

بهبود مقاومت به شوک حرارتی پوشش چند لایه سد حرارتی با ایجاد ساختار نانو در لایه سرامیکی فوقانی پوشش

حمید رضا مقدم^{*}،^۱ علی داودی^۲ و محمود اکبری باصری^۳

۱- گروه مهندسی مواد، علوم و تحقیقات خراسان رضوی، دانشگاه آزاد اسلامی، نیشابور، ایران

۲- گروه مهندسی مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی، مشهد

۳- پژوهشکده سامانه‌های حمل و نقل فضایی، پژوهشگاه فضایی ایران، تهران

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۹۵/۰۶/۲۵، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۹۵/۰۸/۰۱، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۳۹۵/۰۸/۲۹

چکیده

این تحقیق جهت مقایسه رفتار شوک حرارتی دو نوع پوشش پنج لایه سد حرارتی انجام شد. زیرلایه این پوشش‌ها مشابه نمونه صنعتی، از جنس فولاد 17-4PH انتخاب گردید. نوع اول، یک پوشش پنج لایه معمولی با لایه زیرین CoNiCrAlY و لایه سرامیکی فوقانی YSZ است که سه لایه میانی آنها، شامل مخلوطی از پودر YSZ+CoNiCrAlY با نسبت‌های مشخص می‌باشد. در پوشش نوع دوم، لایه فوقانی YSZ به صورت نانو ساختار و بقیه لایه‌ها کاملاً مشابه نوع اول است. جهت مقایسه این پوشش‌ها با پوشش‌های متداول و کاربردی، نمونه‌هایی از پوشش سد حرارتی دو لایه نیز مورد آزمون قرار گرفتند. تمام این نمونه‌ها به روش پاشش پلاسما در اتمسفر هوا تهیه گردیدند. جهت انجام آزمون شوک حرارتی، نمونه‌ها در دمای ۹۵۰ °C به مدت پنج دقیقه قرار گرفته و سپس در آب ۲۵-۲۰ °C کوئچ شدند. این عمل تا انهدام تمام نمونه‌ها ادامه یافت. معیار انهدام هر نمونه، جدایش حدود ۲۰ درصد سطح پوشش در نظر گرفته شد. جهت ارزیابی ریزساختاری نمونه‌ها، از SEM و FESEM استفاده گردید. در نهایت مشاهده گردید که طول عمر شوک حرارتی پوشش FG-TBC پنج لایه، تقریباً ۱/۵ برابر طول عمر شوک حرارتی پوشش TBC دو لایه بوده و همچنین ایجاد ساختار نانو در لایه سرامیکی فوقانی پوشش FG-TBC پنج لایه، موجب افزایش طول عمر شوک حرارتی این پوشش در حدود ۱۴٪ شده است.

واژه‌های کلیدی: پوشش سد حرارتی (TBC)، لایه‌های درجه‌بندی شده مواد (FGM)، پاشش پلاسما، شوک حرارتی.

۱- مقدمه

سوپر آلیاژها، همیشه مورد توجه بوده است. در برخی از موتورهای امروزی، دمای گازهای محفظه احتراق تا حدود ۲۵۰ °C از دمای ذوب سوپر آلیاژهای پایه نیکل بالاتر است [۱]. برای کاهش دمای فولادهای زیرلایه و جلوگیری از

افزایش راندمان و بازده توربین‌های گازی دمای بالا، با توجه به محدودیت‌های دمایی و پایداری فیزیکی و مکانیکی

* **عده‌دار مکاتبات:** حمید رضا مقدم

نشانی: نیشابور، دانشگاه آزاد اسلامی، علوم و تحقیقات خراسان رضوی، گروه مهندسی مواد

