



اصلاح مکانیسم شکست پوشش‌های سد حرارتی با استفاده از مواد با عملکرد شیب‌دار

محمود رضا طباطبائی^۱، باقر محمدصادقی^۲ و محمدرضا عباس نژاد^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده فناوری‌های نوین دانشگاه علم و صنعت ایران،

^۲ استادیار دانشکده مهندسی مواد و متالورژی دانشگاه علم و صنعت ایران

^۳ دانش‌آموخته رشته مهندسی مواد-سرامیک دانشگاه علوم و تحقیقات تهران

چکیده

پوشش‌های سد حرارتی بر روی سطح داغ‌ترین اجزای فلزی موتورهای توربین گازی به کار گرفته می‌شوند. به منظور دستیابی به حداکثر بازده موتورهای توربینی گازی جدید و تولید برق بیشتر نیاز به افزایش قابل توجه درجه حرارت گاز ورودی است که این امر منجر به افزایش دمای سرویس‌دهی و به تبع آن افزایش شوک حرارتی و تنش‌های حاصل از عدم تطابق ضریب انبساط حرارتی در پوشش سد حرارتی می‌شود که ترک خوردگی و پوسته‌شدن پوشش را به دنبال دارد. استفاده از مواد با عملکرد شیب‌دار اخیراً توجه محققان را در تولید پوشش‌های سد حرارتی به خود جلب کرده است. پوشش‌های سد حرارتی با عملکرد شیب‌دار با کاهش عدم انطباق ضریب انبساط حرارتی لایه‌های پوشش باعث افزایش طول عمر قطعات پوشش داده شده می‌شوند.

واژه‌های کلیدی: پوشش سد حرارتی، مواد با عملکرد شیب‌دار، اصلاح مکانیسم شکست.

¹ m.tabatabaeian93@gmail.com

۱- مقدمه

پوشش‌های سد حرارتی بر روی سطح داغ‌ترین اجزای فلزی توربین‌های گازی به کار گرفته می‌شوند، استفاده از این پوشش‌ها، موتورهای جدید را قادر خواهد ساخت که از گازی با دمای بسیار بالاتر از موتورهای پیشین استفاده کنند و این افزایش بازدهی انرژی موتورهای توربین گازی و در نتیجه تولید برق بیشتر و ارزانتر را سبب می‌شود [۱]. سیستم‌های پوشش سد حرارتی به‌طور معمول ساختار دولایه دارند که شامل لایه فوقانی سرامیکی و یک پوشش روکش اتصال فلزی هستند. لایه سرامیکی قادر است دمای فلز را تا حدود بالای 140°C کاهش دهد. تخمین زده می‌شود این مزیت پوشش سرامیکی در کاهش دمای قطعه تا 170°C کمتر از دمای محیط نیز امکان‌پذیر است. در دهه ۱۹۸۰ زیرکونیا پایدار شده با ایتریا به‌عنوان سرامیکی پیشرفته برای پوشش فوقانی در سیستم پوشش‌های سد حرارتی، استثنایی تشخیص داده شد و از آن زمان تاکنون به‌عنوان یک ماده استاندارد در توربین‌های گازی استفاده می‌شود [۲-۳]. امروزه پوشش‌های سد حرارتی از اجزای حساس در موتورهای توربین گازی به شمار می‌آیند زیرا دمای گاز در بخش‌های داغ موتور معمولاً بالاتر از نقطه ذوب قطعات فلزی زیرین پوشش است و اگر پوشش سد حرارتی از بین برود، قطعه پوشش داده‌شده به‌سرعت تخریب‌شده و موجب انفجار موتور خواهد شد. یک سیستم پوشش سد حرارتی شامل دولایه میانی مابین لایه فوقانی و سطح سوپر آلیاژ قطعه است. این لایه‌ها شامل لایه فلزی پوشش اتصال با زمینه سوپر آلیاژ و یک لایه نازک اکسید روینده حرارتی (TGO^2) مابین لایه فوقانی و پوشش اتصال می‌شوند. لایه اکسید روینده حرارتی حاصل اکسیداسیون پوشش اتصال در حال سرویس دهی است. ترکیب پوشش اتصال به‌گونه‌ای طراحی شده است که منجر به تشکیل اکسید روینده حرارتی آلومینا ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) می‌شود که سد مؤثری در برابر نفوذ اکسیژن است. شکل (۱) ساختار چندلایه پوشش سد حرارتی معمول را نشان می‌دهد. انتخاب مواد پوشش سد حرارتی بر پایه بعضی از نیازهای اساسی مانند نقطه ذوب بالا، پایداری فازی در برابر استحاله فازی بین دمای اتاق و دمای عملکرد موردنظر، هدایت حرارتی پایین، ضریب انبساط حرارتی مطابق با زیر لایه فلزی است [۴]. عدم تطابق ضریب انبساط حرارتی پوشش سرامیکی با زیرلایه و رشد TGO از عمده دلایل شکست این نوع از پوشش‌ها است. در این مقاله بهبود خواص و افزایش عمر پوشش سد حرارتی با استفاده از مواد با عملکرد شیب‌دار بررسی شده است.

۲- مکانیسم‌های تخریب سیستم پوشش‌های سد حرارتی

تخریب پوشش‌های سد حرارتی به فرایند تولید مانند پاشش پلاسما در هوا^۳ (APS) و یا رسوب فیزیکی بخار توسط پرتو الکترونی^۴ (EB-PVD) وابسته است، آخرین نتایج تحت شرایط اکسیداسیون نشان می‌دهد برای پوشش‌های اعمالی با روش APS ترکیبی از فرایندهای تخریب مانند شوک حرارتی، تنش‌های حاصل از عدم انطباق ضریب ثابت انبساط حرارتی و یا شکل گرفتن ترک‌ها در داخل پوشش سد حرارتی در مجاورت اکسید حرارتی رشد یافته

² Thermally Grown Oxide

³ Atmospheric Plasma Spray

⁴ Electron Beam Physical Vapor Deposition

(TGO) مشاهده می‌شود [۵].

