



بررسی رفتار اکسیداسیون پوشش چندلایه سد حرارتی (FG-TBC) پاشش پلاسمایی شده

حمیدرضا مقدم^۱، علی داودی^۲، محمود اکبری باصری^۳

^۱. گروه مهندسی مواد، علوم و تحقیقات خراسان رضوی، دانشگاه آزاد اسلامی، نیشابور، ایران، کارشناس ارشد

^۲. دانشگاه فردوسی مشهد - دانشکده مهندسی - گروه مهندسی مواد - دانشیار

^۳. پژوهشگاه فضایی ایران - پژوهشکده سامانه های حمل و نقل فضایی - مربی

چکیده

پوشش های سد حرارتی از جمله پوشش های محافظ هستند که وظیفه ی کاهش دمای اجزاء و در نتیجه افزایش طول عمر آنها را برعهده دارند. این تحقیق به منظور مقایسه رفتار اکسیداسیون پوشش سد حرارتی (TBC) دولایه و پوشش پنج لایه ی سد حرارتی (FG-TBC) انجام شد. زیرلایه ی این پوشش ها مشابه نمونه ی صنعتی، از جنس فولاد PH 17-4 انتخاب گردید. از پودر CoNiCrAlY برای پوشش دهی لایه ی فلزی زیرین و از پودر 8YSZ برای پوشش دهی لایه ی سرامیکی فوقانی استفاده شد. در پوشش پنج لایه، لایه های میانی شامل مخلوطی از پودر YSZ+CoNiCrAlY با نسبت های مشخص می باشند. این نمونه ها به روش پاشش پلاسمای در اتمسفر هوا تهیه گردیدند. نمونه های پوشش داده شده، به ترتیب در ۱۸، ۳۶، ۵۴، ۹۰ و ۱۲۶ ساعت و در دمای 950°C تحت آزمون اکسیداسیون پیوسته قرار گرفتند. بررسی رفتار اکسیداسیون پوشش ها، با استفاده از میکروسکوپ الکترونی (SEM) مجهز به EDS انجام گردید. در نهایت مشاهده شد که مقاومت به اکسیداسیون پوشش پنج لایه سد حرارتی (FG-TBC) بالاتر از پوشش سد حرارتی (TBC) دو لایه است.

واژه های کلیدی: پوشش سد حرارتی (TBC)؛ لایه های درجه بندی شده ی مواد (FGM)؛ پوشش سد حرارتی چندلایه

(FG-TBC)؛ پاشش پلاسمای.

مقدمه

پوشش های سد حرارتی به منظور حفاظت قطعات موتورهای دما بالا مورد استفاده قرار می گیرند [۱]. برای کاهش دمای سوپر آلیاژها و جلوگیری از انهدام ساختاری آنها، از پوشش های سد حرارتی^۱ در گرمترین قسمت های محفظه استفاده می گردد [۲، ۳]. این پوشش ها از موادی با ضریب انتقال حرارت پایین تهیه می شوند تا حرارت به مقدار کمتری به سطح قطعه انتقال یابد [۱]. در نتیجه دمای کاری قطعات و طول عمر آنها افزایش می یابد [۴، ۵]. این پوشش ها در موتورهای هوایی، توربین های گازی، صنعتی و ... مورد استفاده قرار می گیرند [۶-۸].

پوشش های سد حرارتی معمولاً از دو لایه اصلی شامل پوشش فوقانی سرامیکی و پوشش زیرین فلزی تشکیل شده اند که روی آلیاژ فلزی زیر لایه رسوب داده می شوند [۹]. زیر لایه ها عموماً سوپر آلیاژهای پایه نیکل و کبالت می باشند. البته در برخی موارد از فولادهای خاص به عنوان زیر لایه ی این پوشش ها استفاده شده است. پوشش زیرین^۲، مقاومت اکسایشی لازم را برای زیر لایه ی فلزی فراهم می کند [۱۰، ۱۱]. این پوشش فلزی، معمولاً یا یک آلومیناید نفوذی است و یا یک پوشش روکشی با ترکیب عمومی $M\text{CrAlY}$ (Co یا Ni) می باشد. در سیستم های پوششی نوین، پوشش زیرین عموماً یکی از پوشش های گروه $M\text{CrAlY}$ است [۷]. این پوشش، در دماهای بالا با تشکیل یک لایه ی اکسید رشد یافته با حرارت^۳ (TGO) در فصل مشترک فلز و سرامیک [۵، ۷]، از سطح سوپر آلیاژ در برابر اکسیداسیون محافظت می کند.

