

بررسی و مقایسه رفتار شوک حرارتی پوشش سد حرارتی نانوساختار و میکرونی YSZ اعمال شده به روش پاشش پلاسما

امین مجیدی، مسعود علیزاده* و محمدرضا رحیمی پور

پژوهشگاه مواد و انرژی، پژوهشگاه سرامیک

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۹۳/۰۱/۲۷، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۹۳/۰۳/۰۷، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۳۹۳/۰۴/۲۴

چکیده

در این پژوهش پوشش‌های نانوساختار و میکرونی زیرکونیایی بر روی زیرلایه‌های سوپر آلیاژ پایه نیکل پوشش داده شده با $MCrAlY$ به روش پاشش پلاسما اعمال شدند. آزمایش شوک حرارتی روی نمونه‌ها به صورت گرم کردن نمونه‌ها در کوره تا دمای ۱۲۰۰ درجه سانتیگراد و سرد کردن سریع در آب ۲۵ درجه سانتیگراد انجام پذیرفت. برای بررسی ریزساختار و تغییرات فازی از میکروسکوپ الکترونی روبشی و آنالیز پراش اشعه ایکس استفاده شد. نتایج طول عمر نمونه‌ها در سیکل‌های حرارتی نشان داد که تعداد سیکل تا تخریب برای پوشش‌های نانوساختار ۳۸٪ بیشتر از پوشش‌های میکرونی است. همچنین بررسی سطح مقطع نمونه‌های آزمایشی نشان داد که تخریب در نمونه‌های نانوساختار در نواحی اطراف فصل مشترک پوشش سرامیکی و لایه $MCrAlY$ رخ داده است و تخریب در پوشش‌های میکرونی علاوه بر نواحی اطراف فصل مشترک به صورت ترک‌های عمیق عمودی در لایه سرامیکی نیز مشاهده شد. بررسی فازی انجام شده بعد از آزمون شوک حرارتی نشان داد که هر دو پوشش نانوساختار و میکرونی دچار تغییر فاز نشده‌اند. همچنین تصاویر میکروسکوپی نشان داد که توزیع تخلخل‌ها در پوشش میکرونی نسبت به پوشش نانوساختار ناهمگن‌تر است. به منظور بررسی صحت نتایج تجربی از مدل‌سازی به روش اجزاء محدود استفاده شد. به کمک مدل‌سازی مشخص شد که تنش حرارتی ایجاد شده در پوشش نانوساختار 70 MPa کمتر از پوشش میکرونی است.

واژه‌های کلیدی: نانوساختار، سد حرارتی، شوک حرارتی، پاشش پلاسما، پوشش.

۱- مقدمه

پوشش سرامیکی که بر روی یک لایه پوشش فلزی قرار دارد، تشکیل شده است [۶،۷]. رفتار پوشش‌های سد حرارتی در حین سیکل‌های دمایی می‌تواند تخمینی از عمر پوشش‌ها در شرایط کاری واقعی توربین را ارائه کند. از این‌رو آزمون شوک حرارتی به عنوان اصلی‌ترین تست عملکردی، یکی از راه‌های ارزیابی کیفیت پوشش‌های سد حرارتی می‌باشد [۸،۹]. در حین سیکل‌های حرارتی یک

پوشش‌های سد حرارتی به منظور افزایش دمای کاری قطعات داغ و افزایش راندمان توربین‌های گازی استفاده می‌شوند [۱]. پوشش‌های سد حرارتی عموماً با روش پاشش پلاسما یا رسوب فیزیکی فاز بخار ایجاد می‌شوند [۲-۵]. سیستم‌های پوشش سد حرارتی از یک لایه