۱-۲- رفتارهای شوک حرارتی پوشش‌های سد حرارتی

طول عمر پوشش‌های سد حرارتی ارتباط نزدیکی با مقاومت به شوک حرارتی و تنش‌های حاصل از عدم تطابق انبساط حرارتی دارد [۶]. در سیستم‌های لایه‌ای، ضریب انبساط حرارتی (CTE^5) یک خاصیت مهم است چراکه تنش حرارتی نتیجه عدم تطابق CTE بین لایه‌ها است و ممکن است منجر به تخریب پوشش شود. برای مثال CTE زیرلایه سوپر آلیاژ بر پایه نیکل اینکونل ۷۳۸، پوشش با لایه اتصال پاشش پلاسمایی شده $NiCoCrAlY$ و پوشش فوقانی پاشش پلاسمایی شده YSZ به ترتیب مقادیر $16 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ، $15 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ، $10.7 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ است. زیرلایه و پوشش اتصال با توجه به ترکیب شیمیایی مشابه، عدم تطابق ضریب انبساط حرارتی پایین‌تری دارند، اما تفاوت در CTE بین پوشش سرامیکی فوقانی و ترکیبات فلزی زیری بسیار بالا است. می‌توان پیش‌بینی کرد که تنش‌ها در فصل مشترک پوشش اتصال و پوشش فوقانی در حین سرد و گرم کردن زیرلایه و سیستم پوشش بیشتر نیز شود [۷]. در دمای بالا عدم تطابق در CTE زیرلایه، پوشش اتصال و لایه سرامیکی فوقانی، تنش حرارتی بالایی را در کل سیستم پوشش سد حرارتی ایجاد می‌کند. این اثر هنگامی که تعداد سیکل‌های حرارتی افزایش پیدا کند بسیار قابل توجه‌تر خواهد بود و به تدریج جوانه‌زنی، شکل‌گیری و انتشار ترک را در پوشش‌های سرامیکی سد حرارتی ترویج می‌دهد. در ادامه ترک‌های اولیه به یکدیگر پیوند خورده و با انتشار در پوشش فوقانی، نزدیک و موازی با فصل مشترک پوشش فوقانی و پوشش اتصال منجر به پوسته‌شدن پوشش اتصال می‌گردند. این پدیده بعد از تعدادی کمی چرخه حرارتی قابل مشاهده است. لازم به ذکر است که ضخامت پوشش و تفاوت جزئی در روش آزمون شوک حرارتی می‌تواند بر روی تعداد چرخه‌های مقاومت به شوک حرارتی اثرگذار باشد. این ترک‌ها به وسیله تنش کششی در صفحه تشکیل شده و در لایه‌های بیرونی پوشش گسترش پیدا کرده‌اند.

تخریب پوشش از پوشش سرامیکی داخل انجام شده و لایه به لایه پوسته‌شدن اتفاق می‌افتد، بدون آنکه هیچ پوسته‌شدنی در فصل مشترک بین پوشش سد حرارتی با پوشش اتصال اتفاق افتد [۸]. تنش بسیار بزرگی که در پوشش به دلیل تفاوت ضریب انبساط حرارتی بین لایه سرامیکی و سطح فلز، گسترش پیدا کرده، توسط رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$\sigma_c = \Delta\alpha \Delta T E / (1 - \nu^2) \quad (1)$$

در این رابطه σ_c تنش گسترش یافته در پوشش، E و ν به ترتیب مدول الاستیک و ضریب پواسون پوشش سرامیکی هستند. $\Delta\alpha$ تفاوت CTE بین پوشش سرامیکی و زیرلایه فلزی است و ΔT تغییرات دما است. ترک‌ها زمانی که تنش حرارتی بزرگ‌تر از استحکام ترکیب باشد شکل می‌گیرند. تنش‌های تولیدشده در حین چرخه حرارتی زمانی که به اندازه کافی بزرگ باشند منجر به پوسته‌شدن پوشش فوقانی می‌شود. می‌توان انتظار داشت که عامل اصلی در شکست پوشش سد حرارتی، تنش حرارتی تولیدشده در حین چرخه حرارتی باشد [۹، ۱۰]. سطح مقطع پوشش سد حرارتی

⁵ Coefficient Thermal Expansion

معمولی و بعد از آزمون شوک حرارتی در شکل (۲) نشان داده شده است. همان طور که دیده می شود، ترک ها در پوشش سرامیکی فوقانی در نزدیکی فصل مشترک پوشش فوقانی و پوشش اتصال آغاز شده است [۷].