پوشش فوقانی^۴ شرایط عایق حرارتی را فراهم می کند. این لایه ی سرامیکی، هدایت حرارتی پایینی دارد که معمولاً از جنس زیرکینیا (ZrO_2) می باشد [۴، ۹]. برای جلوگیری از استحاله ی فازی زیرکونیا و حذف تغییرات حجمی آن، از زیرکینای پایدار شده استفاده می گردد. معمولاً، پوشش های زیرکینای پایدار شده با ایتریا (YSZ) (۶-۸ درصد وزنی Y_2O_3 ، الباقی ZrO_2)، بیشترین استفاده را به عنوان پوشش سد حرارتی دارند [۱۲].

لایه ی TGO که با افزایش دما تشکیل می شود، ناشی از اکسیداسیون پوشش $M\text{CrAlY}$ است. این لایه ی اکسیدی، بطور پیوسته سطح این پوشش را دربر گرفته و به عنوان یک لایه ی محافظ باعث افزایش مقاومت اکسیداسیون پوشش می گردد. ضخامت و ساختار لایه ی TGO، در سطح تنش، توزیع تنش و تعیین پایداری پوشش TBC مؤثر است [۱۰]. از طرفی تشکیل لایه ی آلومینا به عنوان TGO منجر به انرژی کرنش بالا در این لایه می شود. تنش بوجود آمده از رشد اضافی TGO، به دلیل افزایش حجم آلومینای بوجود آمده از اکسیداسیون آلومینیوم موجود در پوشش زیرین است. این انرژی کرنش می تواند منجر به نوسانات TGO، تشکیل ترک و انتشار آن و در نهایت متلاشی نمودن پوشش سرامیکی فوقانی شود. همچنین بر اثر قرار گرفتن در شرایط اکسیداسیون، تغییر فاز اکسید آلومینیوم مشاهده می گردد [۱۳]. علاوه بر این، تغییر ترکیب TGO

¹ Thermal Barrier Coating

² Bond Coat

³ Thermally grown oxide

⁴ Top coat

می تواند مقاومت اکسیداسیون پوشش زیرین را کاهش داده و در نهایت حفاظت در برابر خوردگی کم شود. بنابراین، ارزیابی غیر مخرب رشد TGO و تغییر ترکیب آن، جهت پیش بینی طول عمر باقیمانده پوشش سد حرارتی ضروری است [۱۴].

در لایه های TGO یک ضخامت بحرانی وجود دارد که انهدام TBC را معین می کند [۹]. پوشش های سد حرارتی پاشش پلاسمایی شده با ورقه ورقه شدن پوشش سرامیکی از بین می روند. نیروی محرکه ی ورقه ورقه شدن، ترکیبی از کرنش حرارتی سیکلی ناشی از عدم تطابق ضریب انبساط حرارتی، اکسیداسیون پیوسته ی لایه ی زیرین و در نتیجه رشد لایه ی TGO و همچنین کرنش مکانیکی سیکلی خارجی است [۹].

یکی از راه های کاهش کرنش عدم تطابق حرارتی، تشکیل لایه های درجه بندی شده ی مواد^۱ (FGM) است [۱۴، ۱۵]. پوشش سد حرارتی با لایه های درجه بندی شده^۲ (FG-TBC) با تغییر تدریجی ترکیب لایه ها، برای کاهش این مشکلات پیشنهاد شده است [۳]. این نوع پوشش ها خواص برتری نسبت به پوشش های دو لایه دارند. تاکنون تحقیقات گسترده ای به منظور مقایسه ی رفتار اکسیداسیون پوشش های TBC و FG-TBC انجام شده است که نتایج این بررسی ها افزایش مقاومت به اکسیداسیون پوشش های FG-TBC را نسبت به پوشش های TBC دو لایه نشان می دهند [۱۶، ۱۷].

مواد و روش تحقیق

پوشش نوع اول (A)، یک پوشش سد حرارتی (TBC) دو لایه و نوع دوم (C)، یک پوشش سد حرارتی پنج لایه (FG-TBC) می باشد. شماتیک این دو نوع پوشش در شکل ۱ آورده شده است. لایه های میانی در پوشش پنج لایه، مخلوطی از لایه های فوقانی و زیرین با نسبت های مشخص شده، می باشند. در این شکل، ترکیب لایه های هر دو نوع پوشش و همچنین ضخامت هر لایه نشان داده شده است. مجموع ضخامت لایه های پوشش در هر دو نوع پوشش با یکدیگر برابر بوده و در حدود ۴۵۰ میکرون می باشد.

جنس فلز زیرلایه^۳ از فولاد 17-4PH انتخاب گردید. زیرلایه های مورد استفاده در این آزمون بصورت قرص های فلزی با قطر 20mm و ارتفاع حدود 14mm تهیه شدند. در این نمونه ها، از پودر سرامیکی 8YSZ با نام تجاری Metco 204NS جهت پوشش دهی لایه ی سرامیکی فوقانی و از پودر فلزی CoNiCrAlY با نام تجاری Amperit 415.006 و ترکیب شیمیایی Co 32Ni 21Cr 8Al 0.5Y برای پوشش دهی لایه فلزی زیرین استفاده گردید.