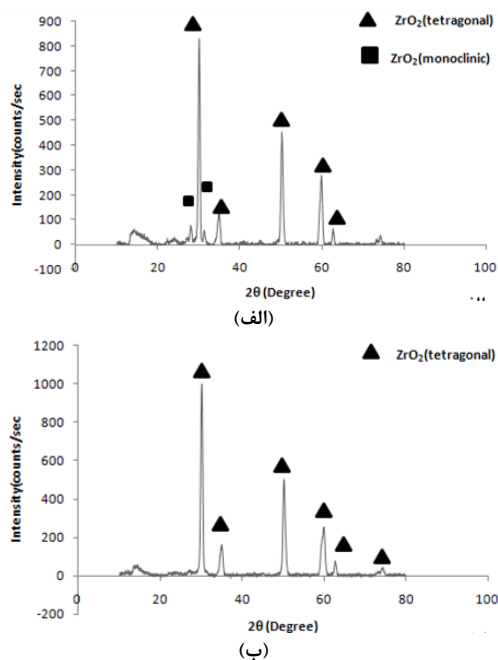
* عهده‌دار مکاتبات: مسعود علیزاده

نشانی: کرج، مشکین دشت، پژوهشگاه مواد و انرژی

تلفن: ۰۲۶۳-۶۲۸۰۰۴۰، دورنگار: ۰۲۶۳-۶۲۸۰۰۴۰، پست الکترونیکی: m-alizadeh@merc.ac.ir

است. پودرهای نانوساختار و میکرونی قبل از پاشش به مدت ۱ ساعت در دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد قرار گرفتند تا رطوبت پودرها از بین برود. همچنین از پودر با کد تجاری Amdry 962 جهت ایجاد لایه واصل با ترکیب $Ni_{22}Cr_{10}Al_{1.0}Y$ استفاده گردید. تمام پودرها بر روی زیرلایه‌های از جنس سوپر آلیاژ پایه نیکل با نام تجاری Hastelloy X و ابعاد $2 \times 2 \times 30$ میلیمتر اعمال شدند. به منظور ایجاد زبری مناسب زیرلایه‌ها با SiC مش ۲۴ و تحت فشار ۴ بار سند بلاست شدند. اعمال پوشش با استفاده از دستگاه پلاسما اسپری و با تفنگ مدل 3MB ساخت کمپانی Metco انجام گرفت.

آنالیز فازی به کمک دستگاه پراش اشعه ایکس Siemens D500 انجام شد. شکل ۱ تصاویر پراش اشعه ایکس را نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود پودرها دارای ترکیب شیمیایی ZrO_2 و ساختار تتراگونال پایدار شده می‌باشند.



شکل ۱: آنالیز XRD پودرهای، (الف) پودر زیرکونیایی میکرونی و (ب) پودر زیرکونیایی نانوساختار.

۲-۲-۲- آزمون شوک حرارتی

انجام آزمایش شوک حرارتی به روش سرد کردن سریع در آب که یک روش متداول برای انجام آزمایش شوک

لایه اکسید محافظ با ترکیب شیمیایی Al_2O_3 بین پوشش فلزی و سرامیکی تشکیل می‌شود [۱۰]. تعداد سیکل‌های دمایی که پوشش سد حرارتی می‌تواند تحمل کند به ویژگی‌های پوشش از جمله ترک، ضخامت، چگالی، زبری فصل مشترک پوشش واصل و پوشش سرامیکی و تنش‌های پسماند پس از پاشش وابسته است. همچنین سیکل‌های دمایی می‌تواند بر روی دوام پوشش تاثیر گذارد. اکسیداسیون پوشش واصل، تنش‌های گرمایی که در اثر تفاوت کرنش‌های دمایی می‌باشد، استحاله فازی پوشش، رفتار خزشی پوشش واصل و پوشش سرامیکی، تغییرات مدول یانگ پوشش سرامیکی، همجواری پوشش سرامیکی و فقر آلومینیوم در پوشش واصل از جمله عواملی هستند که بر طول عمر پوشش‌های سد حرارتی در حین سیکل‌های حرارتی تاثیر دارد [۱۷-۱۱]. در طول دهه گذشته پوشش‌های سد حرارتی نانوساختار به عنوان نسل جدید پوشش‌های سد حرارتی مورد توجه قرار گرفته‌اند [۱۸، ۱۹]. پوشش‌های نانوساختار نسبت به پوشش‌های میکرونی مقاومت به شوک حرارتی بهتری از خود نشان می‌دهند [۲۰-۲۳]. همچنین مدل‌های ساخته شده به روش اجزاء محدود نشان می‌دهند که میزان تنش‌های حرارتی ایجاد شده در حین سیکل‌های حرارتی برای پوشش‌های نانوساختار کمتر از پوشش‌های میکرونی است [۲۴]. دلیل ایجاد تنش‌های حرارتی تفاوت در ضریب انبساط پوشش سرامیکی و پوشش فلزی می‌باشد [۲۵]. پژوهش حاضر به منظور بررسی شوک‌پذیری حرارتی و مقایسه طول عمر پوشش‌های نانوساختار و پوشش‌های میکرونی صورت پذیرفته است.