در بسیاری از موارد، آسیب پوشش سد حرارتی مرتبط با اکسیداسیون و خواص مکانیکی پوشش اتصال و اکسید روینده حرارتی (TGO) است. TGO در فصل مشترک سرامیک و پوشش اتصال به وجود می آید. TGO از α - Al_2O_3 ، Cr_2O_3 و $NiAl_2O_4$ تشکیل شده است. این نوع آسیب در پوشش های سد حرارتی به وسیله تنش های فشاری در TGO ایجاد می شود که ناشی از افزایش حجم است و به همراه اکسیداسیون رخ می دهد. تفاوت در CTE بین TGO و پوشش اتصال تنش حرارتی ایجاد می کند، ممکن است TGO ترک خورده و فصل مشترک TGO و پوشش اتصال لایه لایه شود. با قرارگیری پیوسته پوشش سد حرارتی در معرض محیطی با حرارت بالا و اکسیدکننده در طول سرویس دهی، ضخامت TGO زیاد می شود، مطابق شکل (۳). در پوشش های سد حرارتی اعمال شده با روش APS، پوشش ها معمولاً از داخل پوشش سرامیکی فوقانی و نزدیک فصل مشترک پوشش سرامیکی فوقانی و TGO از بین می روند؛ پراکندگی تنش داخل پوشش سرامیکی به ضخامت TGO، خواص مواد پوشش سرامیکی و مورفولوژی فصل مشترک های پوشش سرامیکی / TGO / پوشش اتصال، وابسته است. زمانی که TGO نازک است، پوشش سرامیکی بر روی قله های فصل مشترک موجی شکل در حالت تنش کششی و در نواحی فرورفتگی بین دو قله در حالت تنش فشاری است. با ضخیم شدن TGO، تنش در پوشش سرامیکی قرار گرفته بر روی قله ها از کششی به فشاری تبدیل می شود و برعکس. تنش در TGO یک تأثیر مهم بر روی مکانیسم شکست پوشش سد حرارتی دارد. افزایش ضخامت TGO و تنش های حرارتی مربوطه و در کل حضور TGO تنش فشاری بسیار زیادی بین زیرلایه و سطح لایه تولید می کند که از طریق تمام عیوب در پوشش سد حرارتی انتقال پیدا کرده و منجر به ترک خوردن و پیوسته شدن پوشش می شود [۱۱-۱۲].

۳- مواد با عملکرد شیب دار (FGM^۶)

یکی از جدیدترین مفاهیم ارائه شده در زمینه طراحی مواد، مواد با عملکرد شیب دار یا FGM است. این مواد از دو ماده و به گونه ای ساخته می شوند که از سمت زیرلایه یا فلز زمینه به سمت بیرون، خواص به صورت پیوسته از یک ماده به ماده دیگر بر طبق یک رابطه خطی تغییر نماید. مزیت منحصر به فرد این مواد تغییر خواص به صورت پیوسته است که موجب خواهد شد وجود پدیده های نامطلوب مانند تمرکز تنش به حداقل برسد. FGM ها دارای تغییرات تدریجی در خواص هستند [۱۳]. پوشش های FGM تغییرات شیب دار خواص فیزیکی و مکانیکی مانند مدول الاستیک یا ضریب انبساط حرارتی را در خود نشان می دهند و به همین دلیل هم تنش های پسماند و تنش های حرارتی ناشی از عدم تطابق ضریب انبساط حرارتی را در پوشش کاهش می دهند استفاده از مواد با عملکرد شیب دار راه حلی برای افزایش مقاومت به شوک حرارتی پوشش ها است [۱۴]. پوشش های FG-TBC یک انتقال تدریجی در خواص از طریق ضخامت TBC به جای یک تغییر ناگهانی خواص در TBC دولایه را فراهم می آورد [۱۵]. این مواد می توانند ورقه هایی تشکیل

⁶ Functionally Graded Material

یافته با شیبی از فلز، سرامیک و پلیمر باشند و یا فقط در میزان تخلخل و چگالی متفاوت باشند. برای مثال سیستم‌های FGM اخیر از ترکیب شیب‌دار $MCrAlY$ و YSZ از طریق پاشش به دست آمده‌اند [۱۵]. به گونه‌ای که یک سطح از جنس سرامیک خالص و یک سطح فلز خالص و بین دو سطح ترکیب پیوسته‌ای از هر دو است. با معرفی این نوع FGM افزایش چشمگیری در طول عمر خستگی حرارتی به دست می‌آید [۱۵].

۳-۱- روش ساخت پوشش‌های FG-TBC

پوشش سد حرارتی FGM مفهومی ساده و قابل درک است اما نحوه ساخت ترکیب ریزی از سرامیک‌ها با فلزات با یک ترکیب شیب‌دار کمی مشکل است. تکنیک‌های بسیاری مورد بررسی قرار گرفته‌اند مانند پاشش حرارتی، متالورژی پودر، سنتز درجا، اما هنوز هم تحقیقات برای به دست آوردن یک روش مناسب ادامه دارد [۱۶]. برخی از این سیستم‌ها از تغذیه پودر چندگانه سرامیکی و فلزی در یک مشعل پلاسمای تنها استفاده می‌کنند. FGM می‌تواند از طریق چند مشعل پلاسمای نیز به دست آید اما در این حالت کنترل پارامترهای پاشش برای به دست آوردن یک پوشش با لایه‌های یکنواخت آسان نیست [۱۴]. اما از قبل ترکیب کردن پودرهای سرامیکی و فلزی زمان طولانی‌تری را برای ذرات پودر سرامیکی و فلزی فراهم می‌کند که در جریان پلاسمای مخلوط می‌شوند [۱۷].

برای آماده‌سازی این پودرهای کامپوزیتی، در ابتدا پودرهای سرامیکی و فلزی با نسبت‌های مورد نظر که خاصیت شیب‌دار بودن را ایجاد کند ترکیب شده و در آسیاب قرار گرفته و با سرعت متفاوتی بین ۱۰۰ تا ۲۰۰ RPM به مدت ۴-۰/۵ ساعت می‌چرخند. پودرهای کامپوزیتی تشکیل شده به صورت کروی درآمده و برای لایه‌های میانی سیستم FGM با استفاده از پاشش حرارتی استفاده می‌شوند [۱۴]. عیب این روش پیچیده بودن آماده‌سازی ترکیبات پودرهای کامپوزیتی مختلف مورداستفاده در رسوب‌دهی لایه‌های داخلی کامپوزیتی است [۱۷]. روش پاشش با یک تفنگ انفجاری نیز برای ساخت پوشش‌های سد حرارتی FGM به کار می‌رود. این روش به علت انرژی جنبشی بیشتری که به ذرات می‌دهد چسبندگی و استحکام پیوند بیشتری نسبت به روش پاشش حرارتی ایجاد می‌کند. در این روش پاشش پودرهای سرامیکی و فلزی به صورت متناوب انجام شده و دو تغذیه کننده پودر برای رسوب‌دهی یک‌به‌یک مخلوط سرامیک و فلز استفاده شده است. در یک مساحت رسوب داده شده به وسیله‌ی شات‌های پی‌درپی همپوشانی ایجاد شده و یک ترکیب عالی از سرامیک‌ها و فلزات برای هر ذره‌ی اسپلت تولید می‌شود. [۱۶].