پوشش دهی نمونه ها به روش پاشش پلاسمای در اتمسفر هوا (APS) انجام گردید. در جدول ۱ پارامترهای سیستم پاشش پلاسمای جهت پوشش دهی هر کدام از لایه های این نمونه ها ذکر شده است.

¹ Functionally Graded Material

² Functionally graded thermal barrier coating

³ substate

بررسی رفتار شوک حرارتی پوشش چندلایه سد حرارتی (FG-TBC) پوشش پلاسمایی شده

آزمون اکسیداسیون پیوسته برای تعداد ۵ نمونه از هر دو نوع پوشش انجام شد. برای انجام آزمون، تمام این نمونه ها در داخل کوره الکتریکی قرار گرفتند. سپس کوره روشن شده و نرخ افزایش دمای آن در حدود $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ تنظیم گردید. آزمون اکسیداسیون در 950°C انجام شد.

نمونه های اول از هر نوع پوشش، پس از گذشت ۱۸ ساعت اکسیداسیون پیوسته در دمای مذکور، از کوره خارج شدند. به همین ترتیب نمونه های دوم پس از ۳۶ ساعت، نمونه های سوم پس از ۵۴ ساعت، نمونه های چهارم پس از ۹۰ ساعت و نمونه های پنجم نیز پس از ۱۲۶ ساعت اکسیداسیون پیوسته از کوره خارج گردیدند. لازم به ذکر است کوره در بین این مراحل بصورت پیوسته و یکسره روشن بوده و نمونه ها تحت اکسیداسیون پیوسته قرار گرفتند. جهت بررسی وضعیت تشکیل و رشد لایه ی TGO در این نمونه ها، سطح مقطع تمام نمونه های مورد آزمون توسط میکروسکوپ الکترونی (SEM) مورد بررسی قرار گرفتند.

نتایج و بحث

در شکل ۲، در قسمت (a)، تصویر SEM سطح مقطع نمونه ی پوشش TBC دولایه (نوع A) ، قسمت (b)، تصویر FESEM سطح این پوشش ، قسمت (c)، تصویر SEM سطح مقطع نمونه ی پوشش FG-TBC پنج لایه (نوع C) و در قسمت (d)، تصویر FESEM سطح این پوشش مشاهده می گردد.

در این شکل در تصاویر a و c، لایه های مختلف این پوشش ها با ذکر نسبت پودرهای مورد استفاده در هر لایه، نشان داده شده است. تصاویر FESEM سطح این دو نوع پوشش (تصاویر b و d) نیز به دلیل مشترک بودن ترکیب لایه ی فوقانی در این پوشش ها، کاملاً مشابه یکدیگرند.

پس از انجام آزمون اکسیداسیون برای تمام نمونه های این دو نوع پوشش، بررسی وضعیت رشد و ضخامت لایه های TGO در این نمونه ها با استفاده از تصاویر SEM تهیه شده از سطح مقطع آنها انجام شد. طبق نتایج آنالیز EDS ، لایه ی TGO حاوی اکسیدهای فلزات موجود در پوشش زیرین است که اکثر محتوای این لایه، اکسید آلومینیوم می باشد. در بررسی سطح مقطع هر کدام از نمونه ها، ضخامت های متفاوتی از لایه ی TGO مشاهده گردید، البته ضخامت این لایه در هر نمونه تقریباً در یک محدوده مشخصی قرار داشت. ضخامت لایه ی TGO هر نمونه، پس از بررسی تمام سطح مقطع آن بصورت میانگینی از ضخامت این لایه گزارش گردید.

در شکل ۳ تصویر SEM سطح مقطع پوشش TBC دولایه (نوع A) در زمان های اکسیداسیون ۱۸ ، ۳۶ ، ۵۴ ، ۹۰ و ۱۲۶ ساعت مشاهده می گردد.

در این شکل در تصاویر مشخص شده با حرف (a) ، تصویر سطح مقطع پوشش و در تصاویر (b) ، ضخامت TGO نشان داده شده است. همان طور که در این تصویر مشاهده می گردد، در پوشش های TBC دولایه، TGO بصورت یک لایه ی پیوسته در فصل مشترک پوشش زیرین و پوشش فوقانی تشکیل شده است.