۲- فعالیت‌های تجربی

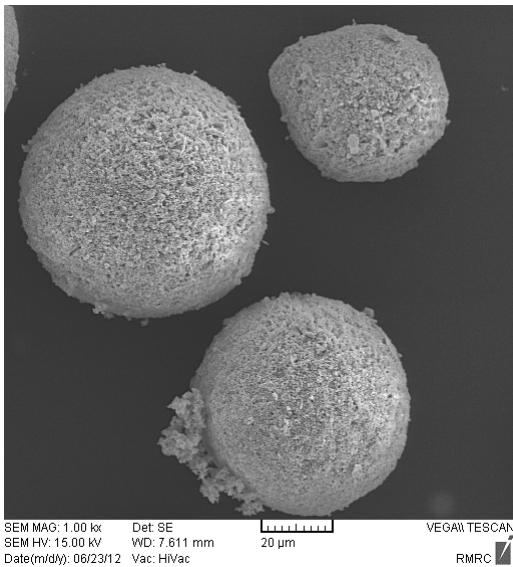
۲-۱- آماده‌سازی نمونه‌ها

در این پژوهش به منظور ایجاد لایه سد حرارتی از دو نوع پودر زیرکونیایی پایدار شده با ایتریای نانوساختار و میکرونی استفاده شد. پودر نانوساختار به صورت ذرات نانوساختار با ذرات آگلومره به اندازه ۱۵۰-۱۵ نانو و پودر میکرونی با اندازه ذرات ۱۰۶-۱۵ میکرون و کد تجاری Metco 204NS-G مورد استفاده قرار گرفت. در شکل ۳ تصاویر میکروسکوپی پودر نانوساختار نشان داده شده

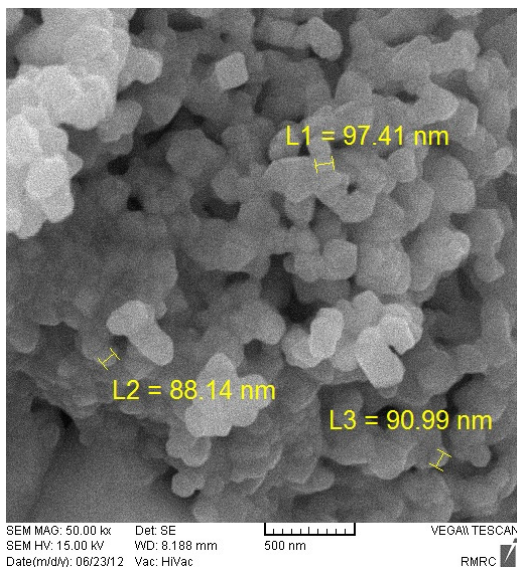
۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی تصاویر میکروسکوپی

تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی پودر زیرکونیایی نانوساختار در شکل ۳ قابل مشاهده است. همانگونه که در تصویر دیده می‌شود پودر به صورت ذرات نانوساختار است که به صورت گرانول در آمده است. ذرات گرانول شده ظاهر کروی دارند.



(الف)



(ب)

شکل ۳: تصویر پودر زیرکونیایی نانوساختار در بزرگنمایی، الف) ۱۰۰۰ و ب) ۵۰۰۰۰.

حرارتی است، صورت پذیرفت. بدین صورت که دمای نمونه‌ها به کمک کوره در مدت زمان ۱۰ دقیقه به ۱۲۰۰ درجه سانتیگراد رسانده شد و سپس در آب ۲۵ درجه سانتیگراد کوئچ شدند. سیکل‌ها تا تخریب پوشش ادامه پیدا کرد. نمونه‌هایی که هم جدایش از لبه‌ها و هم وسط نمونه رخ داده بود به عنوان پوشش‌های تخریب شده از آزمایش کنار گذاشته شدند.

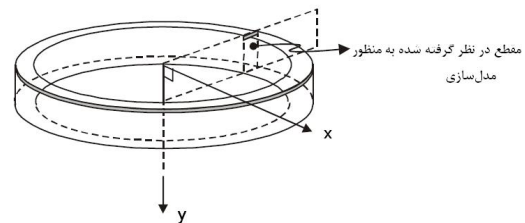
۳-۲- بررسی پوشش

نمونه‌ها با رزین و به روش مانت سرد، مانت شدند. سطح مقطع قبل از بررسی با سنباده و سپس نمد پولیش آماده‌سازی شد. مقطع نمونه‌های نانوساختار و میکرونی توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی Vega II Tescan بررسی شدند.

۴-۲- مدلسازی

در این پژوهش روش استفاده شده برای مدلسازی دقیق تنش‌های حرارتی پوشش‌های نانوساختار و میکرونی، اجزاء محدود می‌باشد.

سیکل گرم و سرد شدن پوشش‌ها از دمای ۱۲۰۰ درجه سانتیگراد به عنوان دمای بدون تنش تا دمای ۲۰ درجه سانتیگراد در نظر گرفته شد. مدلسازی از یک قطاع استوانه از کنار نمونه، مطابق شکل ۲ انجام پذیرفت. به منظور افزایش دقت نتایج مدلسازی، مش بندی به صورت ۸ نقطه ایجاد گردید.



دمای ۱۲۵۰ درجه سانتیگراد به عنوان دمای بدون تنش در نظر گرفته شد و تنش‌های حرارتی ایجاد شده در حین سرد کردن نمونه تا دمای اتاق محاسبه و مدلسازی گردید.