۳-۲- نحوه بهبود مکانیسم شکست پوشش سد حرارتی با استفاده از مواد با عملکرد شیب‌دار (FGM)

در پوشش‌های سد حرارتی FGM، لایه‌های میانی با استفاده از پودرهای کامپوزیتی متفاوت و با ترکیبی شیب‌دار تشکیل شده‌اند. برخلاف پوشش دولایه معمول که یک تغییر با شیب تند در مقادیر را نشان می‌دهند، پوشش‌های FGM تشکیل شده از چندین لایه، تفاوت تدریجی در مقادیر تغییرات CTE را نشان می‌دهند در شکل (۴) این موضوع برای یک سیستم FGM پنج لایه به نمایش درآمده است [۱۴-۱۵].

پوشش‌های FGM با مواد اولیه کامپوزیتی و اعمال شده به وسیله پاشش حرارتی خواص برتری را در برابر پوشش

دولایه با ضخامت مشابه نشان می‌دهد، مقاومت به سیکل حرارتی پوشش‌های FGM مستقیماً به تفاوت تدریجی ترکیب و میکرو ساختار، مربوط شده که منجر به تغییرات تدریجی در مقدار مدول الاستیک و CTE می‌شود و در نتیجه آن تنش پسماند در حین پوشش دهی و تنش حرارتی ناشی از چرخه‌های گرم کردن و سرد کردن کاهش می‌یابد و سبب افزایش مقاومت به انتشار ترک در فصل مشترک می‌شود. در جدول (۱) تعدادی از نتایج در سیستم‌های FGM مختلف و در شرایط شوک حرارتی متفاوت نشان داده شده است [۱۴-۱۵]. باید توجه شود که رفتار تخریبی پوشش‌های سد حرارتی دولایه و FGM متفاوت است. در مورد نمونه‌های TBC همان‌طور که در بخش ۲ توضیح داده شد با متصل شدن ترک‌های افقی ناشی از عدم تطابق CTE و ترک‌های عمودی ناشی از شوک حرارتی پیوسته شدن اتفاق می‌افتد اما در نمونه‌های FG-TBC ترک‌ها در تعداد بسیار پایین تری در مقایسه با TBC دولایه شکل می‌گیرند. علت آن کمتر بودن مکان‌های تمرکز تنش حرارتی یا پایین تر بودن قله‌های تنش و متفاوت بودن مکان‌های آن به کمک ساختاری با عملکرد شیب‌دار است. همچنین ترک‌های افقی از داخل FG-TBC به‌طور کلی در ناحیه غنی از سرامیک لایه FGM دیده می‌شود همان‌طور که در شکل (۵) نشان داده شده است؛ بنابراین به نظر می‌رسد که با در نظر گرفتن مقاومت به شوک حرارتی، ناحیه غنی از سرامیک در لایه‌های پیوسته FGM می‌تواند نقطه ضعف آن باشد. [۱۶-۱۸-۱۹]. از نتایج جدول (۱) مشخص است که در سیستمی با سه لایه، همیشه امکان وقوع تنش‌های بزرگ‌تر، بالاتر از سیستم‌های چهار و پنج لایه است. می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش تعداد لایه‌های داخلی اندازه‌ی ترک‌ها کاهش پیدا می‌کند. فصل مشترک شیب‌دار بین دولایه عدم تطابق خواص مواد را کاهش داده و بنابراین تنش‌ها پایین آمده و تنش‌های حرارتی کاهش می‌یابد. هرچه تعداد لایه‌های میانی بیشتر تعداد ماکرو ترک‌های تشکیل شده کمتر و بنابراین طول عمر پوشش بیشتری مورد انتظار است اما می‌بایست برای ساخت آسان و اقتصادی یک پوشش سد حرارتی شیب‌دار از تعداد محدودی لایه استفاده شود که هر کدام آن‌ها نسبت خاصی از آلیاژ سرامیک و پوشش اتصال را دارند [۱۷-۱۸].

۳-۳- کاهش ضخامت TGO با استفاده از مواد با عملکرد شیب‌دار

همان‌طور که گفته شد سطح TGO که کاملاً از $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ تشکیل شده است در امتداد فصل مشترک نامنظم پوشش فوقانی و پوشش اتصال شکل می‌گیرد. هرچقدر که ضخامت سطح اکسیدی به علت در معرض دمای بالا قرار گرفتن رشد کند، تنش پسماند بیشتری در فصل مشترک TGO با پوشش اتصال و پوشش فوقانی ایجاد می‌شود که می‌تواند باعث جدا شدن پوشش از زیرلایه شود [۲۵]. مواد با عملکرد شیب‌دار برای کاهش ضخامت TGO و در نتیجه کاهش تنش‌های حاصل از آن به کار می‌روند. با توجه به این حقیقت که Al_2O_3 در سرکوب اکسیداسیون سیستم‌های پوشش سد حرارتی مؤثر است و به‌عنوان یک سد در برابر نفوذ اکسیژن عمل می‌کند. اضافه کردن یک لایه میانی Al_2O_3 به منظور محدود کردن هرچه بیشتر نفوذ اکسیژن و بهبود حالت فصل مشترک بین MCrAlY و لایه سرامیکی فوقانی، موجب جلوگیری از افزایش ضخامت TGO جلوگیری می‌شود [۲۱]؛ اما در حالتی که تنها یک لایه نسبتاً ضخیم Al_2O_3 بر روی پوشش سرامیکی فوقانی رسوب داده شود شکل (۷-الف) یک استحاله فازی از $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ به $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$

