



نشریه علمی پژوهشی مواد پیشرفته و پوششهای نوین – ۲۷ (۱۳۹۷)۱۹۳۲ –۱۹۳۷

مروری بر مکانیزم های واماندگی و شبیه سازی المان محدود پوشش های سد حرارتی پلاسما اسپری

مريم محمدی'، اسماعيل پورسعيدی آ®

۱ دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران ۲ استاد گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران



درک مسائل واماندگی پوششهای سد حرارتی در ارزیابی قابلیت و دوام آنها بسیار ضروری است. از این پوشش ها در شرایط کاری دمای بالا و گرادیان های شدید حرارتی استفاده می شود. در این مقاله، مروری بر مکانیز مهای واماندگی پوشش های سد حرارتی پلاسما اسپری تحت بارگذاریهای مختلف حرارتی و مکانیکی، انجام شده است. از آنجا که هزینهی روشهای آزمایشگاهی، در شرایط کاری پوششها، بسیار بالا بوده و محدودیتهای زیادی در عمل کرد آنها وجود دارد، این روشها نمی توانند شرایط واقعی TBC را بهخوبی منعکس کنند. از این رو مدلسازی المان محدود، نقش مهمی در مطالعهی این مسائل داشته و انتظار می رود که با استفاده از این روش ها الگوهای واماندگی TBC تحت شرایط واقعی تعیین شود. همچنین این مقاله روشهای کاربردی و جدید مدلسازی المان محدود را جهت شبیهسازی مکانیزمهای واماندگی یوششهای سد حرارتی، تحت بارهای حرارتی و مکانیکی بررسی کرده است. از جمله یاین روش ها میتوان به روش های مجازی بازشدگی ترک، المان محدود توسعه یافته و مدل ناحیه چسبنده اشاره کرد. ضمنا، مقایسهای بین روش های المان محدود ذکرشده و مزایا و محدودیتهای آنها، در مسائل واماندگی یوششها صورت گرفته است.

> پوشش سد حرارتی، واماندگی، بارگذاری حرارتی و مکانیکی، واژگان کلیدی وش المان محدود



تاريخ دريافت: 94/11/74

تاريخ يذيرش: 91/1/21

۱ – مقدمه

کاربرد پوششهای سد حرارتی (TBC) در محیطهای دمای بالا، مانند موتورهای هواپیما و توربینهای صنعتی و نیروگاهی روز به روز افزایش می یابد. پرههای توربین شرایط بسیار پیچیدهای را در توربین تحمل می کنند. این پرهها در معرض دماهای بسیار بالا و تنشهای بسیار زیاد قرار دارند. تمامی این عوامل موجب واماندگی پره و در نتيجه واماندگی موتور میشوند. بنابراین این قطعات باید به گونهای طراحی شوند که در دماهای بالا کار کرده، و عمر بیشتری داشته باشند [۱]. نتایج تحقیقات در خصوص توزیع حرارت دمای پرههای توربین گاز در دو حالت با پوشش TBC و بدون آن، نشان میدهد که حضور TBC موجب کاهش ۱۰۰ درجهای دمای بستر پره شده و در نتیجه افزایش عمر آنها می شود [۲]. اجزای سیستم TBC باید محیطهای با دمای بالا، گرادیان شدید حرارتی و شرایط پیچیدهی تنشی را تحمل کنند. با این وجود هیچ سیستم تک لایهای قادر به برآورده کردن همزمان این نیازها نیست. اجزای یک سیستم TBC مرسوم که از سه لايه بر روى بستر تشكيل شده عبارتاند از: لايهى سراميكي فوقاني (TC)، لایه ی فلزی رابط (BC) و لایه ی نازک اکسید حرارتی رشدافته (TGO). BC عموماً تركيبي از MCrAlY است كه M مي تواند Ni یا Co یا هر دوی آن ها باشد. TC معمولاً از ۶ تا ۸ درصد وزنی ایتریای پایدار شده با زیرکونیا (YSZ) تشکیل می شود و لایهی TGO غالباً Al₂O₃ است [۳].

مسائل واماندگی TBC در دمای بالا مسأله ی مهمی به شمار می رود و محققان بسیاری به آن پرداختهاند. دلیل این امر وجود عوامل متعددی است که بر مودهای شکست آنها اثر می گذارند. در همه ی این موارد، دلایل به دو دسته ی داخلی و خارجی تقسیم می شوند. دلایل داخلی به ریز ساختار پوشش در زمان اعمال آن، ساختار لایه ای، ترکها و حفره ها ارتباط دارد. دلایل خارجی شامل محیطهای سرویس واقعی است که TBC را تحت شوک حرارتی، اکسیداسیون دمای بالا و عوامل آسیب خارجی و غیره قرار می دهد [۴].

مطالعه بر روی عملکرد TBC با کار کرد مناسب به صورت آزمایشگاهی به دلیل شرایط کاری، بسیار پیچیده است. بنابراین شبیه سازی های محاسباتی کمک بزرگی به بهبود روش های ساخت و مطالعه بر ساختار پوشش ها در شرایط آزمایشگاهی می کنند. همچنین روش های محاسباتی، زمان و هزینه ی تحقیقات کمتری نسبت به روش های آزمایشگاهی داشته و بازده بالاتری نیز دارند [۵].

توزیع دما و تنش پسماند دو موضوع بسیار مهم برای TBCها تحت شرایط سرویس هستند. روش المان محدود (FEM) یک روش محاسباتی بسیار کارآمد برای محاسبه ی توزیع دما و تنش در TBC ها است [۶–۱۰]. توزیع تنش پسماند در TBCها بسیار مهم بوده و حالتهای شکست و عمر آنها را تحت تأثیر قرار می دهد. مطالعات بسیاری توزیع تنش پسماند در TBCها را تحت شرایط مختلف بارگذاری توسط FEM محاسبه کردهاند [۱۱–۱۸]. تنش پسماند در

TBCها هم در زمان اعمال آنها بر بستر و هم در زمان کار کرد آنها تحت بارگذاریهای مختلف حرارتی ایجاد می شود. زمانی که سیستم TBC از دماهای بالا تا دمای اتاق خنک می شود تنشهای پسماند پیچیدهای بهعلت عدم تطابق ضریب انبساط حرارتی و پارامترهای الاستیک در آن ایجاد می شود [۹۹ و ۲۰]. ارزیابی توزیع تنش در سیستم پوشش سد حرارتی بهعلت رشد نامنظم لایهی TGO در دماهای بالا بسیار پیچیده است. همچنین تنش در سیستم TBC تحت تأثیر مورفولوژی سطح مشترک TC و CS قرار دارد. زمانی که سطح مشترک به صورت یک سطح صاف باشد تنش ها در جهت عمودی مفر هستند اما سطح مشترک واقعی بسیار پیچیده است. از آن جایی که فرآیند پوشش دهی یکنواخت نبوده و سطح مشترک نامنظم است، تش ها در جهت عمودی صفر نیستند. بنابراین تعداد زیادی از محققان بر حالت تنش در سطح مشترک مطالعه کردهاند تا توضیح قابل قبولی از شکست در TBC ارائه دهند [۲۵].