۳-۲- عمر پوشش‌های نانوساختار و میکرونی

جدول ۱ تعداد سیکل تا تخریب نمونه‌های تحت آزمایش را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود عمر پوشش‌های نانوساختار ۳۸٪ بیشتر از پوشش‌های میکرونی بوده و در ۴۸ سیکل اول هیچ جدایشی از کناره و وسط نمونه‌های نانوساختار رخ نداده است در صورتیکه جدایش از کناره نمونه‌های میکرونی از سیکل ۴۰ شروع شد.

جدول ۱: نتایج شوک حرارتی نمونه‌های میکرونی و نانوساختار.

تعداد سیکل	نانوساختار	میکرونی
۲۱	بدون تغییر	بدون تغییر
۴۰	بدون تغییر	شروع جدایش در کناره نمونه
۴۸	شروع جدایش در کناره نمونه	ادامه جدایش در کناره نمونه
۴۹	ادامه جدایش از کناره نمونه	جدایش و ترک در سطح نمونه
۶۸	جدایش و ترک در سطح نمونه	--

تمام نمونه‌ها مطابق شکل ۴ در حین آزمون شوک حرارتی خم شدگی پیدا کردند که جهت انحنا به سمت پوشش است. دلیل این موضوع کاهش حجم پوشش در تفجوشی دما بالاست که به علت حذف تخلخل‌های موجود در لایه زیرکونیایی رخ می‌دهد.



شکل ۴: تصویر نمونه پس از آزمون شوک حرارتی.

همچنین مشاهده شد که نمونه‌های نانوساختار بعد از ۶۸ سیکل و میکرونی بعد از ۴۹ سیکل تخریب شدند که تخریب از لایه سرامیکی و بین لایه سرامیکی و پوشش

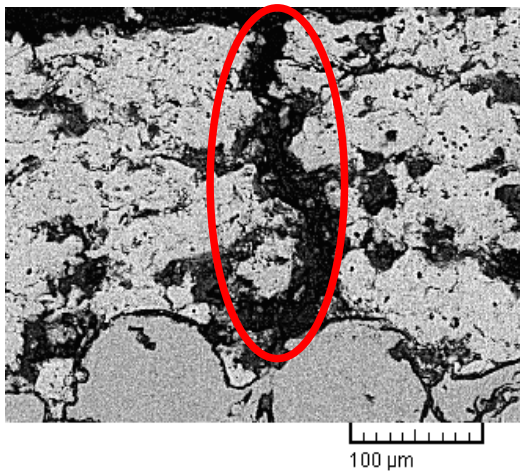
اصل است که با نتایج پژوهش لیانگ و دینگ [۲۶] مطابقت دارد. در صورتیکه در برخی پژوهش‌ها جدایش از فصل مشترک پوشش و اصل و زیرلایه صورت گرفته است [۲۷]. در پژوهش انجام گرفته توسط دینگ و لیانگ بیان گردیده که عمر پوشش‌های نانوساختار در دمای ۱۲۰۰ درجه سانتیگراد حدود ۲ برابر بیشتر از پوشش‌های میکرونی می‌باشد در حالیکه نتایج این پژوهش حاکی از برتر بودن پوشش‌های نانوساختار به اندازه حدود ۱/۴ برابر می‌باشد. نقطه مشترک پژوهش انجام گرفته با نتایج دینگ برتری پوشش‌های نانوساختار در سیکل‌های دمایی ۱۲۰۰ درجه سانتیگراد تا دمای محیط می‌باشد. در خصوص تفاوت نتایج می‌توان دلیل را در نحوه سرد و گرم کردن دانست. در پژوهش حاضر، نمونه‌ها در زمان ۱۰ دقیقه تا دمای ۱۲۰۰ درجه سانتیگراد گرم و در زمان کمتر از ۲ دقیقه در حجم زیادی آب تا دمای ۲۵ درجه سانتیگراد سرد شدند اما در پژوهش دینگ و لیانگ زمان گرم کردن ۳۰ دقیقه و زمان سرد کردن ۱۰ دقیقه انتخاب شده بود که شوک‌های ایجاد شده در پژوهش حاضر، بسیار شدیدتر از شوک حرارتی گزارش شده در پژوهش دینگ می‌باشد. در پژوهش دیگری که توسط جمالی و همکاران [۲۸] انجام گرفته، گزارش گردید نتایج آزمایش شوک حرارتی پوشش‌های نانوساختار حدود ۱/۵ برابر پوشش‌های میکرونی است که با نتایج بدست آمده در این پژوهش تقریباً یکسان می‌باشد.