Al_2O_3 را شاهد خواهیم بود که این منجر به شکست زودرس می‌شود و برای مثال تنها پس از ۲۱۰ چرخه حرارتی به علت تنش‌های حاصل از عدم انطباق CTE پوشش از بین می‌رود، در حالی که با استفاده از لایه شیب‌دار شکل (۶-ب)، طول عمر پوشش در اکسیداسیون به ۷۰۰ چرخه افزایش پیدا می‌کند [۱۱-۲۰].

دلیل این پدیده را فردی به نام S. Widjaja با مقایسه عملکرد سیستم‌های FG-TBC با ترکیب و ضخامت‌های مشخص (جدول ۲)، بیان کرده است. هر چقدر که ضخامت لایه‌های آلومینا رسوب داده شده با پلاسما اسپری در یک پوشش FG-TBC با ترکیب ZrO_2/Al_2O_3 نازک‌تر باشد، پوشش طول عمر بیشتری خواهد داشت. چراکه ضخامت بیشتر، باعث تولید تنش کششی پسماند بیشتری می‌شود. در یک سیکل عملیات حرارتی به مدت ۱۸ ساعت در $^{\circ}C$ ۱۰۵۰، نمونه سوم که در آن از آلومینا با ضخامت کمتری به‌عنوان لایه محافظ در برابر اکسیژن استفاده شده، نشانه‌ای از تخریب دیده نمی‌شود در حالی که پوشش در نمونه اول به کلی پوسته و از زیر لایه جدا شده است. استحاله فازی از γ به α باعث تغییر حجم و افزایش تنش پسماند در لایه Al_2O_3 و در نتیجه انتشار ترک و از بین رفتن پوشش می‌شود، راه حلی که برای متوقف کردن تخریب پیشنهاد می‌شود، کاهش ضخامت لایه Al_2O_3 و یا به کارگیری ترکیبی شیب‌دار بین پوشش اتصال NiCoCrAlY و لایه Al_2O_3 است. در نمونه‌های دوم و سوم این راه‌حل به کار گرفته شده و نتیجه‌ی آن کاهش تنش پسماند و افزایش طول عمر پوشش بوده است. ضخامت لایه TGO حاصل از اکسیداسیون در نمونه دوم حدود $4\mu m$ و در نمونه سوم به طور میانگین $2\mu m$ است که نشان می‌دهد به کاربردن لایه آلومینا با ضخامت کمتر موجب توقف بیشتر اکسیداسیون و فرایند تخریب پوشش می‌شود [۲۵].

۴- نتیجه‌گیری

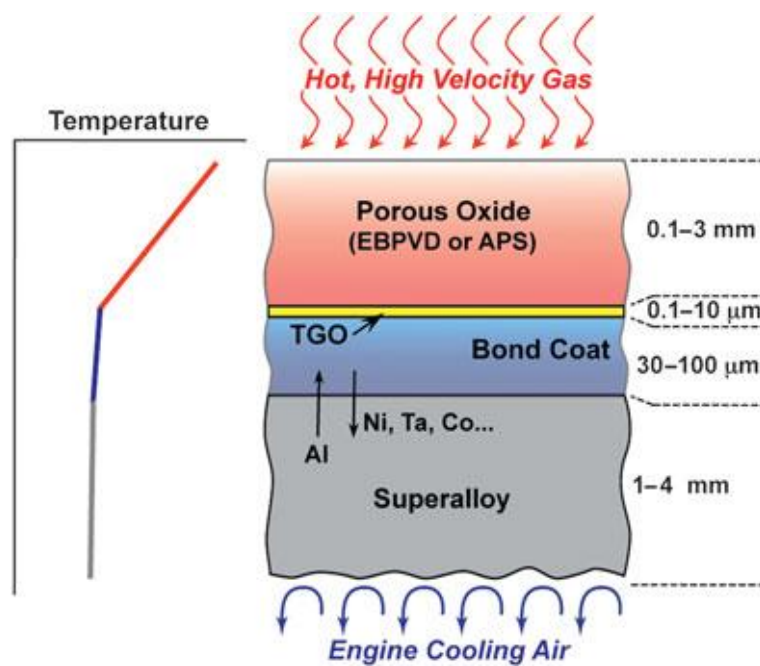
در سیستم‌های لایه‌ای، ضریب انبساط حرارتی یک خاصیت مهم است چراکه تنش حرارتی نتیجه عدم تطابق ضریب انبساط حرارتی بین لایه‌هاست بنابراین، عدم تطابق ضریب انبساط حرارتی می‌تواند یکی از عوامل کلیدی مسئول در تخریب پوشش سد حرارتی باشد.

مزیت منحصر به فرد مواد FGM تغییر خواص به صورت پیوسته است. در تغییرات CTE نیز این تغییر پیوسته و تدریجی مشاهده شده است، بنابراین FG-TBC مقادیر حداکثر تنش را کاهش داده توزیع تنش به طور قابل توجهی هموار و ملایم‌تر می‌شود. از نتایج مشخص است که FG-TBC در مقایسه با TBC‌های دولایه مقاومت به شوک حرارتی بالاتری دارد و این با کمک ساختاری با عملکرد شیب‌دار امکان‌پذیر است.