در شکل ۳، تصویر A-126(b)، لایه ی اکسیدی TGO در نمونه ی ۱۲۶ ساعت اکسید شده را نشان می دهد. در این تصویر، تفاوت رنگ در لایه ی TGO مشاهده می گردد، به نحوی که این لایه به دو قسمت با رنگ های متفاوت تقسیم شده است. لایه ی خاکستری کم رنگ، که به سمت پوشش سرامیکی YSZ رشد یافته است و لایه ی خاکستری پر رنگ، که به سمت پوشش فلزی زیرین می باشد. با استفاده از آنالیز EDS، ترکیبات این لایه ها مشخص گردید. این تفاوت رنگ، در نمونه های قبل از ۱۲۶ ساعت بصورت جزئی و اندک مشاهده گردید ولی در نمونه ۱۲۶ ساعت، به وضوح و کاملاً تفکیک شده از یکدیگر دیده می شود.

آنالیز لایه ی TGO در نمونه های قبل از ۱۲۶ ساعت نیز مشابه آنالیز لایه خاکستری پر رنگ می باشد. اکثر محتوای لایه ی خاکستری پر رنگ، شامل اکسید آلومینیوم است، ولی ترکیب لایه ی خاکستری کم رنگ، شامل اکسیدهای آلومینیوم، کروم، کبالت و نیکل می باشد.

این تغییر ترکیب نشان می دهد که با افزایش زمان اکسیداسیون، ترکیب لایه ی TGO در ناحیه ی سطح تماس این لایه با پوشش سرامیکی YSZ، تغییر کرده و اکسیدهای کروم، کبالت و نیکل جایگزین مقداری از اکسید آلومینیوم می شوند. تغییر ترکیب شیمیایی در لایه ی TGO در نمونه های قبل از ۱۲۶ ساعت اکسیداسیون بصورت جزئی وجود دارد. تغییر ترکیب TGO می تواند مقاومت اکسیداسیون پوشش زیرین را کاهش دهد [۱۶]. با افزایش زمان اکسیداسیون در پوشش TBC دولایه، مقدار و ضخامت لایه ی اکسیدی TGO افزایش یافت. با افزایش ضخامت این لایه ها، ترک هایی در میان آنها مشاهده گردید که گسترش این ترکها در زمان های اکسیداسیون بالاتر، باعث ایجاد ترک های عمیق تر در پوشش شده و منجر به تخریب و متلاشی شدن پوشش می گردد.

در جدول ۲ میانگین ضخامت لایه ی TGO در هر یک از نمونه های این نوع پوشش نشان داده شده است. در شکل ۴ تصویر SEM سطح مقطع پوشش FG-TBC پنج لایه (نوع C) در زمان های اکسیداسیون ۱۸، ۳۶، ۵۴، ۹۰ و ۱۲۶ ساعت مشاهده می گردد.

در این شکل، در تصاویر مشخص شده با حرف (a)، تصویر کلی از سطح مقطع پوشش و در تصاویر (b)، ضخامت لایه ی TGO نشان داده شده است. در پوشش FG-TBC پنج لایه، شبکه ای از لایه های TGO در سطح مقطع پوشش تشکیل شده است. با افزایش زمان اکسیداسیون، این شبکه گسترده تر می گردد. علت ایجاد این شبکه ی گسترده، وجود لایه های میانی در پوشش FG-TBC می باشد.

در شکل ۵ تشکیل شبکه ای از لایه های TGO در نمونه ۱۲۶ ساعت اکسید شده ی پوشش FG-TBC نشان داده شده است. در این تصویر، در قسمت های بسیار کمی از لایه ی اکسیدی TGO تفاوت رنگ مشاهده می گردد. این تفاوت رنگ در نمونه های قبل از ۱۲۶ ساعت نیز در مقادیر بسیار کم مشاهده گردید. در قسمت های تغییر رنگ یافته، مشابه پوشش نوع A، اکسیدهای کروم، کبالت و نیکل جایگزین مقداری از اکسید آلومینیوم شده است. البته مقدار این تغییر ترکیب در پوشش FG-TBC بسیار اندک است.

با افزایش زمان اکسیداسیون، مقدار و ضخامت لایه های TGO در این نوع پوشش نیز افزایش یافته و ترک هایی در میان آنها مشاهده گردید. گسترش این ترک ها در زمان های اکسیداسیون بالاتر، باعث ایجاد ترک های عمیق تر در پوشش شده و منجر به تخریب و متلاشی شدن پوشش می گردد. در جدول ۳ میانگین ضخامت لایه ی TGO در نمونه های پوشش FG-TBC پنج لایه نشان داده شده است.