در سال های اخیر مطالعه ی توزیع تنش و مکانیزمهای واماندگی پوشش سد حرارتی توسط مدلهای المان محدود یکی از موضوعاتی است که محققان زیادی به آن پردهختهاند . در این مدلها عمدتاً به بررسی توزیع تنش [۲۲و۶و۲۷] رفتار شکست این پوششها در سطوح مشترک BC و TG ، TGO و TGO [۸۲و۲۹] تحت انواع بارگذاریهای حرارتی [۲۲] و مکانیکی [۳۰] پرداخته شده است. نتایج این تحقیقات نشان می دهد که حالت تنش و شکست این پوششها و ابستگی زیادی به نرخ بارگذاری ایجاد شده توسط رشد لایه ی اکسید و نرخ باربرداری به علی ازداسازی تنش توسط خزش بستگی دارد [۳]. این لایه ی اکسید حاصل اکسایش BC است که با گذشت عمر پوشش، ضخامت آن بیشتر می شود و بنابراین یکی از مهم ترین عوامل دخیل در عمر پوششها می باشد [۳۲].

در مدلهای المان محدودی که برای مطالعه ی تنش و شکست پوششها مورد استفاده قرار گرفته است عموماً از سه راه برای توصیف مورفولوژی سطح مشترک استفاده شده است. راه اول در نظر گرفتن سطح مشترک به صورت ساده مانند منحنیهای سینوسی یا کسینوسی و دایرهای یا نیم دایره ای است [۲۱و۳۳–۳۷] که به بحث در خصوص برخی پارامترهای این منحنیها نیز می پردازد. راه دوم که بهبودیافته ی راه اول است، توصیف سطح مشترک با منحنیهای پیچیده ی سینوسی یا کسینوسی است که دامنه ی آنها به تدریج افزایش می یابد [۲۸]. راه سوم استفاده از پارامترهای اندازه گیری شده از پوشش واقعی است [۳۹–۴۱] اما برخی ساده سازی هایی نیز در شرایط مرزی همانند مدل های گروه اول در این ها نیز دیده می شود.

واماندگی TBCها معمولاً با جوانهزنی ترک آغاز و با رشد و انتشار آن اتفاق میافتد. در بسیاری از مطالعات گذشته حالتهای واماندگی و موقعیتهای آن تنها از طریق مقدار و مکان بیشینهی تنشهای اصلی تعیین میشد و تنها موقعیتهای جوانهزنی ترک مورد بررسی میشد. برای رفع محدودیتهای روشهای قدیمی، که شامل نحوهی انتشار

ترک میشود، روشهای محاسباتی جدیدی بهوجود آمدند که با توسعهی روشهای FEM مشکلات ناشی از روشهای مکانیک شکست کلاسیک قابل حل است. از آنجا که تنش در نوک ترک متمرکز است، ضریب شدت تنش و نرخ آزادسازی انرژی یا انتگرال J را میتوان با استفاده از MEH محاسبه نمود. مسیر انتشار ترک را میتوان با استفاده از سایر روشها مانند روش بسته شدن مجازی ترک (XFEM)، روش المان محدود توسعهیافته (XFEM) و مدل

ناحیه چسبنده (CZM) شبیهسازی کرد [۲۵و۴۲–۴۵]. هدف از ارائهی این مطالعهی مروری، بررسی مکانیزمهای واماندگی TBCها تحت بارگذاریهای حرارتی و مکانیکی و روشهای مدلسازی آنها با استفاده از FEM، مزایا و محدودیتها، فرضیات و سادهسازیهای به کار رفته در مدلها است. با توسعهی روشهای FEM، مسائل پیچیده را میتوان مورد مطالعه و ارزیابی قرار داد.

۲- مکانیزمهای شکست TBC پلاسما اسپری ۲-۱- مکانیزمهای شکست تحت بار حرارتی

تنش حرارتی و رشد TGO در شرایط سرویس مهمترین عاملی است که باعث واماندگی TBC شده و اثرات مقاومت آن در برابر حرارت را کاهش میدهد [۴۶و۴۷]. در طول خنک کاری عدم تطابق ضرایب انبساط حرارتی بین TGO و CB منجر به تنشهای پسماند حرارتی بسیار بزرگ در TGO شده که به بیشترین مقدار خود در دمای محیط میرسد [۴۹٬۹۴۸].

چهار مکانیزم واماندگی در TBC پلاسما اسپری، که به علت تنشهای خارج از صفحه ایجاد می شود، در شکل ۱ نشان داده شدهاند. تنشها در سطح مشترک BC و TGO در قلهی زبریها، کششی و در دره فشاری است. با ضخیم شدن TGO تنش کششی در سطح مشترک BC و TGO افزایش یافته که منجر به ایجاد ترک در این سطح مشترک می شود (مکانیزم I) [۵۰]. عدم تطابق ضریب انبساط حرارتی مین TG و BC و TT و بستر، TC را تحت فشار زیادی در دمای محیط قرار می دهد. با این وجود بزرگی تنشهای ناشی از TCC در TC کمتر از تنشهای پسماند در TGO است، چرا که تخلخل و ترکها در TC در مقایسه با TGO بسیار پیچیدهتر بوده و TC، CTC



شکل ۱: مکانیزمهای ترک خوردگی در APS TBC [۵۴هو۵۵]

پایین تری نسبت به CG دارد. همچنین مدول الاستیسیتهی TGO نسبت به TC بسیار بزرگتر است. از سوی دیگر به علت طبیعت نوسانات شدید سطح مشتر ک فلز و سرامیک، تنش های خارج از صفحهای در مجاورت سطح مشتر ک OTG و TC ایجاد می شود به طوری که کشش در قله و فشار در دره وجود خواهد داشت. تنش کششی موجب کشش در قله و فشار در دره وجود خواهد داشت. تنش کششی موجب [۵۸] و ترکخوردگی در TC در مجاورت قله (مکانیزم III) [۲۵و"۵] می شود. با ضخیم شدن TGO، این لایه بخش کوچکی از GC را فرا می شود. با ضخیم شدن TGO، این لایه بخش کوچکی از GC را فرا به صورت موضعی در برخی نقاط بر تنش های حرارتی ناشی از TCP بین GC و TC غالب می شود. در ضخامت خاصی از OGT ضریب نابساط حرارتی ترکیبی GL و OGT کمتر از تک لایه های OTG خریب شده که موجب تغییر تنش های TC از فشار به کشش می شود. این می شود (مکانیزم VI) [۵۴].