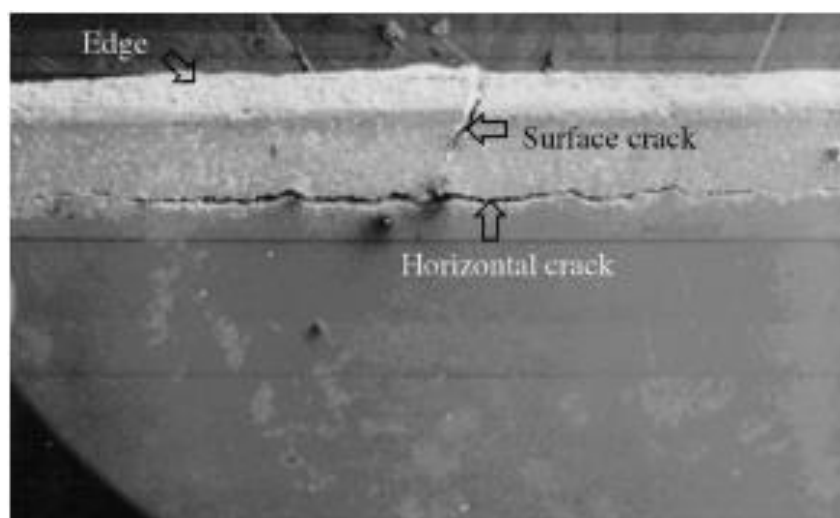
۵- مراجع

- [1] David R. Clarke, Matthias Oechsner, Nitin P. Padture, *Materials Research Society Bulletin*, vol 37, 2012.
- [2] Robert Vaßen, Maria Ophelia Jarligo, Tanja Steinke, Daniel Emil Mack, Detlev Stöver, *Surface & Coatings Technology* 205 (2010) 938–942
- [3] YongQing Wang, G. Sayre *Surface & Coatings Technology* 203 (2009) 2186–2192
- [4] W. Beele, G. Marijnissen, A. van Lieshout, *Surf. Coat. Technol.* Vol 61, 1999, 120–121.
- [5] I. Gurrappa, A. Sambasiva Rao, *Surface & Coatings Technology* 201 (2006) 3016–3029
- [6] Huang Chen, Xiaming Zhou, Chuanxian Ding, *Journal of the European Ceramic Society* 23 (2003) 1449–1455
- [7] Hossein Jamali, Reza Mozafarinia, Reza Shoja Razavi, Raheleh Ahmadi-Pidani, *Ceramics International* 38 (2012), 6705–6712
- [8] G. Di Girolamo, F. Marra, C. Blasi, E. Serra, T. Valente, *Ceramics International* 37 (2011), 2711–2717
- [9] Mohammad Reza Loghman-Estarki, Reza Shoja Razavib, Hossein Edris., *Ceramics International* 40(2014), 1405–1414
- [10] Chungeng Zhou, Na Wang, Huibin Xu, *Materials Science and Engineering A* 452–453 (2007), 569–574
- [11] M. Saremi, Z. Valefi, *Ceramics International* 40(2014), 13453–13459
- [12] Huibin Xu and Hongbo Guo, *Thermal barrier coatings*, Woodhead Publishing Limited, 2011
- [13] Shyang-ho Chi, Yen-Ling Chung, *Engineering Fracture Mechanics* 70 (2003), 1227–1243
- [14] K.A. Khor), Z.L. Dong, Y.W. Gu, *Materials Letters* 38, 1999. 437–444
- [15] Klod Kokini, Jeffery DeJonge, Sudarshan Rangaraj, Brad Beardsley, *Surface and Coatings Technology* 154 (2002), 223–231
- [16] J.H. Kim, M.C. Kim, C.G. Park, *Surface and Coatings Technology* 168 (2003), 275–280
- [17] K.A. Khor, Z.L. Dong, Y.W. Gu, *Thin Solid Films* 368 (2000), 86±92
- [18] L. FuU, K.A. Khor, H.W. Ng, T.N. Teo, *Surface and Coatings Technology* 130 (2000), 233-239
- [19] A. Kawasaki, R. Watanabe, *Engineering Fracture Mechanics* 69 (2002), 1713–1728
- [20] Sujanto Widjaja, Andi M. Limarga, Tick Hon Yip, *Materials Letters* 57 (2002) 628–634
- [21] M.Saremi, A.Afrasiabi, A.Kobayashi, *Surf.Coat.Technol.* 202(2008)3233–3238.
- [22] C. Y. Jian, Toshiyuki Hashida, Hideaki Takahashi, *Composites Engineering*, Vol. 5, No. 7, pp. 879-889, 1995
- [23] L. Wang, Y. Wang, X.G. Sun, J.Q. He, Z.Y. Pan, C.H. Wang, *Ceramics International* 38 (2012) 3595–3606
- [24] Xiaolong Chen, Lijian Gu, Binglin Zou, Ying Wang, Xueqiang Cao, *Surface & Coatings Technology* 206 (2012) 2265–2274
- [25] Sujanto Widjaja, Andi M. Limarga, Tick Hon Yip, *Materials Letters* 57 (2002) 628–634