نتیجه گیری

(۱) در هر دو نوع پوشش با افزایش زمان اکسیداسیون، مقدار و ضخامت لایه ی TGO افزایش یافت.
 (۲) افزایش زمان اکسیداسیون باعث تغییر رنگ قسمت هایی از لایه ی TGO ، از خاکستری پر رنگ به خاکستری کم رنگ گردید. ترکیب شیمیایی این لایه در قسمت های تغییر رنگ یافته، از اکسید آلومینیوم به مخلوطی از اکسیدهای آلومینیوم، کروم، کبالت و نیکل تبدیل شده است. یعنی با افزایش زمان اکسیداسیون اکسیدهای کروم ، کبالت و نیکل جایگزین مقادیری از اکسید آلومینیوم در لایه ی TGO شده اند. این تغییر ترکیب شیمیایی موجب کاهش مقاومت به اکسیداسیون پوشش می گردد.
 (۳) در پوشش TBC دو لایه، تغییر رنگ و ترکیب شیمیایی لایه TGO در نمونه ۱۲۶ ساعت اکسید شده، کاملاً واضح بوده و این نواحی از یکدیگر تفکیک شده اند. ولی در پوشش FG-TBC تغییر رنگ و ترکیب شیمیایی در لایه TGO حتی در نمونه ۱۲۶ ساعت اکسید شده ، در نواحی بسیار کم و بصورت جزئی وجود دارد. در نتیجه، مقاومت به اکسیداسیون پوشش FG-TBC بالاتر از پوشش TBC دو لایه می باشد.

مراجع

1. Uwe Schulz , et al., "Some recent trends in research and technology of advanced thermal barrier coatings". *Aerospace Science and Technology* , 2003 , 7 , 73-80.
2. Zhihai Han , et al., "A comparison of thermal shock behavior between currently plasma spray and supersonic plasma spray CeO₂-Y₂O₃-ZrO₂ graded thermal barrier coatings" , *Surface & Coatings Technology* , 2007 , 201 , 5253-5256.
3. Tsukamoto, H., "Design of functionally graded thermal barrier coatings based on a nonlinear micromechanical approach" , *Computational Materials Science* , 2010 , 50 , 429-436.
4. Hossein Jamali, et al., "Comparison of thermal shock resistances of plasma-sprayed nanostructured and conventional yttria stabilized zirconia thermal barrier coatings" , *Ceramics International* , 2012 , 38 , 6705-6712.
5. Shenhua Song and P. Xiao, "An impedance spectroscopy study of high-temperature oxidation of thermal barrier coatings" , *Materials Science and Engineering* , 2003 , B97, 46-53.
6. Sumei Zhao , et al., "Characterization and thermal cycling behavior of La₂(Zr_{0.7}Ce_{0.3})₂O₇/8YSZ functionally graded thermal barrier coating prepared by atmospheric plasma spraying" , *Journal of Alloys and Compounds* , 2014 , 592 , 109-114.

7. Reza Ghasemin, et al., "Comparison of microstructure and mechanical properties of plasma-sprayed nanostructured and conventional yttria stabilized zirconia thermal barrier coatings", *Ceramics International*, 2013, 39, 8805-8813.
8. Zhenhua Xua, et al., "Effect of diffusion barrier on the high-temperature oxidation behavior of thermal barrier coatings", *Journal of Alloys and Compounds*, 2008, 466, 471-478.
9. Raheleh Ahmadi-Pidani, et al., "Improving the thermal shock resistance of plasma sprayed CYSZ thermal barrier coatings by laser surface modification", *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, 50, 780-786.
10. Hua-Ping Xiong, et al., "Experimental study on heat insulation performance of functionally graded metal/ceramic coatings and their fracture behavior at high surface temperatures", *Surface & Coatings Technology*, 2005, 194, 203-214.
11. Md Shawkat Ali, Shenhua Song, and P. Xiao, "Evaluation of degradation of thermal barrier coatings using impedance spectroscopy", *Journal of the European Ceramic Society*, 2002, 22, 101-107.
12. Gurusamy Shanmugavelayutham and A. Kobayashi, "Mechanical properties and oxidation behaviour of plasma sprayed functionally graded zirconia–alumina thermal barrier coatings". *Materials Chemistry and Physics*, 2007, 103, 283–289.
13. Huibin Xu and H. Guo, "Metallic coatings for high-temperature oxidation resistance", in *Thermal barrier coatings*, 2011, Woodhead Publishing.
14. Herman, H. and S. Sampath, "Thermal spray coatings", in *Metallurgical and Ceramic Protective Coatings*, 1996, Chapman & Hall.
15. Lifen Deng, Yuansheng Xiong, and P. Xiao, "Modelling and experimental study of impedance spectra of electron beam physical vapour deposition thermal barrier coatings", *Surface & Coatings Technology*, 2007, 201, 7755–7763.
16. P. Richer, et al., "Oxidation behaviour of CoNiCrAlY bond coats produced by plasma, HVOF and cold gas dynamic spraying", *Surface & Coatings Technology*, 2010, 204, 3962–3974.
17. Subhasisa Nath, Indranil Manna, and J.D. Majumdar, "Kinetics and mechanism of isothermal oxidation of compositionally graded yttria stabilized zirconia (YSZ) based thermal barrier coating", *Corrosion Science*, 2014, 88, 10-22.