تلفن: ۰۵۱-۳۸۷۸۳۵۲۱، دورنگار: ۰۵۱-۳۸۷۸۳۵۲۱، پست الکترونیکی: hr63mo@gmail.com

یکی از علل ورقه ورقه شدن پوشش، عدم تطابق ضریب انبساط حرارتی لایه‌های پوشش می‌باشد [۵،۱۶]. یکی از راه‌های کاهش کرنش عدم تطابق حرارتی بین لایه‌های پوشش، تشکیل لایه‌های درجه‌بندی شده مواد (FGM) است [۱۲،۱۳]. پوشش‌های سد حرارتی مرکب (FG-TBC) که در آنها به جای دو لایه پوشش از چندین لایه پوشش استفاده شده است، برای کاهش این مشکلات پیشنهاد شده‌اند [۴]. در پوشش‌های FG-TBC، تغییر تدریجی در ترکیب لایه‌ها مشاهده می‌گردد، به نحوی که درجه‌بندی در لایه‌های پوشش بوجود می‌آورند. این تغییر تدریجی ترکیب لایه‌ها، باعث کاهش کرنش عدم تطابق حرارتی بین لایه‌های پوشش می‌گردد. این نوع پوشش‌ها خواص برتری نسبت به پوشش‌های دو لایه دارند [۱۴]. از جمله این خواص می‌توان به استحکام و سختی بالاتر، چسبندگی بیشتر پوشش به زیرلایه و افزایش مقاومت به شوک حرارتی اشاره نمود [۴،۱۴]. یکی دیگر از روش‌هایی که باعث ارتقاء پوشش‌های سد حرارتی شده و افزایش کیفیت و طول عمر آنها را در شرایط کاری مختلف بوجود آورده است، استفاده از لایه‌های نانو ساختار در ترکیب پوشش است [۵،۷]. نتایج بدست آمده از تحقیقات محققان مختلف، نشان داده است که در پوشش‌های سد حرارتی نانو ساختار، برخی از خواص پوشش از قبیل استحکام، سختی، مقاومت به اکسیداسیون، مقاومت به سایش و غیره مشاهده شده است [۵،۷،۱۵]. پوشش‌های نانو ساختار از پاشش نانو پودرها بر سطح زیرلایه بوجود می‌آیند. در نانوذرات باید حداقل یکی از ابعاد پودر، کمتر از ۱۰۰ نانومتر باشد [۱۶]. روابط تجربی موجود در زمینه خواص فیزیکی و مکانیکی حاکی از پتانسیل بالای بهبود این خواص با کاهش اندازه ذرات است [۱۶]. در پوشش‌های سد حرارتی متداول، لایه سرامیکی پوشش با استفاده از مواد پودری شکلی ایجاد می‌شوند که توزیع اندازه ذرات آن در گستره ۵ تا ۱۰۰ میکرون است، یا به عبارتی ذرات میکروسکوپی هستند.

انهدام ساختاری آنها، از پوشش‌های سد حرارتی در گرم‌ترین قسمت‌های محفظه استفاده می‌گردد [۶-۲]. پوشش‌های سد حرارتی از موادی با ضریب انتقال حرارت پایین تهیه می‌شوند تا حرارت به مقدار کمتری به سطح قطعه انتقال یابد [۱]. در نتیجه دمای کاری قطعات و طول عمر آنها افزایش می‌یابد [۷،۸]. این پوشش‌ها در موتورهای هوایی، توربین‌های گازی، صنعتی و ... مورد استفاده قرار می‌گیرند [۹-۱۱]. در پوشش‌های سد حرارتی، پوشش زیرین، مقاومت اکسایشی لازم را برای زیر لایه فلزی فراهم می‌کند [۱۲،۱۳].

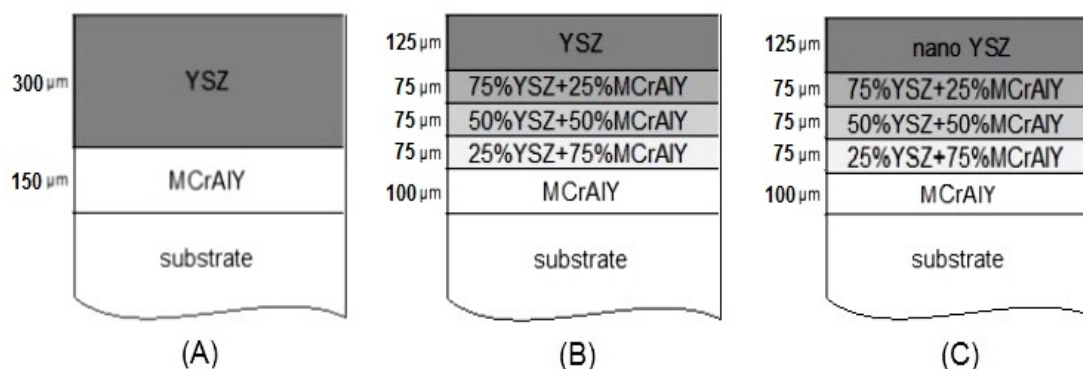
در سیستم‌های پوششی نوین، پوشش زیرین عموماً یکی از پوشش‌های گروه $M=Ni$ and/or Co $MCrAlY$ است [۵،۹]. پوشش بوجود آمده با این ترکیب، در دماهای بالا با تشکیل یک لایه اکسید رشد یافته با حرارت (TGO) در فصل مشترک فلز و سرامیک [۷،۹]، از سطح فلز زیرلایه در برابر اکسیداسیون محافظت می‌کند. پوشش فوقانی، شرایط عایق حرارتی را فراهم می‌کند [۱۴]. این لایه سرامیکی، هدایت حرارتی پایینی دارد که معمولاً از جنس زیرکونیا (ZrO_2) می‌باشد [۴،۱۱]. برای جلوگیری از استحاله فازی زیرکونیا و حذف تغییرات حجمی، از زیرکونیای پایدار شده استفاده می‌گردد. معمولاً پوشش‌های زیرکونیای پایدار شده با ایتریا (YSZ) (Y_2O_3 ۶٪-۸)، الباقی ZrO_2)، بیشترین استفاده را به عنوان پوشش سد حرارتی دارند [۷،۱۴،۱۵]. تشکیل لایه آلومینا به عنوان لایه اکسید رشد یافته با حرارت (TGO) منجر به انرژی کرنش بالا در این لایه می‌شود، که ناشی از عدم تطابق حرارتی بین TGO و بستر فلزی است. تنش بوجود آمده از رشد اضافی TGO، بدلیل افزایش حجم آلومینای بوجود آمده از اکسیداسیون آلومینیم موجود در پوشش زیرین است. این انرژی کرنش می‌تواند منجر به نوسانات TGO، تشکیل ترک و انتشار آن و در نهایت متلاشی نمودن پوشش سد حرارتی گردد. این پوشش‌ها، با ورقه ورقه شدن پوشش از بین می‌روند.