مدول الاستیک پوشش‌های نانوساختار در دمای ۱۱۰۰ درجه سانتیگراد حدود ۴۵ درصد بیشتر از پوشش‌های میکرونی می‌باشد که این موضوع نیز می‌تواند دلیلی بر بیشتر بودن مقاومت این پوشش‌ها در مقابل رشد ترک و عمر بیشتر این پوشش‌ها باشد [۲۴]. با توجه به نتایج پژوهش مشترک سلطانی و گارسیا بر روی خواص ترمومکانیکی پوشش‌های نانوساختار سد حرارتی [۲۹] می‌توان تحلیل کرد که یکی دیگر از دلایل بهتر بودن شوک‌پذیری پوشش‌های نانوساختار، بالا بودن نرخ خزشی این دسته از پوشش‌ها می‌باشد. در حین انبساط حرارتی زیرلایه، نانوپوشش نسبت به پوشش‌های میکرونی توانسته است با داشتن کرنش بیشتر، تاثیر تنش‌های حرارتی را خنثی کند.

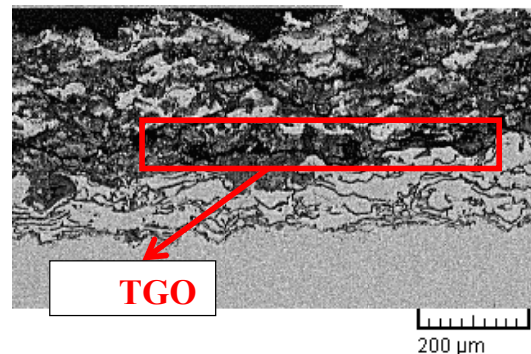
۳-۳- نحوه تخریب

در تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی مشاهده شد که نمونه‌های نانوساختار و میکرونی تفاوت عمده‌ای در نوع تخریب دارند. همانطور که در شکل ۵ دیده می‌شود مکانیزم اصلی تخریب در پوشش‌های نانوساختار، تخریب از اطراف فصل مشترک لایه سرامیکی و واصل می‌باشد در حالیکه در پوشش‌های میکرونی علاوه بر تخریب در نواحی نزدیک به فصل مشترک و لایه اکسید محافظ، ترک‌های عمودی ضخیم و عمیقی در لایه سرامیکی مشاهده شد که دلیل آن را می‌توان در نوع تخلخل‌ها در ساختار نمونه‌ها جستجو کرد.

ملاحظه می‌گردد در نواحی A، B و C احتمال تخریب ناحیه سرامیکی وجود دارد. این غیریکنواختی در اندازه و توزیع تخلخل‌ها باعث توزیع غیریکنواخت تنش در لایه سرامیکی می‌گردد و وقوع ترک‌های عمودی را همانطور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، ممکن می‌سازد. همانطور که در شکل ۷ دیده می‌شود ترک عمودی در ناحیه‌ای تشکیل شده که سازوکار خرابی از لایه اکسید محافظ آغاز نگردیده در حالیکه در شکل ۸ تخریب در نواحی اطراف لایه محافظ رخ داده است.

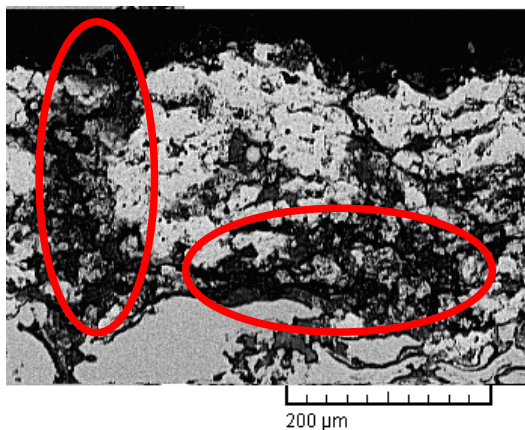


شکل ۷: ترک‌های عمودی و عمیق در پوشش‌های میکرونی.

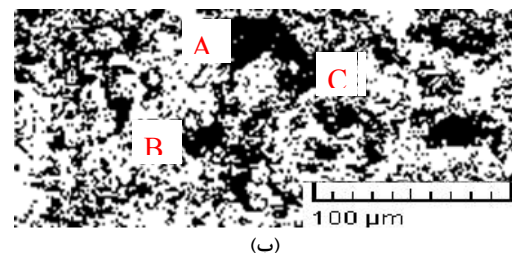
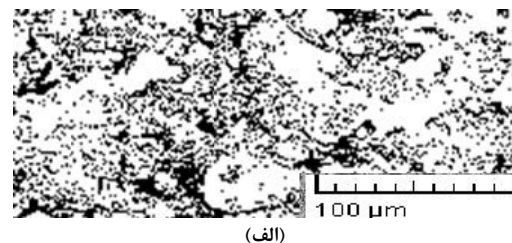


شکل ۵: تصویر SEM نمونه نانوساختار پس از آزمون شوک حرارتی.

در شکل ۶ توزیع تخلخل در یک منطقه پر تخلخل در نمونه‌های نانوساختار و میکرونی نشان داده شده است.



شکل ۸: تصویری از منطقه تخریب شده در پوشش میکرونی.