جدول ۱: پارامترهای سیستم پاشش پلاسما جهت پوشش دهی هر کدام از لایه ها

parameters	CoNiCrAlY	25% -75%	50% -50%	75% -25%	YSZ
Gun Type	3MB	3MB	3MB	3MB	3MB
Argon flow rate (SCFH)	85	85	85	80	80
Hydrogen gas flow rate (SCFH)	15	15	15	15	15
Current (A)	450	450	470	480	500
Voltage (V)	50	50	55	55	55
Argon powder carrier gas	30	30	30	30	30
Powder feed rate (Lbs./Hr.)	10	10	15	15	15
Spray distance (Cm)	12	12	10	8	8

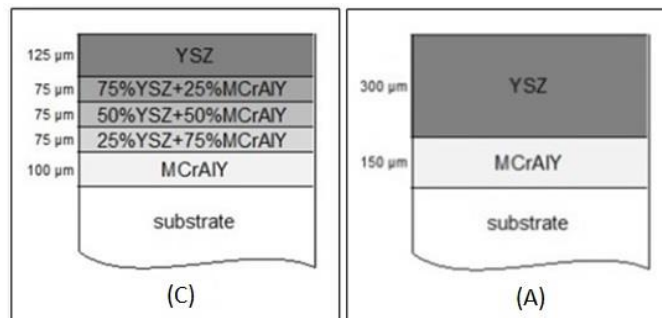
بررسی رفتار شوک حرارتی پوشش چندلایه سد حرارتی (FG-TBC) پاشش پلاسمایی شده

جدول ۲: میانگین ضخامت لایه ی TGO در نمونه های آزمون اکسیداسیون پوشش TBC دولایه (نوع A)

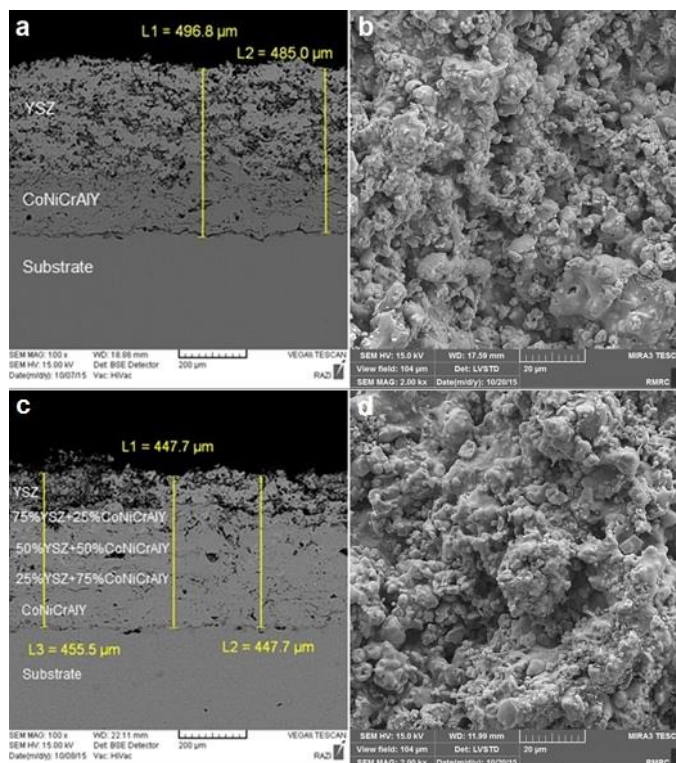
نمونه های آزمون اکسیداسیون	۱۸ ساعت	۳۶ ساعت	۵۴ ساعت	۹۰ ساعت	۱۲۶ ساعت
میانگین ضخامت لایه TGO (μm)	۳	۳،۷	۴،۴	۵،۱	۵،۵

جدول ۳: میانگین ضخامت لایه ی TGO در نمونه های آزمون اکسیداسیون پوشش FG-TBC پنج لایه (نوع C)

نمونه های آزمون اکسیداسیون	۱۸ ساعت	۳۶ ساعت	۵۴ ساعت	۹۰ ساعت	۱۲۶ ساعت
میانگین ضخامت لایه TGO (μm)	۲،۵	۳،۲	۴،۳	۵،۸	۶،۲