علاوه بر پوشش سد حرارتی پنج لایه (FG-TBC) نانوساختار، پوشش سد حرارتی پنج لایه متداول (FG-TBC) و پوشش سد حرارتی دو لایه متداول (TBC)، مورد آزمون قرار گرفتند. با انجام آزمون شوک حرارتی بر روی این سه نوع پوشش سد حرارتی، می‌توان استحکام شکست این پوشش‌ها را در آزمون شوک مقایسه نمود.

۲- فعالیت‌های تجربی

پوشش نوع اول (A)، یک پوشش سد حرارتی دو لایه است. پوشش نوع دوم (B)، یک پوشش سد حرارتی پنج لایه معمولی FG-TBC و پوشش نوع سوم (C)، یک پوشش سد حرارتی پنج لایه FG-TBC با لایه سرامیکی فوقانی نانوساختار می‌باشد. شماتیک این سه نوع پوشش، در شکل ۱ آورده شده است. در این شکل، درصد ترکیب هر لایه و ضخامت آنها برای هر سه نوع پوشش مشخص شده است. پوشش نوع A، متداول‌ترین پوشش سد حرارتی مورد استفاده در صنایع مختلف می‌باشد. در پوشش‌های نوع B و C، ترکیب لایه‌های میانی، مخلوطی از لایه‌های فوقانی و زیرین است که درصد ترکیبات هر لایه در شکل مذکور نشان داده شده است. در این تحقیق، مجموع ضخامت لایه‌های پوشش در هر سه نوع پوشش با یکدیگر برابر بوده و در حدود ۴۵۰ میکرون می‌باشد. جنس فلز زیرلایه از فولاد 17-4PH انتخاب گردید. این فولاد کاربرد وسیعی در شاخه‌های مختلف مهندسی دارد. زیرلایه‌های مورد استفاده در این آزمون بصورت قرص‌های فلزی با قطر ۲۰ mm و ضخامت حدود ۱۴ mm تهیه شدند. در این نمونه‌ها، از پودر سرامیکی متداول 8YSZ با نام تجاری Metco 204NS و پودر سرامیکی YSZ نانوساختار با نام Nanox S4007 جهت پوشش‌دهی لایه‌های سرامیکی فوقانی استفاده شد.

تاکنون تحقیقات گسترده‌ای به منظور مقایسه رفتار شوک حرارتی پوشش‌های TBC و FG-TBC و همچنین پوشش‌های سد حرارتی متداول و نانوساختار انجام شده است. به عنوان مثال در یکی از تحقیقات انجام شده [۸]، به منظور مقایسه خواص مکانیکی و ریزساختاری دو نوع پوشش TBC دو لایه مرسوم و نانوساختار، نمونه‌هایی از این پوشش‌ها را بر زیرلایه‌هایی از جنس اینکونل و به روش پاشش پلازما در اتمسفر تهیه نمودند. ارزیابی خواص پوشش‌ها با انجام تست استحکام چسبندگی پوشش و همچنین بررسی‌های فازی و ریزساختاری مقاطع پوشش صورت گرفت. نتایج این بررسی‌ها، بهبود خواص پوشش TBC نانوساختار را نسبت به پوشش TBC مرسوم نشان می‌دهد. در مطالعه دیگری [۱۵]، مقایسه دو نوع پوشش TBC دو لایه معمولی و نانوساختار را از لحاظ رفتار سیکل حرارتی این دو نوع پوشش انجام دادند. نتایج این تحقیق، افزایش طول عمر پوشش نانوساختار نسبت به پوشش معمولی بود. در مطالعه‌ای دیگر [۷]، به منظور مقایسه رفتار شوک حرارتی پوشش TBC دو لایه معمولی و نانوساختار، آزمون شوک حرارتی را برای این نمونه‌ها به صورت سیکل‌هایی در دمای °C ۹۵۰ به مدت ۵ دقیقه و سپس کوئچ سریع در آب انجام دادند. نتایج این آزمون نشان می‌دهد که طول عمر پوشش نانوساختار، تقریباً ۱/۵ برابر پوشش معمولی است. اکثر محققان جهت بررسی کیفیت و طول عمر پوشش‌های سد حرارتی نانوساختار، در پوشش‌های سد حرارتی دو لایه (TBC)، از لایه سرامیکی نانوساختار استفاده نموده‌اند [۱۵-۵]. در این تحقیق به منظور بررسی کیفیت و طول عمر پوشش‌های سد حرارتی نانوساختار، از پوشش نانوساختار در لایه سرامیکی فوقانی پوشش سد حرارتی پنج لایه (FG-TBC) استفاده شد. جهت بررسی و ارزیابی خواص لایه نانوساختار در این پوشش،



شکل ۱: شماتیک پوشش‌های طراحی شده.