علاوه بر مکانیزمهای فوق پورسعیدی و همکاران دریافتند که در TBC تحت بار پیرگرمایی و سیکلی مکانیزم II میتواند به گونهای گسترش یابد که ترک به داخل TC نفوذ کند. این مکانیزم در اینجا مکانیزم V نام گذاری می شود. ضمناً مکانیزم II ممکن است از دره نیز ایجاد شود. در شکل ۲ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از نمونهی TBC وامانده شده نشان داده شده است [۵۴]. همان طور که ملاحظه می شود مکانیزمهای مشاهده شده توسط آن ها مکانیزمهای II، III و V است.

محققان در طول دهههای اخیر پژوهشهای متعددی در خصوص بررسی مکانیزمهای ترکخوردگی TBC تحت بارهای حرارتی انجام دادهاند. به عنوان مثال ربیعی و ایونس [۵۳] دریافتند که در TBC که مدتزمان کمتری تحت شار حرارتی قرار گرفته و ضخامت TGO آنها کمتر از ۵ میکرون است، مکانیزم شکست مانند حالت III از شکل ۱ بوده که منجر به کنده شدن گوهای می شود. در شکل ۳ ماندگاری سیستم در دمای بالا (۲۰ (۱۰۱۰)، ضخامت TGO به بیشتر از ۵ میکرون رسیده و ترکهای ایجاد شده در اطراف نقصهای سطح مشترک، تا نزدیکی سطح مشترک توسعه می یابند. انتشار این ترکها از TG شروع شده، در TGO نفوذ کرده و در طول سطح مشترک نیز



شکل ۲: SEM از APS TBC وامانده شده بعد از ۷۲ سیکل حرارتی [۵۴و۵۶]

نشریه علمی پژوهشی مواد پیشرفته و پوششهای نوین ۲۷ (۱۳۹۷)

گسترش می یابند. در این شرایط، شکست مانند حالت II از شکل ۱ بوده و همچنین ترک حالت III شکل ۱ نیز رشد کرده و با نفوذ در TGO، شکستی شبیه حالت II ایجاد می کند. در شکل ۴ این حالت از شکست مشاهده می شود.

پورسعیدی و همکاران در پژوهشهای خود [۵۴], [۵۷] تأثیر ضخامت TGO بر مكانيزم شكست TBC و همچنين رفتار آنها تحت بارگذاری ترکیبی خستگی و پیرگرمایی را ارزیابی کردهاند. آنها دریافتند که با افزایش مدت زمان پیرگرمایی ضخامت TGO افزایش یافته و مکانیزم شکست از حالت III نشان داده شده در شکل ۱ به حالت II تغییر می کند و نیز مکانیزم شکست مورد ارزیابی آنها به صورت مکانیزم جدید V می باشد. همچنین در این پژوهش آن ها رفتار نمونهها را تحت سیکلهای گرمایش و سرمایش ارزیابی کردند. نتایج آنها نشان میدهد که برای نمونههایی با TGOهای حدود ۲ تا ۳ میکرون، بیشترین مقاومت در برابر سیکلهای حرارتی مشاهده می شود. این مقاومت برای TGO با ضخامت ۳/۵ میکرون به کمترین مقدار رسیده و سپس مجدداً افزایش می یابد. دلیل افزایش مقاومت در برابر شوک حرارتی را میتوان خنثی شدن تنشهای اعمالی به TC از طرف BC توسط TGO دانست [۵۸]. علت افت مقاومت در برابر شوک برای ضخامتهای بالاتر از ۳/۵ میکرون را میتوان غالب شدن اثر تنشهای ناشی از TGO دانست، و علت صعودی شدن مقاومت در برابر شوک از ضخامت ۳/۵ به بالا را باید در وجود میکروتر کهای ایجاد شده بر اثر اعمال پیرگرمایی در نتیجهی آزادسازی تنشها جستجو کرد.

علاوه بر مطالعات فوق پژوهشهای متعددی در خصوص واماندگی TBCها تحت بارهای حرارتی متفاوت انجام شده است.

شیلیختینگ و همکارانش [۵۲] مودهای شکست TBCهای ایجاد شده به روش APS تحت بارگذاری حرارتی سیکلی را مطالعه کردند. آنها با استفاده از روش فوتولومینسانس پیزواسپکتراسکوپی [۴۹و۵۹], [۶۰] تنشهای پسماند در TGO را اندازهگیری کرده و ریزساختار پوششها را با توجه به سیکلهای حرارتی مشخص کردهاند. نتایج آنها نشان داد که تنش پسماند میانگین GPa ۱ در TGO وجود دارد و عمر میانگین TBCها را تعیین کردهاند. ترکخوردگی در سطح



شکل ۳: الگوی ترک خوردگی با ۳ میکرون TGO، جدایش به صورت مجزا در سطح مشترک دیده میشود [۵۳].

مشترک BC و TGO در قلهی زبری BC اتفاق میافتد. اصلی ترین مود واماندگی در سطح مشترک BC و TGO، ایجاد ترک در TC و رسیدن این ترکها بهم با شکست TGO اتفاق میافتد (مکانیزم II). بارگراسر و همکارانش [۶۹] ویژگیهای ریزساختار TBCها را بر اساس سیکل حرارتی در C^o ۱۱۰۰، در جهت افزایش طول عمر مورد آزمایش قرار دادند. طبق مشاهدات آنها شکست در نتیجهی کنده شدن کل TC اتفاق میافتاد که همان مود شکست عمومی TBCها است [۵۵۳و۲۲–۶۶].

جونالاگادا و همکارانش [۶۷] در پژوهشهای خود علاوه بر گزارش نتایج مشابه در خصوص مکانیزمهای مختلف واماندگی در TBCهایی با ساختار نانو تحت بار حرارتی سیکلی با آنچه که ذکر شد، نحوهی جوانهزنی ترکها، انتشار و بهم پیوستن آنها را نیز ارزیابی کردهاند. بررسی ضرایب شدت تنش برای ترک ایجاد شده در TT در نزدیکی قلهی سطح مشترک TT و TGO (مشابه مکانیزم III شکل ۱) و سپس انتشار آن در سطح مشترک به سمت قله، نشان داد که این نوع مکانیزم شکست برای TBCهایی با ساختار نانو محتمل تر است (ترکیب مکانیزم III و II نشان داده شده در شکل ۱).

همان طور که ملاحظه می شود مکانیز مهای واماندگی TBCها تحت بارهای حرارتی در شکل ۱ خلاصه می شود. انتشار ترک بین لایه ای مکانیزم غالبی است که در TBCهای تحت بار حرارتی مشاهده می شود با توجه به پیچیدگی این نوع از ترکها نیاز به توسعه ی ابزارهای محاسباتی و مدل هایی دقیق بر پایه ی مشاهدات تجربی احساس می شود.