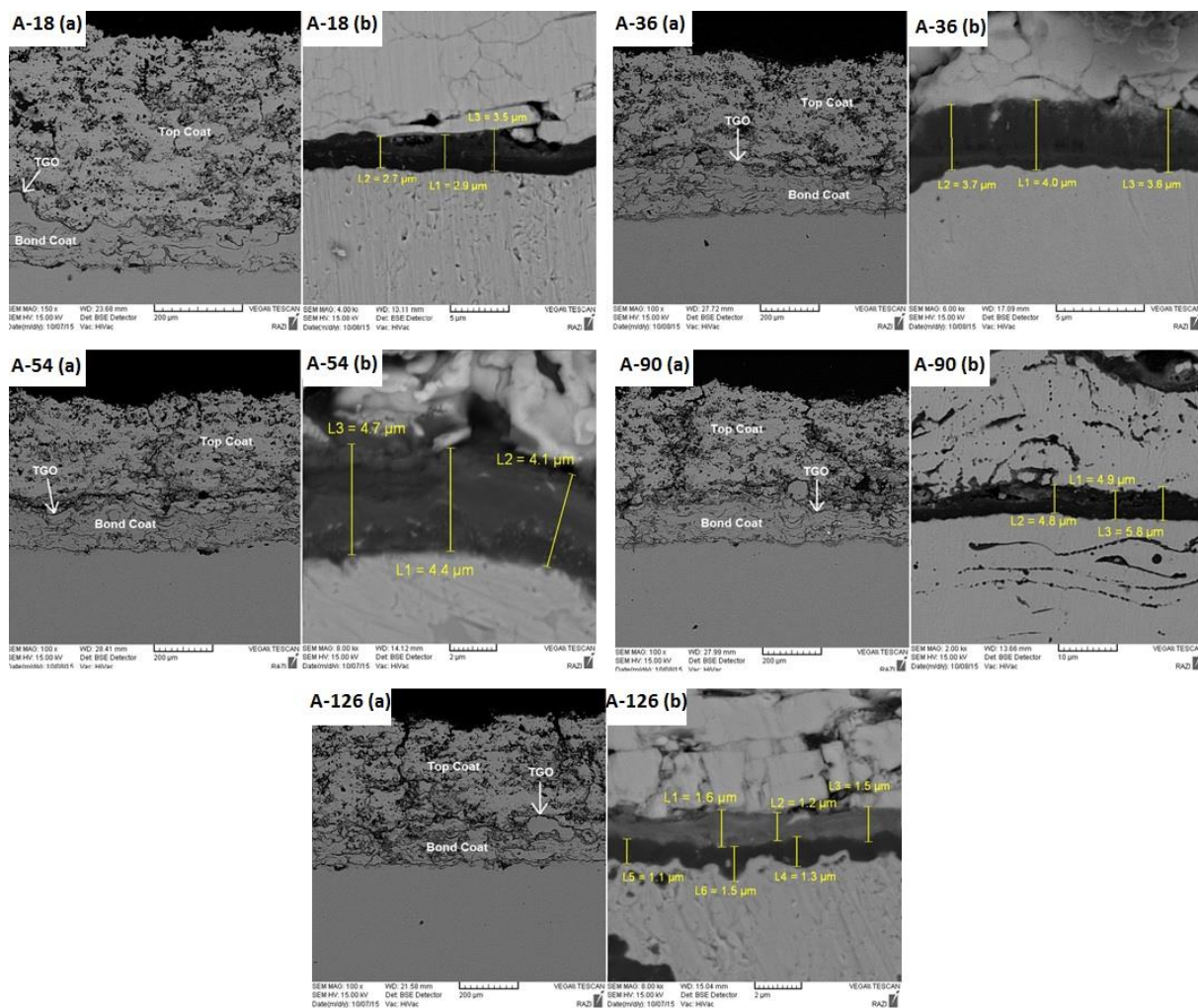
شکل ۱: (A) پوشش سد حرارتی دولایه (TBC)، (C) پوشش پنج لایه سد حرارتی (FG-TBC).



شکل ۲: (a) تصویر SEM سطح مقطع پوشش TBC دولایه، (b) تصویر FESEM سطح پوشش TBC دولایه،