جدول ۱: پارامترهای سیستم پاشش پلاسما جهت پوشش دهی هر کدام از لایه‌ها.

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

شدن نمونه‌ها از داخل آب، تمام نمونه‌ها با استفاده از خشک کن برقی کاملاً خشک شدند و رطوبت سطحی آنها برطرف گردید [۷]. سپس نمونه‌ها دوباره در داخل کوره قرار گرفته و این مراحل تکرار گردید. تکرار سیکل‌های شوک حرارتی تا متلاشی شدن و تخریب تمام نمونه‌های پوشش ادامه یافت. به محض تخریب هر یک از این نمونه‌ها، تعداد سیکل‌های شوک حرارتی انجام شده برای آن به عنوان تعداد سیکل شکست این نمونه گزارش گردید. در این تحقیق، ملاک و معیار شکست نمونه‌های پوشش، پوسته شدن و تخریب حدود ۲۰ درصد از سطح پوشش تعیین شد. پس از تخریب هر نمونه، انجام آزمون برای آن نمونه متوقف شده و تعداد سیکل‌های شوک حرارتی انجام شده برای آن به عنوان تعداد سیکل شکست نمونه، گزارش

برای پوشش دهی لایه فلزی زیرین در تمام نمونه‌ها از پودر فلزی CoNiCrAlY با نام تجاری Amperit415.006 و ترکیب شیمیایی $\text{Co}_{32}\text{Ni}_{21}\text{Cr}_{8}\text{Al}_{10.5}\text{Y}$ استفاده گردید. در این تحقیق، پوشش دهی تمام نمونه‌ها به روش پاشش پلاسما در اتمسفر هوا (APS) انجام گردید. در جدول ۱، پارامترهای سیستم پاشش پلاسما جهت پوشش دهی هر کدام از لایه‌های این نمونه‌ها ذکر شده است. کنترل ضخامت لایه‌ها در حین اعمال پوشش، با استفاده از ضخامت‌سنج و پس از اعمال هر لایه انجام گردید.

آزمون شوک حرارتی برای تعداد ۳ نمونه از هر نوع پوشش انجام شد. در این آزمون، نمونه‌ها در داخل یک کوره هم‌دما با دمای 950°C به مدت ۵ دقیقه قرار گرفته و سپس سریعاً در آب با دمای $25-20^\circ\text{C}$ کوئنچ شدند. پس از خارج

می‌گردد. جهت اثبات وجود نانوذرات در سطح این پوشش، بزرگنمایی میکروسکوپ FESEM تا حدی افزایش یافت که اندازه نانوذرات سطح پوشش، قابل تشخیص باشند. در شکل ۳، تصویر FESEM سطح پوشش نوع C در بزرگنمایی 75000X نشان داده شده است. در این تصویر ابعاد نانو ذرات تشکیل دهنده این پوشش (نانوذرات YSZ)، مشخص شده‌اند.

در آزمون شوک حرارتی، تعداد سیکل شکست برای نمونه‌های پوشش نوع A به ترتیب ۲۲۵، ۲۳۵ و ۲۳۰ سیکل بود. در نمونه‌های نوع B بدلیل ایجاد ساختار FGM در پوشش، تعداد سیکل شکست نمونه‌ها افزایش یافت. تعداد سیکل شکست برای این نمونه‌ها به ترتیب ۳۵۰، ۳۶۰ و ۳۷۰ سیکل بود. در نمونه‌های نوع C نیز وجود لایه YSZ نانوساختار در سطح پوشش، موجب افزایش تعداد سیکل شکست نمونه‌ها به ۴۲۰، ۳۹۵ و ۴۱۵ سیکل گردید. در شکل ۴، پوسته شدن و تخریب سطح نمونه‌های این سه نوع پوشش مطابق معیار شکست مورد نظر، پس از طی سیکل‌های شوک حرارتی گزارش شده، نشان داده شده است.

در جدول ۲ تعداد سیکل شکست نمونه‌های هر سه نوع پوشش در آزمون شوک حرارتی گزارش شده است. در شکل‌های ۵ و ۶ تعداد سیکل شکست تمام نمونه‌های پوشش در این آزمون، به صورت نمودارهای ستونی و خطی نشان داده شده است.

میانگین تعداد سیکل شکست در نمونه‌های نوع A، ۲۳۰ سیکل، در نمونه‌های نوع B، ۳۶۰ سیکل و در نمونه‌های نوع C، ۴۱۰ سیکل است. این نتایج نشان می‌دهند که تغییر ساختار پوشش سد حرارتی از ساختار دو لایه به ساختار FG-TBC پنج لایه، تعداد سیکل کاری پوشش را در شرایط شوک حرارتی افزایش و در نتیجه طول عمر پوشش نیز افزایش یافته است. با توجه به این نتایج می‌توان جهت افزایش طول عمر پوشش‌های سد حرارتی دو لایه TBC، پوشش‌های سد حرارتی مرکب FG-TBC را پیشنهاد نمود. زیرا با افزایش تعداد لایه‌های پوشش، ضمن افزایش چسبندگی لایه‌های