۲-۲- مکانیزمهای شکست تحت بارهای مکانیکی

با وجود اینکه تنشهای حرارتی علت اصلی واماندگی TBC در طول سرویس هستند، تستهای TBC تحت بارهای مکانیکی روشهای مرسوم برای ارزیابی کیفیت تولید و ظرفیت تحمل بار TBC بعد از مرحلهی اسپری قبل از سرویس و فرآیند شکست در پوششهای سرامیکی است [۶۸]. پورسعیدی و همکاران در پژوهش [۶۹] به بررسی برخی خواص پوشش مانند مدول الاستیسیته و ارزیابی شکست با استفاده از تستهای میکرو و ماکروسختی سنجی پرداختهاند. نتایج پژوهشها نشان داد که برای پوشش TBC پلاسما



شکل گ: الگوی ترک خوردگی با ۵/۵ میکرون TGO، ترکها در نزدیکی عیوب در TGO نفوذ میکنند [۵۳].

اسپری مورد مطالعه ی آن ها، در BC با اعمال نیروی ۲ Kgf در تست میکروسختی سنجی ترک ایجاد نمی شود. همچنین در این لایه استفاده از تست ماکروسختی سنجی، به علت بزرگتر بودن عرض فرورونده از ضخامت BC، صحیح نمی باشد.

از آنجاییکه برای بررسی مکانیزمهای شکست تحت بارهای مکانیکی بیشتر بر خواص لایههای پوشش تأکید می شود، ممکن است این مطالعات قبل از قرارگیری پوشش تحت بار حرارتی انجام شود که در این صورت لایهی TGO در آنها در نظر گرفته نمی شود. در ادامه به بررسی مکانیزمهای شکست تحت بارهای مکانیکی پرداخته خواهد شد.

۲-۲-۱- مکانیزمهای شکست تحت بار کششی

ژو و همکاران [۷۰] مکانیزمهای شکست تحت بار کششی را بهصورت نشان داده شده در شکل ۵ ارائه کردهاند. همان طور که در این شکل نشان داده شده، عموماً واماندگی TBC بهصورت مسائل سهبعدی است که میتوان آنها را بهصورت مسائل دوبعدی کرنش صفحهای در نظر گرفت. سه مود رایج واماندگی نشان داده شده عبارتاند از: (۱) ترک سطحی عمودی در طول سطح مشترک TC و CB تغییر مسیر داده و تا جدایش کامل TC انتشار مییابد. (۲) ترک سطحی به BC نفوذ کرده و سپس به سطح مشترک CG و بستر بدون جدایش سطح

مشترک TC و BC، تغییر مسیر میدهد. (۳) جدایش بین لایه ای در هر دو سطح مشترک به طور همزمان مشاهده می شود.

نتایج پژوهش ژنگ و همکارانش [۷۱] نشان داد که در دمای محیط برای TBC که TD آنها به روش APS و BC آنها به روش HVOF اعمال شده است، ترک در TC جوانه زده و بعد از عبور از TC در جهت سطح مشترک TC و BC تغییر مسیر می دهد. علت این اتفاق این است که روش HVOF نسبت به APS استحکام چسبندگی بیشتری دارد. در حالی که برای TBC که هر دو لایه ی TC و BC آنها به روش پلاسما اسپری اعمال شده است، ترک از TC جوانه زده و بعد از عبور از TC به BC نفوذ کرده و بعد از عبور از آن نیز در راستای سطح مشترک BC و بستر تغییر مسیر می دهد که این مکانیزمهای شکست به ترتیب در شکل ۵ و شکل ۶ الف و ب نشان داده شده است [۷۲].

نتیجهی پژوهش لای و همکارانش [۷۰] نشان داد که علاوه بر دو مود شکست ذکر شده، ترک میتواند در هر دو سطح مشترک ایجاد و رشد کند. آنها با استفاده از تحلیل عددی حالتهایی را که ممکن است این گونه مکانیزم را ایجاد کند، برای نسبتهای مختلف چقرمگیهای شکست لایهها، ارزیابی کردهاند که در بخش بررسیهای عددی به آن پرداخته خواهد شد.

(ج)



شکل ۵: شماتیک نشان دهندهی مودهای واماندگی برای TBCهای ترک خورده با ترکهای عمودی متراکم: (الف) مود واماندگی I، (ب) مود واماندگی II و (ج) مود واماندگی III [۲۰].



میکل **۲:** مودهای شکست TBC با ترک اولیهی سطحی و انتشار آن در مسیر جدایش سطح مشترک: (الف) BC و بستر [۲۲]، (ب) سطح مشترک TC و BC [۷۲]، (پ) هر دو سطح مشترک [۲۰]. (پ) هر دو سطح ۲۰ مشترک [۲۰]. (پ) هر دو سطح مشترک [۲۰].

(ت)

(الف)

مروری بر مکانیزم های واماندگی و شبیه سازی المان محدود پوشش های سد حرارتی پلاسما اسپری

۲-۲-۲ مکانیزمهای شکست تحت بار خمشی

مانند مسائل ترک در TBC تحت کشش، در TBC تحت بار خمشی، از جمله خمش سهنقطهای، مسیر انتشار ترک مستقیماً مود شکست را تعیین می کند. شکل ۲ مسیرهای احتمالی رشد ترک را نشان می دهد. دو مود متمایز از واماندگی عبارتاند از: (۱) ترک ها از سطح پوشش ایجاد شده و در نهایت شکست در سطح مشترک TC و BC اتفاق می افتد و (۲) ترک ها در سطح مشترک BC و بستر منتشر شده و در

نهایت جدایش از این سطح مشترک بهوقوع می پیوندد.

ژیانگ و همکارانش [۷۳] در پژوهش خود دریافتند که نسبت مدول الاستیسیته و ضخامت لایهها، پارامترهای اصلی کنترل کنندهی دو مود واماندگی ذکر شده هستند. نتایج کار آنها نشان داد زمانی که TC ضخیم یا مدول الاستیسیتهی BC کم باشد، پوشش از سطح مشترک TC و BC جدا می شود و زمانی که ضخامت TC کم و مدول BC افزایش یابد موقعیت جدایش تغییر کرده و پوشش از سطح مشترک





(الف)



(ب)

BC و بستر جدا می شود. در شکل ۸ این دو مود شکست برای TC های ضخیم و نازک نشان داده شده است.

۲-۳- مکانیزمهای شکست تحت بارهای حرارتی-مکانیکی

در طی سرویس، بارهای مکانیکی شدید و گرادیان حرارتی توسط قطعات بخشهای داغ توربین تجربه میشوند. خستگی حرارتی-مکانیکی (TMF) یک روش برای ارزیابی زمان عمر سرویس سیستم TBC با معرفی مکانیزم تخریب میباشد [۲۴]. برخی محدودیتها در تستهای TMF مانند روشهای مناسب گرم کردن و خنککاری مناسب در سیستم پوشش و نیاز به پایایی سرویس مانند گرادیان دمایی در ضخامت سیستم TBC وجود دارد [۵۷و۷۶]. بنابراین کارهای مطالعاتی نسبتاً محدود در مورد تستهای TMF در سیستم TBC انجام شده است [۵۵–۸۴]. انواع تجهیزات متفاوت گرم کردن در تستهای TMF عبارتاند از: کورههای تشعشعی، کورههای لامپدار و گرم کردن مستقیم/غیر مستقیم القائی.