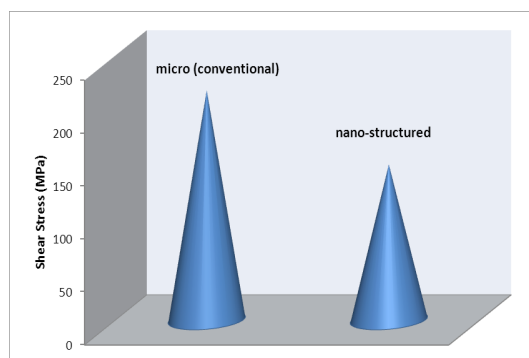
شکل ۶: توزیع تخلخل‌ها در ناحیه پر تخلخل پوشش‌های زیرکونیایی، (الف) نانوساختار و (ب) میکرونی.

در شکل ۷ دیده می‌شود پوشش نانوساختار دارای تخلخل‌های هم اندازه با پراکندگی یکنواخت‌تر می‌باشد. اندازه تخلخل‌ها در پوشش میکرونی بزرگتر و توزیع

می‌گردد. در شکل‌های ۹ و ۱۰ مشاهده می‌شود که زیرکونیا ساختار تتراگونال خود را در طی شوک‌های حرارتی حفظ کرده است. پیش‌تر در برخی پژوهش‌ها گزارش شده است که ناپایداری زیرکونیا در حین سیکل‌های حرارتی باعث بروز مشکل گردیده است [۳۱].

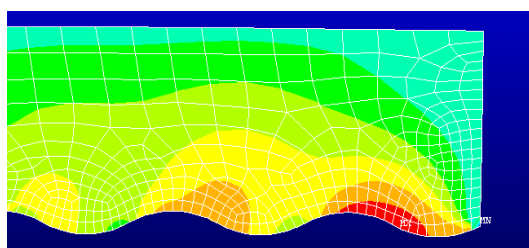
۳-۵- مدلسازی

تنش‌های برشی اثرات شدیدی بر تخریب پوشش‌های سد حرارتی دارند. می‌توان گفت تاثیر تمامی تنش‌های عرضی و طولی در تنش برشی خلاصه می‌گردد. تنش برشی ایجاد شده در پوشش سد حرارتی نانوساختار و میکرونی در شکل ۱۱ قابل مشاهده است.



شکل ۱۱: ماکزیمم تنش برشی حاصل از شوک حرارتی در پوشش سرامیکی نانوساختار و میکرونی.

تنش برشی ایجاد شده در منطقه تمرکز تنش برای پوشش میکرونی ۷۰ MPa بیشتر از پوشش نانوساختار است. در شکل ۱۲ رنگ قرمز نشان دهنده منطقه تمرکز تنش است.



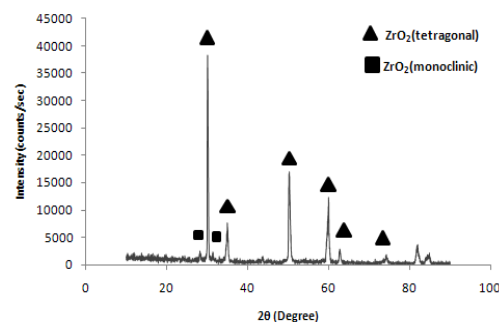
شکل ۱۲: منطقه تمرکز تنش در پوشش سرامیکی.

در خصوص تنش برشی وارد شده به لایه اکسید محافظ، نتایج حاصل از مدلسازی در شکل ۱۳ آورده شده است.

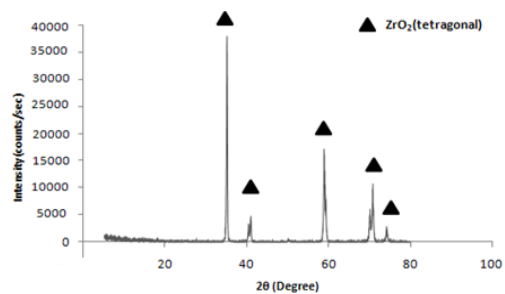
تخلخل غیریکنواخت‌تر می‌باشد. در پژوهش انجام گرفته توسط برنندت و همکاران نیز پوشش‌های نانوساختار از نظر ساختاری پوشش‌های همگن‌تری گزارش شده‌اند [۳۰]. اگر در اثر تنش و کرنش‌های حرارتی نواحی A و B توسط یک ترک به یکدیگر وصل گردند یک ترک عمیق و عمودی تشکیل خواهد گردید حال آنکه در پوشش‌های نانوساختار اندازه کوچکتر تخلخل‌ها و توزیع یکنواخت آنها باعث کاهش احتمال تشکیل ترک‌های عمیق می‌گردد.