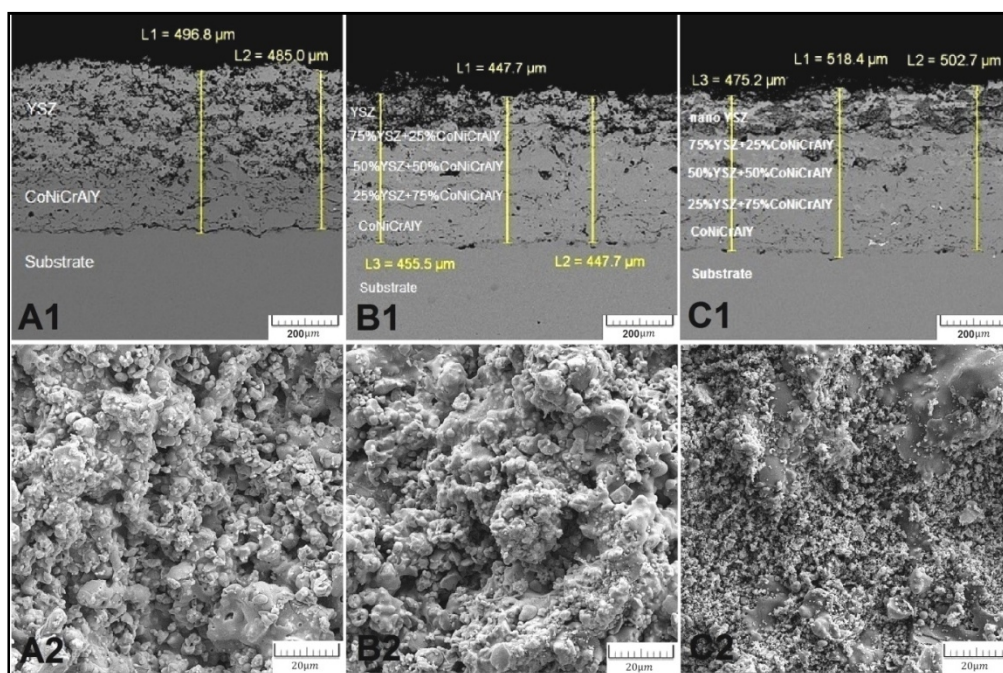
گردید. پس از تخریب تمام نمونه‌های پوشش طبق معیار مذکور و ثبت تعداد سیکل شکست آنها، انجام این آزمون پایان یافت.

۳- نتایج و بحث

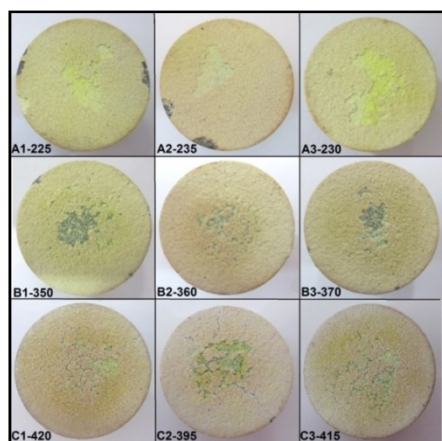
قبل از انجام آزمون شوک حرارتی، به منظور بررسی ریزساختار پوشش‌های اعمالی، نمونه سطح مقطع از هر سه نوع پوشش تهیه شده و بوسیله میکروسکوپ الکترونی SEM مورد بررسی قرار گرفتند. همچنین تصاویر سطح این پوشش‌ها نیز توسط میکروسکوپ الکترونی گسیل میدانی FESEM تهیه شده و مورد بررسی قرار گرفتند. در شکل ۲، تصاویر SEM سطح مقطع هر سه نوع پوشش به همراه تصاویر FESEM سطح این پوشش‌ها نشان داده شده است. در تصاویر سطح مقطع، لایه‌های مختلف این پوشش‌ها با ذکر نسبت پودرهای مورد استفاده در هر لایه (مطابق با ترکیبات ذکر شده در شکل ۱) نشان داده شده است. همچنین مجموع ضخامت لایه‌های پوشش نیز در این تصویر مشخص شده است.

در پوشش‌های B و C، وجود لایه‌های میانی، شیب غلظتی ملایمی بین لایه فوقانی و لایه زیرین ایجاد کرده است. در این پوشش‌ها تشخیص فصل مشترک لایه‌های پوشش واضح نیست، ولی محدوده این لایه‌ها تا حدودی قابل تشخیص می‌باشد. همانطور که در تصاویر FESEM سطح پوشش‌ها مشاهده می‌گردد، سطح پوشش‌های نوع A و B بدلیل یکسان بودن ساختار لایه سرامیکی فوقانی این پوشش‌ها، کاملاً مشابه یکدیگرند اما سطح پوشش C بدلیل وجود ساختار نانو در لایه سرامیکی فوقانی، با دو نوع پوشش دیگر متفاوت است.