چن و همکارانش [۸۵] نتایج تجربی رفتار واماندگی TBC تحت تست TMF، درون فازی (IP) و خارج از فاز (OP) در محدودهی دمایی ° ۸۵۰–۴۵۰ تحت کنترل کرنش مکانیکی در تکرارهای ۳۰۰ ثانیه را ارزیابی کردهاند. نتایج مطالعهی آنها نشان داد که عمر IP TMF بیشتر از TMF تحت دامنهی کرنش مکانیکی یکسان است. چرا که تحت شرایط IP تنش محوری کمتری به سیستم وارد می شود. مور فولوژی مشاهده شده برای نمونههای وامانده نشان داد که تخریب

سطح مشترک بین لایدها و ترکخوردگی، در دو شرایط فازی متفاوت هستند. تحت شرایط IP، نموندها در طول خود بدون جدایش وامانده می شوند در حالی که در تستهای OP، پوشش به واسطه ی تنش های بزرگتر پیرامونی ترک خورده و کنده می شود. شکل ۹ تصویر نمونه ی وامانده را نشان می دهد. شکل ۱۰ (الف) و (ب) به ترتیب فر کتوگراف نمونه ی وامانده شده تحت شرایط TMF او OP را نشان می دهد. روش های دیگر مورد استفاده برای ارزیابی عمر TBT خستگی سیکل پایین (LCF) و خستگی سیکل بالا (HCF) است. جنیسترند و همکارانش [۴۴] مکانیزمهای واماندگی TBTها را با استفاده از مدل سازی المان محدود و فر کتوگرافی مطالعه کردهاند.

LCF مردو روش نشان داد که افزایش ضخامت TGO عمر LCF عمر TGO می نتایج هر دو روش نشان داد که افزایش ضخامت TGO عمر TBC می نموند. نمونههای پوشش داده شده را کاهش می دهد. ترکهای خستگی در TBC هم از سطح مشترک TT و BC یا از BC ایجاد می شوند. بررسی های آن ها نشان داد که ترکها در لایه ی TGO، بالای BC شکل گرفته و جهتشان به سمت BC تغییر می کند. زیرا تنش های بزرگ محوری در سطح مشترک ماده وجود دارند. شکل ۱۱ نمایی از این نوع ترکها را نشان می دهد.

۳- بررسی روشهای مدلسازی مکانیزمهای واماندگی

روش های زیادی برای شبیه سازی رشد ترک مورد استفاده شدهاند. در گذشته از روش های مکانیک شکست کلاسیک استفاده می شد که روش هایی استاتیکی بوده و نحوه ی انتشار ترک را پیش بینی نمی کنند. روش VCCT، روش XFEM و CZM سه روش مهم بوده که در

شکل ۱۱: جوانهزنی و رشد ترک در TGO. (الف) جوانهزنی عیوب کوچک در TGO، (ب) رشد عیوب کوچک در TGO، (چ) تشکیل ترک شعاعی [۴۴]

چند دههی اخیر توسعه یافتهاند.

VCCT ابتدا برای محاسبه ی نرخ آزادسازی انرژی (یا I انتگرال) برای جسم ترک دار توسعه داده شد. سپس بهطور گسترده در مدل سازی رشد ترک سطح مشترک در کامپوزیت های لایه ای استفاده شد. بهطور کلی، مدل سازی های رشد ترک براساس VCCT فرضیات زیر را در نظر می گیرند: (۱) انتشار ترک عموماً در طول مسیر از پیش تعریف شده اتفاق می افتد، (۲) ماده ی مدل، الاستیک خطی بوده و خواص پلاستیک در شبیه سازی در نظر گرفته نمی شوند، (۳) تحلیل شبه استاتیک بوده و اثرات گذرا را در نظر نمی گیرد. معیار شکست بر اساس نرخ آزادسازی انرژی (I انتگرال) است که با استفاده از TCCT محاسبه می شود [۴].

XFEM یک روش محاسباتی جدید نیز، اخیراً با توسعه ی مکانیک شکست و روشهای المان محدود توسعه یافته است. این روش مزیت منحصر به فردی در میان روشهای مدلسازی المان محدود دارد. بهطوری که مزایای روشهای مرسوم المان محدود (CFEM) را داشته و برای مدلسازی انتشار ترک در جسم پیوسته بسیار مناسب است. تفاوتهای اساسی بین XFEM و CFEM این است که مش

مورد استفاده در XFEM به هندسه یا فیزیک ساختار درونی جسم وابسته نیست. این امر دشواریهای مشبندی در اطراف نواحی با تمرکز تنش بالا یا تغییر شکلهای زیاد (نوک ترک، سطح مشترک نامنظم و غیره) را سادهتر می کند در حالی که این نواحی به مش بسیار ریز احتیاج دارند. مدل نیازی به مش بندی مجدد به هنگام انتشار ترک ندارد. هر مسیر رشد با استفاده از XFEM قابل شبیه سازی است. جدایش بین لایهای توسط روشهای مکانیک شکست سنتی مانند تکنیک جداشدگی گرهای مدل میشد. به جای استفاده از این روشها می توان از روش هایی استفاده کرد که ارتباط مستقیم بین تنش و جدایش ایجاد میکنند. که انرژی شکست بحرانی را بهعنوان انرژی مورد نیاز برای جدایش سطوح مشترک از هم معرفی میکنند. این روش CZM نامیده می شود. از CZM برای شبیه سازی فرآیند شکست مادهی یکنواخت نیز میتوان استفاده کرد. این روش هم برای شبیهسازی شکست مادهی همگن و هم برای جدایش بین سطوح مشترک مورد استفاده قرار می گیرد. مقایسهای از روش های فوق در جدول ۱ آورده شده است.