۳-۴- بررسی فازی پوشش زیرکونیایی بعد از آزمون شوک حرارتی

در پیش‌بینی عمر پوشش میزان فاز مونوکلینیک بسیار مهم می‌باشد. فاز مونوکلینیک در دمای حدود ۱۱۰۰ درجه سانتیگراد تحت یک استحالته مارتنزیتی غیرنفوذی به تتراگونال تبدیل می‌شود. این استحالته با تغییر حجمی حدود ۵٪ همراه است که سبب ایجاد تنش و در نتیجه ایجاد ترک و ترد شدن پوشش می‌شود.



شکل ۹: پراش اشعه ایکس نمونه میکرونی.



شکل ۱۰: پراش اشعه ایکس نمونه نانوساختار.

از این رو کمتر بودن فاز مونوکلینیک در پوشش زیرکونیایی باعث عمر بیشتر پوشش در حین سیکل‌های حرارتی

پژوهش مشاهده شد که شوک‌پذیری پوشش‌های نانوساختار حدوداً ۱/۴ برابر پوشش‌های میکرونی می‌باشد. با توجه به برش عرضی نمونه‌ها تخریب در هر دو پوشش نانوساختار و میکرونی از فصل مشترک پوشش سرامیکی و پوشش واصل شروع گردید و هیچگونه تخریبی مابین لایه واصل و فلز زیرلایه مشاهده نشد. همچنین در نمونه‌های میکرونی علاوه بر تخریب نواحی نزدیک فصل مشترک، ترک‌های ناشی از تخریب در پوشش سرامیکی نیز مشاهده گردید.

توزیع تخلخل در نمونه‌های نانوساختار همگن‌تر از نمونه‌های میکرونی است که یکی از عوامل بهتر بودن خواص پوشش‌های نانوساختار می‌باشد.

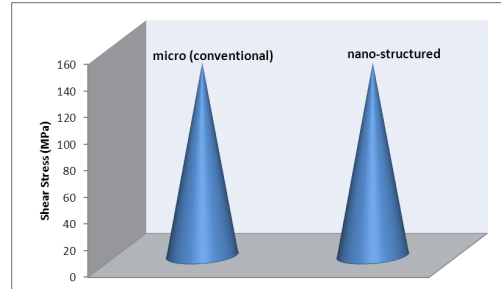
پوشش‌های نانوساختار و میکرونی پایداری فازی خود را در حین شوک‌های حرارتی حفظ کردند و تبدیل تراگونال به مونوکلینیک در هیچ کدام از نمونه‌های آزمایش مشاهده نشد.

میزان تنش برشی اعمالی به پوشش نانوساختار ۱۴۷ MPa و برای پوشش میکرونی ۲۱۷ MPa بدست آمد. با توجه به بیشتر بودن تنش برشی حرارتی در پوشش میکرونی، نتایج مدلسازی حاکی از عمر کمتر این پوشش در سیکل‌های حرارتی است که با نتایج عملی این پژوهش هم‌خوانی دارد.

تنش‌های حرارتی در کناره نمونه پوشش داده شده، بیشترین مقدار است. بدلیل تمرکز تنش در این نواحی احتمال شروع خرابی پوشش در این مناطق بسیار زیاد است که با نتایج حاصل از آزمایش عملی یکسان است.

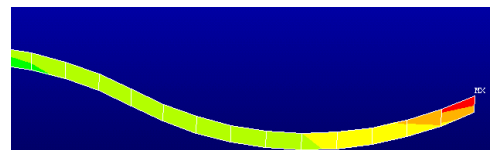
مراجع

- [1] S.A. Tsipas, I.O. Golosnoy, *Journal of the European Ceramic Society*, **31**, 2011, 2923.
- [2] Y. Li, Y. Xie, L. Huang, X. Liu, X. Zheng, *Ceramics International*, **38**, 2012, 5113.
- [3] L. Jin, L. Ni, Q. Yu, A. Rauf, C. Zhou, *Ceramics International*, **38**, 2012, 2983.
- [4] M. Noor-A-Alam, C.V. Ramana, *Ceramics International*, **38**, 2021, 2957.
- [5] C. Chen, H. Guo, S. Gong, X. Zhao, P. Xiao, *Ceramics International*, **39**, 2013, 5093.
- [6] J.A. Thompson, T.W. Clyne, *Acta Materialia*, **49**, 2001, 1565.
- [7] M. Martena, D. Botto, P. Fino, S. Sabbadini, M.M. Gola, C. Badini, *Engineering Failure Analysis*, **13**, 2006, 409.
- [8] N.A. Fleck, A.C. Cocks, S. Lampenscherf, *Journal of the European Ceramic Society*, **34**, 2014, 2687.



شکل ۱۳: ماکزیمم تنش برشی وارد شده به TGO در پوشش نانوساختار و میکرونی در سرد شدن از ۱۲۰۰ °C تا دمای محیط.