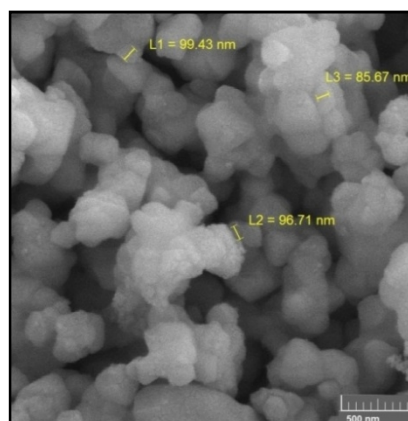
در پوشش‌های سد حرارتی نانوساختار پاشش پلاسمایی شده، سطح پوشش شامل زمینه حاصل از انجماد مجدد ذرات کاملاً مذاب و نانونواحی حاصل از ذرات ذوب نشده پودر را نشان می‌دهد [۷]. در تصویر C2 این شرایط مشاهده



شکل ۲: A1، B1 و C1 تصویر SEM سطح مقطع پوشش‌های نوع A، B و C و A2، B2 و C2 تصویر FESEM سطح پوشش‌های نوع A، B و C.



شکل ۴: تصویر متالاشی شدن سطح پوشش در نمونه‌های پوشش نوع A، B و C پس از طی سیکل‌های شوک حرارتی مشخص.

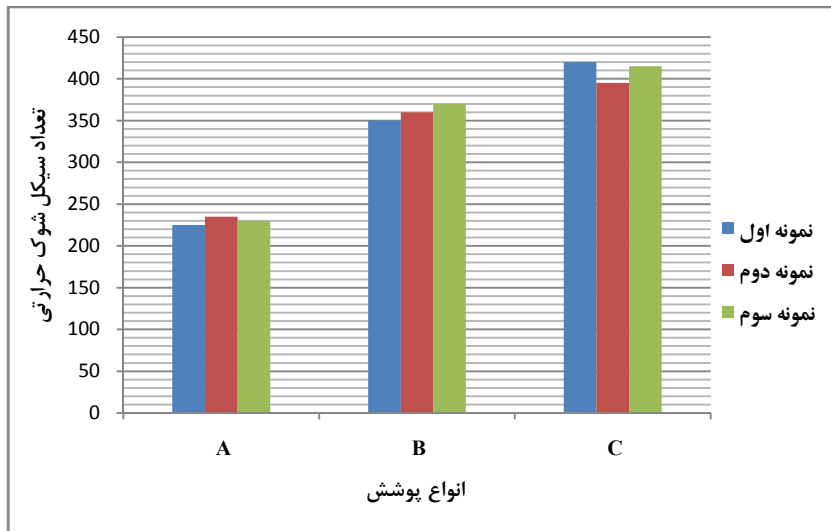


شکل ۳: تصویر FESEM نانوذرات YSZ سطح پوشش نوع C در بزرگنمایی 75000X.

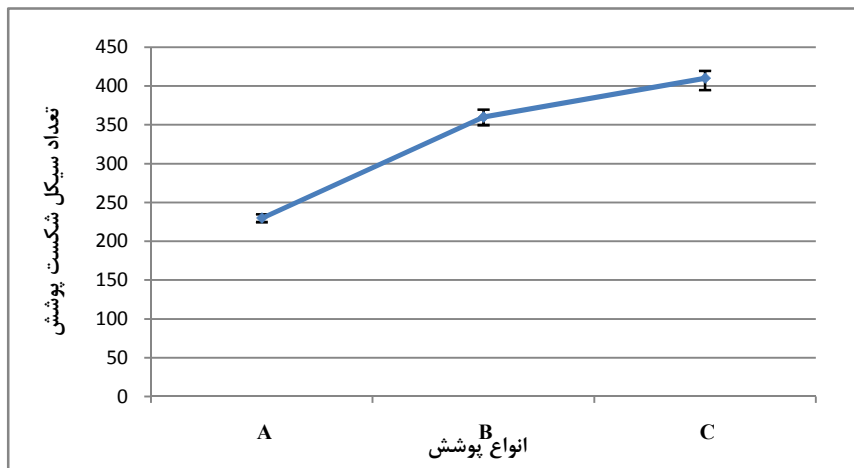
جدول ۲: تعداد سیکل شکست نمونه‌های پوشش در آزمون شوک حرارتی.

پوشش نوع C	پوشش نوع B	پوشش نوع A	نمونه اول	تعداد سیکل شکست
420	350	225	نمونه دوم	
395	360	235	نمونه سوم	