 برای محاسبهی نرخ آزادسازی انرژی مناسب است و اساسش بر این است که انرژی مورد نیاز زمانی که ترک مقدار کوچکی منتشر میشود برابر کاری است انرژی مورد نیاز زمانی که ترک مقدار کوچکی منتشر میشود برابر کاری است حسیر انتشار ترک باید در فرآیند شبیهسازی تعیین شود. می تواند انتشار مستقل یا همزمان چندین ترک را در نظر گیرد. حواص پلاستیک در نظر گرفته نمی شود. می تواند انتشار مستقل یا همزمان چندین ترک را در نظر گیرد. می تواند انتشار مستقل یا همزمان چندین ترک را در نظر گیرد. می تواند انتشار مستقل یا همزمان چندین ترک را در نظر گیرد. می تواند انتشار مستقل یا همزمان چندین ترک را در نظر گیرد. می تواند انتشار مستقل یا همزمان چندین ترک را در نظر گیرد. می تواند انتشار مستقل یا همزمان چندین ترک را در نظر گیرد. می تواند انتشار مستقل یا همزمان چندین ترک را در نظر گیرد. می تواند انتشار مستقل یا همزمان چندین ترک را در نظر گیرد. می تواند انتشار مستقل یا همزمان چندین ترک را در نظر گیرد. می تواند مسائل شکست بین لایه ای مناسب می تواند مسائل انتشار ترک را با خصوصیات ناپیوستگی حل کند. می ترین واماندگی ترکهایی که همزمان جوانه می زنند می ترین واماندگی ترکهایی که همزمان جوانه می زنند می تری می ترک جارچی ساختار جسم وایسته می بدد. می تری می ترک جارچی ساختار جسم وایسته می باند. می تری می ترک جارچی ساختار جسم وایسته می باند. می ترک جارچی می تشر می شود نیازی به می بندی مجد. می ترک به اندازدی مشخصی منتشر می شود نیازی به می بندی محمد. می ترک به اندازدی در تشار ترک را دنبال می کند. می ترک به اندازدی مشخصی منتشر می شود نیازی به می بندی محمد. می ترک به ترک به ترک به ترک برای می تر ترک را دنبال می کند. می ترک به ترک به ترک را دنبال می کند. می ترک برای می تشر را در تظر ترک را در ترک را د	روش محاسباتی
 انرژی مورد نیاز زمانی که ترک مقدار کوچکی منتشر می شود برابر کاری است به ترک را می بند. به ترک را می بند. می تواند انتشار مستقل یا همزمان چندین ترک را در نظر گرفته نمی شود. می تواند انتشار مستقل یا همزمان چندین ترک را در نظر گرفته نمی شود. می تواند انتشار مستقل یا همزمان چندین ترک را در نظر گرفته نمی شود. می تواند انتشار مستقل یا همزمان چندین ترک را در نظر گرفته نمی شود. می تواند انتشار مستقل یا همزمان چندین ترک اولیه ندارد. می تواند مسائل انتشار ترک را با خصومیات ناپیوستگی حل کند. می تواند مسائل انتشار ترک را با خصومیات ناپیوستگی حل کند. می تواند مسائل انتشار ترک را با خصومیات ناپیوستگی حل کند. می تواند مسائل انتشار ترک را با خصومیات ناپیوستگی حل کند. می تواند مسائل انتشار ترک را با خصومیات ناپیوستگی حل کند. می تواند مسائل انتشار ترک را با خصومیات ناپیوستگی حل کند. می تواند مسائل انتشار ترک را با خصومیات ناپیوستگی حل کند. می تواند مسائل انتشار ترک را با خصومیات ناپیوستگی حل کند. می تواند مسائل انتشار ترک را با خصومیات ناپیوستگی حل کند. مین می انتشار ترک را با خصومیات ناپیوستگی حل کند. می تواند می باند. می تواند می باند. می تواند می باز می می خد. می تواند می بازد. می تواند. <	VCCT
که ترک را میبند. محوان بندان ترک را میبند. محوان پلاستیک در نظر گرفته نمی شود. - می تواند انتشار مستقل با همزمان چندین ترک را در نظر گیرفته نمی شود. - می تواند مسائل انتشار مستقل با همزمان چندین ترک اولیه ندارد محوان پلاستیک بوده و اثرات گذرا را در نظر نمی گیرد. - تعلیل شبه استاتیک بوده و اثرات گذرا را در نظر نمی گیرد. - می تواند مسائل انتشار ترک را با خصوصیات ناپیوستگی حل کند این روش برای مدل سازی مسائل شکست بین لایه ای مناسب - می تواند مسائل انتشار ترک را با خصوصیات ناپیوستگی حل کند بین روش برای مدل سازی مسائل شکست بین لایه ای مناسب - می تواند مسائل انتشار ترک ما نمی باشد، به جزئیات داخلی ساختار هندسی - زمانی که ترک به اندازهی مشخصی منتشر می شود نیازی به مشیندی مجد - زمانی که ترک به اندازهی مشخصی منتشر می شود نیازی به مشیندی مجد - زمانی که ترک به اندازهی مشخصی منتشر می شود نیازی به مشیندی محد - می باشد.	
- می تواند انتشار مستقل یا همزمان چندین ترک را در نظر گرفته نمی شود خواص پلاستیک در نظر گرفته نمی شود تعلیل شبه استاتیک بوده و اترات گذرا را در نظر نمی گیرد تعلیل شبه استاتیک بوده و اترات گذرا را در نظر نمی گیرد تیازی به تعریف ترک اولیه ندارد این روش برای مدلسازی مسائل شکست بین لایه ای مناسب- می تواند مسائل انتشار ترک را با خصوصیات تاییوستگی حل کند برای مدلسازی واماندگی ترک هایی که همزمان جوانه می زند می تواند مسائل انتشار ترک را با خصوصیات تاییوستگی حل کند برای مدلسازی واماندگی ترک هایی که همزمان جوانه می زند می تواند مسائل انتشار ترک را با خصوصیات تاییوستگی مدل کند برای مدلسازی واماندگی ترک هایی که همزمان جوانه می زند زنان که ترک به اندازهی مشخصی منتشر می شود نیازی به مشیندی مجد برای مدلسازی واماندگی ترک هایی که همزمان جوانه می زند زمانی که ترک به اندازهی مشخصی منتشر می شود نیازی به مشیندی مجد برای مدلسازی واماندگی ترک هایی که میزمان جوانه می زند زمانی که ترک به اندازهی مشخصی میند برای مدلسازی واماندگی ترک هایی که همزمان جوانه می زند زمانی که ترک به اندازهی مشخصی میند برای مدلسازی واماندگی ترک هایی که ترک هایی خوانه می زند زمانی که ترک به اندازهی مشخصی میند برای مدلسازی واماندگی ترک هایی خوانه می زند زمانی که ترک به اندازهی مشخصی میند می زند زمانی که ترک به اندازهی میند برای مدلسازی واماندگی ترک های خوانه می زند زمانی که ترک به اندازهی می زند برای می زند زمانی که ترک به اندازهی می زند برای می زند زمانی که ترک به اندازهی می زند برای زیار می زند زمانی که ترک به ته زرد برای زیار می زیاد زمانی که ترک به ته زند برای زیار می زیاد می زیان می زیاد. <td></td>	
- تحلیل شبه استاتیک بوده و اترات گذرا را در نظر نمیگیرد. - تیازی به تعریف ترک اولیه ندارد. - می تواند مسائل انتشار ترک را با خصوصیات تاپیوستگی حل کند. - می تواند مسائل انتشار ترک ها نمیباشد، به جزئیات داخلی ساختار هندسی - تیاز به تعیین مسیر انتشار ترک ها نمیباشد، به جزئیات داخلی ساختار هندسی وابسته نبوده و تنها به شکل خارجی ساختار جسم وابسته میباشد. - زمانی که ترک به اندازهی مشخصی منتشر می شود نیازی به مشیندی مجدد نمیباشد. - مسیر انتشار ترک را دنبال میکند.	
خیازی به تعریف ترک اولیه ندارد این روش برای مدل سازی مسائل شکست بین لایه ای مناسب -می تواند مسائل انتشار ترک را با خصوصیات ناپیوستگی حل کند. نیست. - تیاز به تعیین مسیر انتشار ترک ها نمی باشد، به جزئیات داخلی ساختار هندسی وابسته نبوده و تنها به شکل خارجی ساختار جسم وابسته می باشد. مناسب نیست. - زمانی که ترک به اندازهی مشخصی منتشر می شود نیازی به مش بندی مجدد - مسیر انتشار ترک را دنبال می کند.	
-میتواند مسائل انتشار ترک را با خصوصیات ناپیوستگی حل کند. نیست. -نیاز به تعیین مسیر انتشار ترک ها نمی باشد، به جزئیات داخلی ساختار هندسی -برای مدلسازی واماندگی ترک هایی که همزمان جوانه میزنند وابسته نبوده و تنها به شکل خارجی ساختار جسم وابسته می باشد. مناسب نیست. -زمانی که ترک به اندازهی مشخصی منتشر می شود نیازی به مشیندی مجدد نمی باشد. - مسیر انتشار ترک را دنبال می کند.	XFEM
-نیاز به تعیین مسیر انتشار ترکها نمیباشد، به جزئیات داخلی ساختار هندسی جبرای مدلسازی واماندگی ترکهایی که همزمان جوانه میزنند وابسته نبوده و تنها به شکل خارجی ساختار جسم وابسته میباشد. -زمانی که ترک به اندازهی مشخصی منتشر میشود نیازی به مشیندی مجدد نمیباشد. - مسیر انتشار ترک را دنبال میکند.	
وابسته نبوده و تنها به شکل خارجی ساختار جسم وابسته میباشد. -زمانی که ترک به اندازهی مشخصی منتشر میشود نیازی به مشیندی مجدد نمیباشد. - مسیر انتشار ترک را دنبال میکند.	
-زمانی که ترک به اندازهی مشخصی منتشر میشود نیازی به مشیندی مجدد نمیباشد. - مسیر انتشار ترک را دنبال میکند.	
نمیباشد. - مسیر انتشار ترک را دنبال میکند.	
- مسیر انتشار ترک را دنبال میکند.	
- نیازی به تعریف ترک اولیه نیستپارامترهای زیادی باید وارد شود.	CZM
خیازی به مشیندی مجدد در طول فرآیند شبیهسازی نمیباشد	