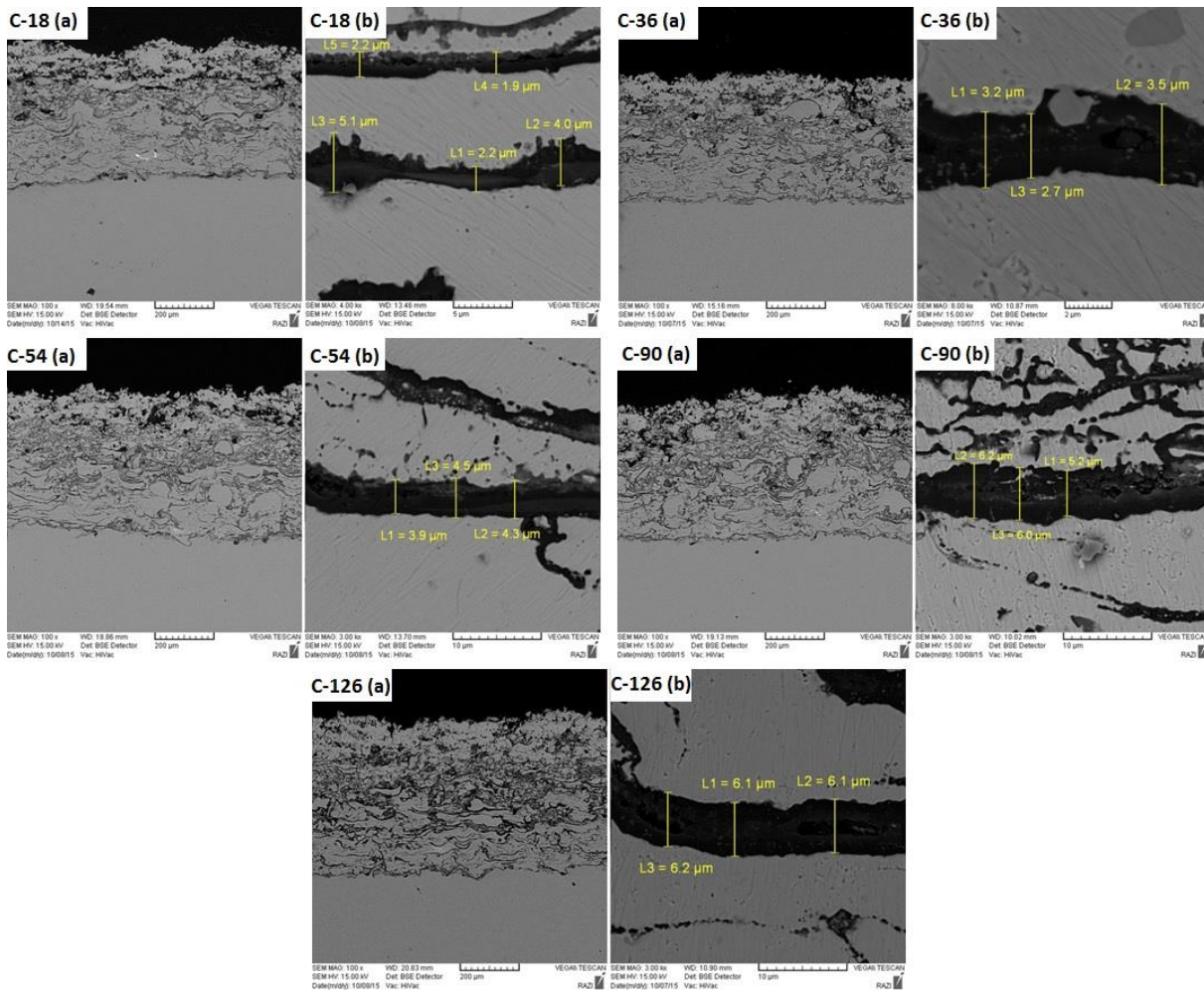
(c) تصویر SEM سطح مقطع پوشش پنج لایه FG-TBC، (d) تصویر FESEM سطح پوشش پنج لایه FG-TBC.

شانزدهمین سمینار ملی مهندسی سطح

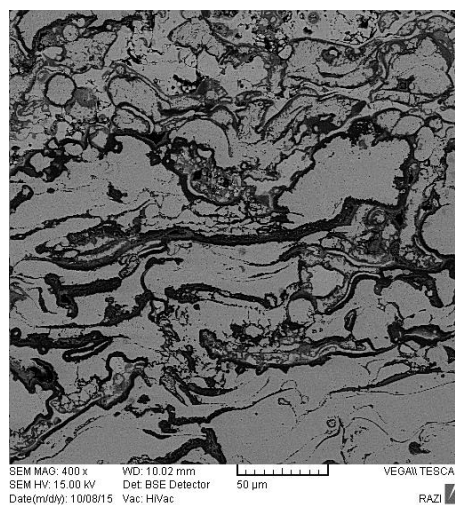


شکل ۳: (a) تصاویر SEM سطح مقطع نمونه های پوشش TBC دولایه در زمان های ۱۸، ۳۶، ۵۴، ۹۰ و ۱۲۶ ساعت اکسیداسیون، (b) ضخامت لایه های TGO در هر نمونه.

بررسی رفتار شوک حرارتی پوشش چندلایه سد حرارتی (FG-TBC) پوشش پلاسمایی شده



شکل ۴: (a) تصاویر SEM سطح مقطع نمونه های پوشش FG-TBC پنج لایه در زمان های ۱۸، ۳۶، ۵۴، ۹۰ و ۱۲۶ ساعت اکسیداسیون، (b) ضخامت لایه های TGO در هر نمونه.



شکل ۵: تشکیل شبکه ای از لایه های TGO با افزایش زمان اکسیداسیون در پوشش FG-TBC (نوع C).