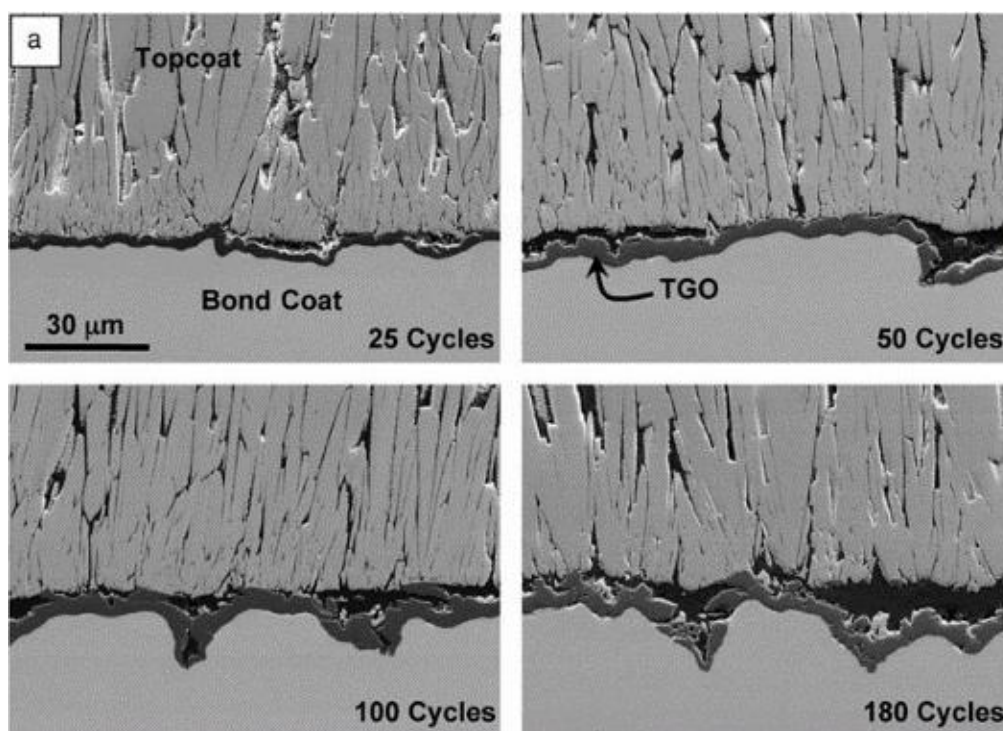
۶- شکل ها



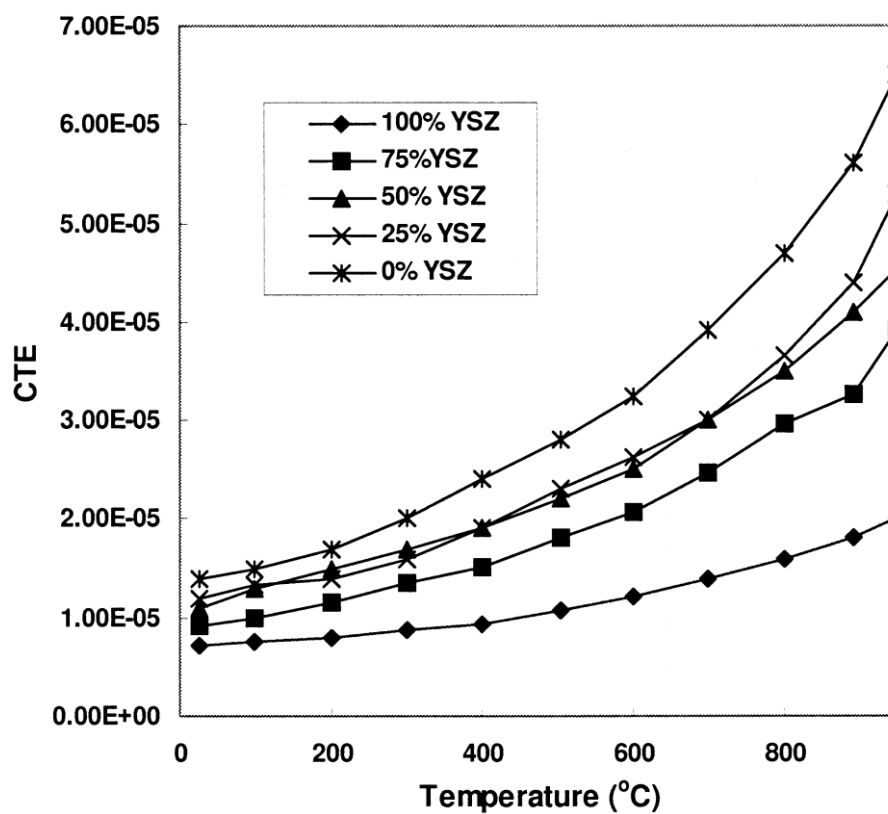
شکل ۱ - تصویر شماتیک از چندلایه سیستم پوشش سد حرارتی چندمنظوره (به مقیاس نیست) [۱].



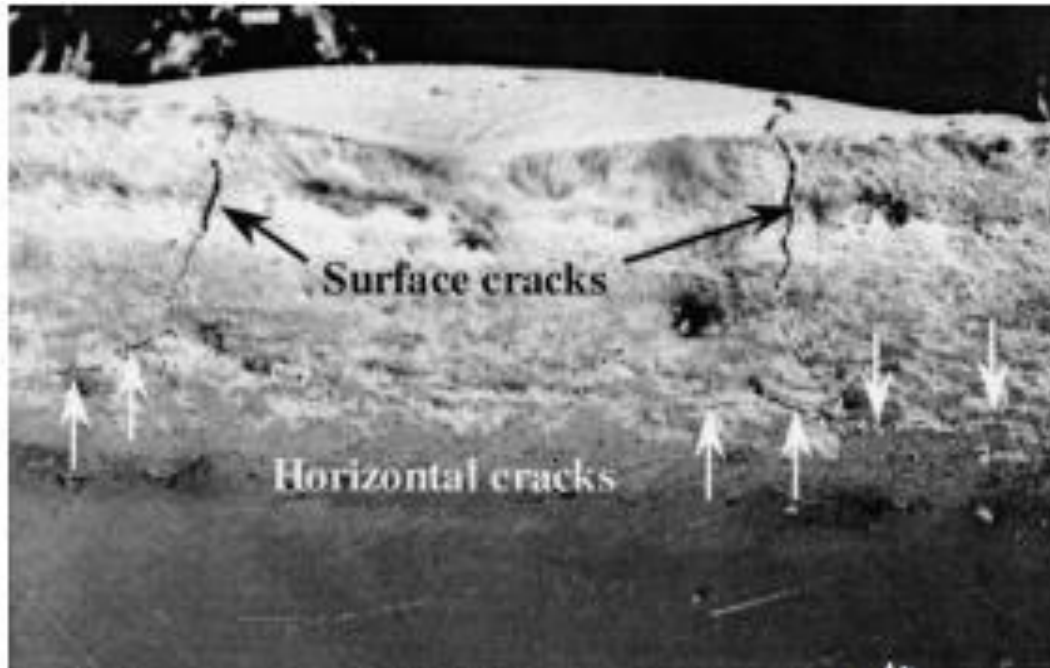
شکل ۲- سیستم پوشش سد حرارتی یک لایه بعد از شوک حرارتی در دمای ۱۰۰۰°C [۱۶].