جدول ۱: مقایسه ی بین XFEM ،VCCT و CZM

٤- بررسی شبیه سازی مکانیزمهای واماندگی TBC پلاسما اسپری با استفاده از FEM.

در این بخش به بررسی روشهای شبیهسازی مکانیزمهای شکست TBC پلاسما اسپری در دو بخش پرداخته خواهد شد. مکانیزمهای شکست تحت بارهای حرارتی در بخش اول و بارهای مکانیکی در بخش دوم ارزیابی میشوند.

از آنجا که بسیاری از خواص لایههای پوشش بهطور دقیق در بازهی دمایی عملکرد آن مشخص نیست، روش المان محدود این امکان را فراهم میکند که با تغییر پارامترهای شکست و خواص مواد به ارزیابی درستی از خواص دست یافته و همچنین تأثیر این پارامترها بر مکانیزمهای شکست را مورد بحث و بررسی قرار داد. در بسیاری از پژوهشهای عددی بررسی و مطالعات گستردهای در این خصوص صورت گرفته است.

بنابراین دو کاربرد مهم المان محدود در مطالعات TBC علاوه بر ارزیابی و چگونگی جوانهزنی و انتشار ترک که منجر به مشخص شدن مکانیزمهای شکست آنها می شود، تعیین پارامترهای شکست است. در قسمت سوم این بخش نیز به بررسی کاربردهای المان محدود در تعیین خواص شکست پرداخته خواهد شد.

٤-۱- شبیه سازی مکانیزمهای شکست TBC تحت بار حرارتی ٤-۱-۱- روش مکانیک شکست کلاسیک در شبیه سازی

ه ۱۰ ۴ ۲ روس معنیات سامنت تارسیات در سبیدساری مکانیزم های شکست

بیکر و همکاران، رنجبرفر و همکاران در مطالعات متعددی جوانهزنی و انتشار ترک را ارزیابی کردهاند. بیکر انتشار ترک در TC را در [۲۵] مطالعه کرده است. همچنین جدایش از سطح مشترک سینوسی بین TGO و TGO و [۶۸] و [۶۸] و [۲۸] و [۸۷] و جدایش از سطح مشترک TGO و SG در مراجع [۶۹] و [۲۸] بررسی شده است. پژوهشگران در این مطالعات از یک مدل دوبعدی با شرایط مرزی متقارن تحت بارگذاری سیکل حرارتی استفاده کردهاند. بیکر انتشار ترک را برای مقادیر مختلفی از استحکام خزشی مواد در مرجع [۲۵] بررسی کرده است. مکانیزم مورد بررسی حالت II از شکل ۱ است. همچنین در این حالت ترک میتواند در دره نیز باشد. در مرجع

[۸۷] مکانیزمهای متفاوت ایجاد ترک در حالتی که نرخ بارگذاری توسط رشد TGO نسبت به نرخ آزادسازی خزشی TT و EG بزرگتر بوده و یا خزش BC سریع باشد، ارزیابی شده است. در این حالتها مود شکست مانند حالت III از شکل ۱ است. با این تفاوت که ترک در نزدیکی دره ایجاد می شود. همچنین جهت رشد ترک با ضخیم شدن TGO مانند حالت II شکل ۱ خواهد بود. البته سادهسازیها در مدل المان محدود منجر به ارائهی مسیر رشد ترک به صورت ذکر شده است و ترک می تواند در حالت واقعی از دره نیز ایجاد شده و به سمت قلهها المان محدود منجر به ارائهی مسیر رشد ترک به صورت ذکر شده است مرجع [۸۸] حالت II و در مرجع [۲۹] حالت I از شکل ۱ را بررسی مرجع [۸۲] حالت II و در مرجع [۲۹] حالت I از شکل ۱ را بررسی متخلخل TT دریافتند که ترک می تواند از سطح مشترک T و متخلخل TT دریافتند که ترک می تواند از سطح مشترک TG و متخلخل TT دریافتند که ترک می تواند از سطح مشترک TG

جونولاگادا و همکارانش [۲۶و۸۸] در شبیه سازی های خود به منظور مشخص کردن موقعیت جوانهزنی و نحوه ی انتشار ترک و همچنین تعیین طول عمر پوشش تحت بار حرارتی سیکلی از روش مکانیک شکست [۸۹–۹۱] استفاده کردهاند. مدل استفاده شده توسط این پژوهشگران و سایر محققین برای اکثر روش های اعمال پوشش و پوشش با خواص متفاوت استفاده شده که ممکن است برخی فرضیات را به مسأله اضافه کند. با این وجود میتواند یک ارزیابی قابل قبول از تکامل آسیب را در سیستم ارائه کند. آن ها با در نظر گرفتن مسیرهای متعدد برای انتشار ترک، با استفاده از چندین مدل، ضریب شدت تنش را برای طول های مختلف ترک در مدل ها را به دست آورده و با ارزیابی این ضرایب مسیر صحیح گسترش ترک را تعیین کردهاند.