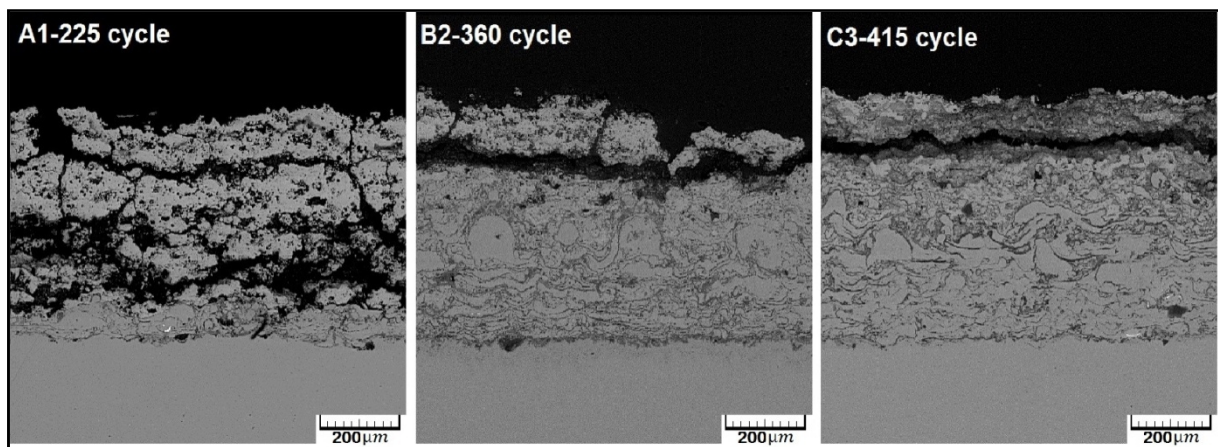
پوشش به زیرلایه، افزایش طول عمر و کیفیت پوشش را خواهیم داشت. همچنین ایجاد ساختار نانو (FG-TBC)، باعث افزایش تعداد سیکل‌های شوک حرارتی و افزایش طول عمر پوشش شده است. این افزایش در لایه سرامیکی فوقانی پوشش سد حرارتی پنج لایه طول عمر نیز بدلیل وجود پوشش نانو ساختار در لایه فوقانی پوشش



شکل ۵: نمودار ستونی تعداد سیکل شکست نمونه‌های پوشش در آزمون شوک حرارتی.



شکل ۶: نمودار خطی تعداد سیکل شکست نمونه‌های پوشش در آزمون شوک حرارتی.



شکل ۷: تصویر SEM سطح مقطع نمونه‌های A1، B2 و C3 پس از تعداد سیکل‌های شوک حرارتی نشان داده شده.

به طور متناوب بوسیله نانونواحی قطع می‌شود. در نتیجه، انتشار ترک در امتداد مرزهای اسپلتی با رسیدن به این مناطق متوقف یا دچار تغییر مسیر می‌شود. بنابراین انتظار می‌رود که پوشش‌های سد حرارتی نانو ساختار در مقایسه با پوشش‌های متداول، مقاومت بالاتری در مقابل سیکل‌های حرارتی ارائه دهند [۷]. نتایج این تحقیق نیز نشان می‌دهد که ایجاد ساختار نانو در لایه سرامیکی فوقانی پوشش سد حرارتی مرکب (پنج لایه)، مقاومت به شوک حرارتی پوشش را افزایش داده است.

در مطالعات و بررسی‌های مشابه این تحقیق، به چنین نتایجی اشاره شده است. به عنوان مثال در یکی از تحقیقات انجام شده [۷]، جهت مقایسه رفتار شوک حرارتی پوشش TBC دو لایه معمولی و نانو ساختار، آزمون شوک حرارتی برای این نمونه‌ها در دمای 950°C با شرایط قرارگیری نمونه‌ها به مدت ۵ دقیقه در دمای مذکور و سپس کونچ سریع در آب، انجام دادند. نتایج این آزمون نشان می‌دهد که طول عمر پوشش نانو ساختار، تقریباً $1/5$ برابر پوشش معمولی شده است. همچنین در تحقیق دیگری [۱۷] نیز، جهت مقایسه مقاومت به شوک حرارتی پوشش‌های سد حرارتی معمولی و نانو ساختار، مطالعاتی روی این نوع پوشش‌ها انجام دادند. آزمون شوک حرارتی برای این نمونه‌ها به صورت قرارگیری آنها در دمای 1020°C و سپس سرمایش سریع آنها در آب انجام گردید. نتایج این مطالعات نشان می‌دهد که مقاومت به شوک حرارتی پوشش‌های سد حرارتی نانو ساختار بالاتر از پوشش‌های متداول است.

۴- نتیجه‌گیری

طول عمر شوک حرارتی پوشش FG-TBC پنج لایه، تقریباً $1/5$ برابر طول عمر شوک حرارتی پوشش TBC دو لایه بود. این افزایش طول عمر نشان می‌دهد که ایجاد ساختار FGM در پوشش سد حرارتی، موجب افزایش کیفیت و طول عمر پوشش شده است. همچنین ایجاد

و کاهش تخلخل‌های سطحی پوشش بوده که مانع نفوذ اکسیژن به لایه‌های زیرین شده و تخریب در لایه‌های زیرین با تاخیر انجام می‌گردد.