شکل ۳- تأثیر افزایش تعداد چرخه حرارتی بر افزایش ضخامت لایه TGO در تصاویر SEM از سطح مقطع پوشش سد حرارتی [۱].



شکل ۴- ضریب انبساط حرارتی (CTE) برای پوشش FGM پنج لایه با ترکیب کامپوزیتی NiCoCrAlY و YSZ



شکل ۵- سیستم پوشش سد حرارتی سه لایه بعد از شوک حرارتی در دمای 1000°C [۱۶].

100 wt%Al ₂ O ₃ thickness 50μm
100 wt%YSZ thickness 200μm
NiCrAlY thickness 100-150μm
Substrate

الف

100 wt%Al ₂ O ₃ thickness 50μm
25 wt%YSZ-75 wt%Al ₂ O ₃ thickness 20μm
50 wt%YSZ-50 wt%Al ₂ O ₃ thickness 20μm
75 wt%YSZ-25 wt%Al ₂ O ₃ thickness 20μm
100 wt%YSZ thickness 200μm
NiCrAlY thickness 100-150μm
Substrate

ب

شکل ۶- طرح واره‌ای از پوشش‌های رسوب داده شده (الف) پوشش لایه‌ای از YSZ و Al₂O₃، (ب) پوشش با عملکرد شیب‌دار از Al₂O₃ و YSZ [۱۱].

جدول ۱- گزارش طول عمر سیکل‌های حرارتی پوشش‌های با عملکرد شیب‌دار در مقایسه با حالت‌های دولایه رایج آن‌ها در منابع مختلف.

(رژیم حرارتی هر یک از سیکل‌های ارائه شده در این جدول متفاوت هستند و برای اطلاعات بیشتر به منابع ذکر شده مراجعه شود.)

منبع	تعداد سیکل FGM سیکل دولایه رایج	نسبت ترکیب	جنس کامپوزیت FGM
[۱۷]	۹۰ ۱۵	۷۵:۲۵، ۵۰:۵۰، ۲۵:۷۵	YSZ/ NiCoCrAlY
[۱۸]	۵۰ ۲۵	۷۵:۲۵، ۵۰:۵۰، ۲۵:۷۵ ۵۰:۵۰	YSZ/ NiCoCrAlY
[۱۹]	۲۰۰ ۲۰	۸۰:۲۰، ۶۰:۴۰، ۴۰:۶۰، ۲۰:۸۰	PSZ/NiCrAlY
[۲۲]	۱۰ ۲	۷۵:۲۵، ۵۰:۵۰، ۲۵:۷۵	PSZ/NiCrAlY
[۲۴]	۱۱۷۴۹ ۶۳۶۲	۷۵:۲۵، ۵۰:۵۰، ۲۵:۷۵	LaMgAl ₁₁ O ₁₉ /YSZ
[۲۳]	۱۵۸ ۵۳	۱۰۰:۱۰۰:۱۰۰	La ₂ Zr ₂ O ₇ /YSZ/NiCoCr AlY

جدول ۲- ضخامت لایه‌های پوشش (μm)

نمونه	NiCoCrAlY	50%NiCoCr + 50% Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	50%Al ₂ O ₃ + 50% ZrO ₂	ZrO ₂
-------	-----------	---	--------------------------------	---	------------------

شانزدهمین سمینار ملی مهندسی سطح

s1	۲۰۰	-	۲۰۰	۱۰۰	۲۰۰
s2	۲۰۰	۲۰۰	-	۱۰۰	۲۰۰
s3	۲۰۰	-	۵۰	۵۰	۴۰۰

۳. مرجع مرجع مرجع مرجع مرجع مرجع مرجع مرجع مرجع مرجع مرجع مرجع مرجع مرجع مرجع مرجع.

4. Reference Reference Reference Reference Reference Reference Reference Reference.

۵. مرجع مرجع مرجع مرجع مرجع مرجع مرجع مرجع مرجع مرجع مرجع مرجع مرجع مرجع مرجع.

جدول ۱: تغییرات بر حسب در درجه حرارت ۲۵°C.

		۱۲۳	جدول
table	123		

جدول ۲: تغییرات بر حسب در درجه حرارت ۵۰°C [۴].

شکل شماره ۱

(تمامی تصاویر میکروسکوپی باید دارای خط اندازه باشند.)

← ۲۰ μm →

شکل ۱: تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از نمونه آزمایشی با شرایط



انجمن علوم و تکنولوژی سطح ایران

شکل ۲: آرم انجمن علوم و تکنولوژی سطح ایران.