نتایج حاصل از مدلسازی تنش‌های وارده به لایه اکسید محافظ نشان می‌دهد که ماکزیمم تنش برشی وارد شده در ناحیه تمرکز تنش ۱۴۵ MPa می‌باشد و تفاوتی بین پوشش نانوساختار و میکرونی در این مورد مشاهده نمی‌شود. منطقه تمرکز تنش برای لایه اکسید محافظ در شکل ۱۴ با رنگ قرمز نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود کناره‌های نمونه مناطق تمرکز تنش لایه اکسید محافظ هستند که مکان شروع خرابی در آزمایش عملی را تایید می‌نماید.



شکل ۱۴: ماکزیمم تنش برشی وارد شده به TGO در پوشش نانوساختار و میکرونی در سرد شدن از ۱۲۰۰ °C تا دمای محیط.

طبق نتایج حاصل از مدل، پوشش میکرونی بدلیل وجود تنش‌های بزرگتر در لایه سرامیکی و تنش مساوی در لایه اکسید محافظ، می‌بایست در تعداد سیکل‌های کمتری نسبت به پوشش‌های نانوساختار تخریب شود که با نتایج حاصل از آزمایش شوک حرارتی در این پژوهش که در جدول ۱ ذکر شده، مطابقت دارد. در نتایج آزمون شوک حرارتی مشاهده گردید که عمر پوشش‌های نانوساختار حدود ۳۷٪ بیشتر از پوشش‌های میکرونی می‌باشد.

۴- نتیجه‌گیری

پوشش‌های سد حرارتی نانوساختار مقاومت به شوک حرارتی بالاتری نسبت به پوشش‌های میکرونی دارند. در این

- [21] W.Q. Wang, C.K. Sha, D.Q. Sun, X.Y. Gu, *Materials Science and Engineering*, **424**, 2006, 1.
- [22] M.R. Daroonparvar, M. Azizi, M. Yajid, N. Mohd Yusof, M. Sakhawat Hussain, *Journal of Nanomaterials*, **9**, 2013, 1.
- [23] Y. Bai, L. Zhao, J.J. Tang, S.Q. Ma, C.H. Ding, J.F. Yang, L. Yu, Z.H. Han, *Ceramics International*, **39**, 2013, 4437.
- [24] C. Zhou, N. Wang, H. Xu, *Materials Science and Engineering A*, **452**, 2007, 569.
- [25] D.R. Mumm, A.G. Evans, I.T. Spitsberg, *Acta Materialia*, **49**, 2001, 2329.
- [26] B. Liang, C. Ding, *Surface Coatings Technol.*, **197**, 2005, 185.
- [27] C. Liu, Z. Zhang, X. Jiang, M. Liu, Z. Zhu, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, **19**, 2009, 99.
- [28] H. Jamali, R. Mozafarinia, R. Razavi, R. Ahmadi-Pidani, *Ceramics International*, **38**, 2012, 6705.
- [29] R. Soltani, E. Garcia, T.W. Coyle, J. Mostaghimi, R.S. Lima, B.R. Marple, C. Moreau, *J. Thermal Spray Technol.*, **15**, 2006, 657.
- [30] O. Racek, C.C. Berndt, D.N. Guru, J. Heberlein, *Surface and Coatings Technology*, **201**, 2006, 338.
- [31] P. Scardi, M. Leoni, L. Bertamini, *Surface and Coatings Technology*, **76**, 1995, 106.
- [9] M.R. Loghman-Estarki, R. Shoja-Razavi, H. Edris, Mousa Pourbafrany, H. Jamali, R. Ghasemi, *Ceramics International*, **40**, 2014, 1405.
- [10] A. Keyvani, M. Saremi, M. Heydarzadeh-Sohi, *Journal of Alloys and Compounds*, **509**, 2011, 8370.
- [11] M. Karger, R. Vaben, D. Stover, *Surf. Coat. Tech.*, **206**, 2011, 16.
- [12] J.W. Watson, S.R. Levine, *Thin Solid Films*, **119**, 1984, 185.
- [13] R.A. Miller, C.E. Lowell, *Thin Solid Films*, **95**, 1982, 265.
- [14] G.C. Chang, W. Phucharoen, R.A. Miller, *Surface and Coatings Technology*, **30**, 1987, 13.
- [15] U. Rettig, U. Bast, D. Steiner, M. Oechsner, *J. Eng. Gas Turbines and Power*, **121**, 1999, 259.
- [16] J.A. Haynes, M.K. Ferber, W.D. Porter, *J. Thermal Spray Technol.*, **9**, 2000, 38.
- [17] A. Rabiei, A.G. Evans, *Acta Mater.*, **48**, 2000, 3963.
- [18] X.L. Jiang, C.B. Liu, F. Lin, *Journal of Materials Science and Technology*, **23**, 2007, 440.
- [19] A. Mazurkiewicz, *Materials Science Forum*, **674**, 2011, 1.
- [20] Z. Changhai, Z. Qiuming, L. Yao, *Surface and Coatings Technology*, **217**, 2013, 70.