پس از پایان آزمون شوک حرارتی و تخریب پوشش تمام نمونه‌ها طبق معیار ذکر شده، یک نمونه از هر نوع پوشش جهت بررسی سطح مقطع انتخاب شده و پس از مانع و برشکاری، بوسیله میکروسکوپ الکترونی مورد بررسی قرار گرفتند. در شکل ۷ تصویر SEM سطح مقطع نمونه‌های A1، B2 و C3 پس از تعداد سیکل‌های شوک حرارتی مشخص شده در شکل، نشان داده شده است. در تصویر A1، ایجاد و رشد ترک در لایه‌های پوشش و در نهایت متلاشی شدن پوشش مشاهده می‌گردد. البته تخریب و متلاشی شدن پوشش، بیشتر در لایه سرامیکی اتفاق افتاده است. در پوشش TBC دو لایه، بدلیل وجود ضخامت بالای پوشش YSZ (تقریباً دو سوم ضخامت کل پوشش)، رشد ترک در تمام لایه سرامیکی رخ داده و این ترک‌ها به سطح زیر لایه فلزی نزدیک شده‌اند. در تصویر B2 نیز رشد ترک‌ها در لایه سرامیکی رخ داده است و بدلیل کمتر شدن ضخامت لایه سرامیکی فوقانی در این پوشش، رشد ترک و متلاشی شدن آن در محدوده کمتری از سطح مقطع پوشش وجود دارد. در تصویر C3 نیز رشد ترک و متلاشی شدن پوشش، فقط در محدوده لایه سرامیکی رخ داده است ولی در این پوشش نسبت به پوشش نوع B، شکست در لایه سطحی پوشش کمتر رخ داده است. با قرارگیری پیوسته پوشش در شرایط سیکل حرارتی، این تنش‌ها می‌تواند منجر به جوانه‌زنی و رشد ترک در پوشش شود. پیوستن این ترک‌ها به یکدیگر و انتشار آنها در پوشش رویی به موازات فصل مشترک، در نهایت موجب ورقه ورقه شدن پوشش خواهد شد. بنابراین تنش‌های ناشی از عدم انطباق ضرایب انبساط حرارتی، عامل اصلی ورقه ورقه شدن پوشش سد حرارتی است [۷].

در پوشش‌های سرامیکی پوشش پلاسمایی شده متداول، ترک تمایل به انتشار در امتداد مرز اسپلت دارد ولی در پوشش‌های نانو ساختار با ساختار دو گانه، ساختار مرز اسپلتی

- [2] Z. Han, B. Xu, H. Wang, S. Zhou, *Surface & Coatings Technology*, **201**, 2007, 5253.
- [3] R. Ahmadi-Pidanin, R. Shoja-Razavi, R. Mozafarinia, H. Jamali, *Ceramics International*, **38**, 2012, 6613.
- [4] H. Tsukamoto, *Computational Materials Science*, **50**, 2010, 429.
- [5] M. Nejati, M.R. Rahimpour, I. Mobasherpour, A.H. Pakseresht, *Surface and Coatings Technology*, **282**, 2016, 129.
- [6] N. Narimani, M. Saremi, *Ceramics International*, **41**, 2015, 13810.
- [7] H. Jamali, R. Mozafarinia, R. Shoja-Razavi, R. Ahmadi-Pidani, *Ceramics International*, **38**, 2012, 6705.
- [8] S. Song, P. Xiao, *Materials Science and Engineering*, **97**, 2003, 46.
- [9] Z. Zhao, Y. Zhao, B. Zou, X. Fan, J. Xu, Y. Hui, X. Zhou, S. Liu, X. Cao, *Journal of Alloys and Compounds*, **592**, 2014, 109.
- [10] R. Ghasemin, R. Shoja-Razavi, R. Mozafarinia, Hossein Jamali, *Ceramics International*, **39**, 2013, 8805.
- [11] Z. Xua, R. Mu, L. He, X. Cao, *Journal of Alloys and Compounds*, **466**, 2008, 471.
- [12] K. Kokini, J. De Jonge, S. Rangaraj, B. Beardsley, *Surface and Coatings Technology*, **154**, 2002, 223.
- [13] A.B. Kasaeian, S. Nasiri Vatan, S. Daneshmand, *Procedia Engineering*, **14**, 2011, 3199.
- [14] X. Chen, L. Gu, B. Zou, Y. Wang, X. Cao, *Surface & Coatings Technology*, **206**, 2012, 2265.
- [15] C. Zhou, N. Wang, H. Xu, *Materials Science and Engineering A*, **452**, 2007, 569.
- [16] R.S. Lima, B.R. Marple, *Materials Science and Engineering A*, **485**, 2008, 182.
- [17] G. Di Girolamo, F. Marra, C. Blasi, E. Serra, T. Valente, *Ceramics International*, **37**, 2011, 2711.

ساختار نانو در لایه سرامیکی فوقانی پوشش FG-TBC پنج لایه، موجب افزایش طول عمر شوک حرارتی این پوشش در حدود ۱۴٪ شده است. این افزایش نشان می‌دهد که ایجاد ساختار نانو در لایه سرامیکی فوقانی پوشش‌های سد حرارتی، موجب افزایش کیفیت و طول عمر پوشش شده است.

سپاسگزاری

با تشکر از آقایان حسین جمالی، امیرحسین پاک سرشت، امیرحسین جوادی و علی عسجدی که در مراحل علمی و اجرایی این تحقیق، صمیمانه همکاری نمودند.

مراجع

- [1] U. Schulz, C. Leyens, K. Fritscher, M. Peters, B. Saruhan-Brings, O. Lavigne, J.M. Dorvaux, M. Poulain, R. Mevrel, M. Caliez, *Aerospace Science and Technology*, **7**, 2003, 73.