASA Tech. Memo, (1985).
12. S. Bose, *High Temperature Coatings*, Elsevier Science & Technology Books, (2007).
13. W. B. Gong, C. K. Sha, D. Q. Sun and W.Q. Wang, *Microstructures and thermal insulation capability of plasma-sprayed nanostructured ceria stabilized zirconia coatings*, Surface and Coatings Technology, 201(2006)3109-3115.
14. Z. G. Liu, J. H. Ouyang, Y. Zhou and X. L. Xia, *Hot corrosion behavior of V_2O_5 -coated $\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ ceramic in air at 700-850 °C*, Journal of the European Ceramic Society, (2009).