همان طور که بیان شد در بسیاری از مدلهای ارائه شده در شبیه سازی های انجام شده با استفاده از روش های کلاسیک نیاز به قرار دادن ترک اولیه بوده و انتشار ترک توسط رسیدن ماده به تنش بحرانی یا انرژی بحرانی کنترل می شود. در این شبیه سازی ها عموماً بعد از یک مرحله رشد ترک نیاز به مش بندی مجدد هست که به دشواری های حل می افزاید. در روش های توسعه یافته ی نوین انتشار ترک با معیارهای دیگری کنترل شده و ضمناً نیازی به مش بندی مجدد با هر مرحله رشد ترک وجود ندارد.

٤-۱-۲ روشهای توسعهیافتهی نوین در شبیهسازی مکانیزمهای شکست

پژوهشگران در مطالعات متعددی شرایط و مکانیزمهای شکست TBC را با استفاده از روشهای XFEM و CZM بهصورت مجزا [۲۶و۳۰و۹۲–۹۴] و همزمان [۹۵–۹۷] ارزیابی کردهاند.

بیالاس در مرجع [۲۶] و ابراهیمی و نخودچی در مرجع [۳۰] با استفاده از یک مدل المان محدود با سطح مشترک سینوسی بین لایهها و مطالعه کردهاند. شکست در این مطالعات مانند حالت II شکل ۱ است. البته بارگذاری در مرجع [۳۰] بهصورت حرارتی و مکانیکی است اما از آنجا که حالت شکست با مرجع [۲۶] تشابه دارد در این بخش بررسی شده است. بیالاس دریافت که رشد TGO این لایه را تحت کشش قرار داده و منجر به جدایش آن از BC می شود. ابراهیمی و نخودچی سیکلهای حرارتی در مقایسه با جوانهزنی ترکهای جدید، مکانیزم واماندگی در پوشش را رقم خواهد زد. همچنین آنها با استفاده از این شیهسازی و انطباق سیکلهای واماندگی با تستهای انجامشده خودشان توانستند پارامترهای CZM را برای پوشش مورد استفاده بهدست آورند.

ونگ و همکارانش [۹۲] با استفاده از XFEM رفتار انتشار ترک را در TBC ارزیابی کرده و مکانیزمهای شکست بهوجود آمده در آنها را که ناشی از انتشار ترکهای عمودی و افقی در TC است، بررسی کردهاند. نتایج آنها نشان داد که ترک عمودی موجود در قلهی TGO در مقایسه با ترک افقی تمرکز تنش در لایهی TGO را بیشتر آزاد میکند. آنها همچنین موقعیتهای ماکزیمم تنشهای فشاری و میکند. آنها همچنین موقعیتهای ماکزیمم تنشهای فشاری و بحث قرار دادهاند. در واقع آنها موقعیتهای مختلف ترک حالت III از شکل ۱ را بر ترک بینلایهای TG و TGO بررسی کردهاند. نتایج آنها نشان داد که موقعیت و حالت ترک تأثیر زیادی بر مسیر رشد آن

هیل و همکارانش [۹۳] امکان جوانهزنی ترک را در TBC تحت فرآیند خنک کاری با استفاده از یک مدل المان محدود دوبعدی توسط CZM برای لایهها با خواص متفاوت ارزیابی کردهاند. الگوهای شکست و ارزیابی رشد ترک کلی با استفاده از این شبیهسازی ارائه شده است. در شکل ۱۲ مکانیزمهای شکست برای حالتهای مختلف از خواص لایهها نشان داده شده است. همان طور که ملاحظه می شود مکانهای جوانهزنی ترک ارائه شده در مطالعه ی [۹۳] مشابه حالتهای نشان داده شده در شکل ۱ است با این وجود با توجه به فلزی بودن BC. این لایه خواص الاستوپلاستیک دارد. بنابراین حالتهای ۱ و ۳ اتفاق نمی افتد. همان طور که ملاحظه می شود المان محدود این امکان را فراهم می سازد تا با متفاوت در نظر گرفتن خواص لایههای پوشش به ارزیابی صحیحی از خواص پوشش دست یافت.

سانگ و همکارانش [۹۸و۹۸]، یاو و همکارانش [۹۶]، جیانگ و همکارانش [۹۷] اثر بارگذاری حرارتی سیکلی را بر ایجاد ترک در TC با استفاده از یک مدل المان محدود دوبعدی با سطح مشترک سینوسی بين لايهها توسط XFEM و جدايش بين لايهاي TGO و BC يا TC را با استفاده از CZM مطالعه کردهاند. در مرجع [۹۵] مکانیزم شکست تحت بار حرارتی مثلثی (گرمایش-سرمایش) و ذوزنقهای (گرمایش-ماندگاری در دمای بالا-سرمایش) بررسی شده است. تحت بار مثلثی ماکزیمم تنش در نزدیک قله از سطح مشترک TC و TGO واقع شده است. لازم به ذکر است که تحت این نوع بار تنها تنشهای ناشی از عدم تطابق ضرایب انبساط حرارتی در نظر گرفته می شود چرا که TGO رشدی ندارد. اما در بارگذاری ذوزنقهای چون سیستم در دمای بالا ماندگاری دارد TGO و نیز آسیب بین لایه ای رشد یافته و موقعیت ماکزیمم تنش از نزدیکی قله به نزدیکی دره منتقل می شود. مکانیزم شکست TBC تحت بارمثلثی مشابه حالت II شکل ۱ بوده، با این تفاوت که ترک تنها در قله جوانه زده و به درون TC نفوذ می کند. در حالی که در بار ذوزنقهای ترک در قله جوانه زده و در راستای سطح مشترک TC و TGO منتشر می شود. در مرجع [۹۸] اثر ترک TC بر سطح مشترک مطالعه شده است. نتایج تحقیقات نشان میدهد که ترکهای TC تنش پسماند TBC و نیز نرخ رشد ترکهای بین لایهای را کاهش میدهند. همچنین نتایج نشان داد که با تغییر زمان ماندگاری در دمای بالا در سیکلهای حرارتی موقعیت جوانهزنی و مسیر انتشار ترک تغییر خواهد کرد. با تغییر زبری سطح مشترک مکان ترک در TC تغییر نمی کند اما زبر شدن سطح بین لایه ها عمر TBC ها را کاهش میدهد.

TGO مطالعات [۹۶] نشان داد که افزایش ضخامت TGO تنشهای پسماند کششی بزرگتری در طول خنککاری در TC ایجاد کرده که منجر به ایجاد ترکهایی با طول بیشتر میشود. مکانیزم شکست مورد بررسی توسط آنها اثر حالت I شکل ۱ بر جدایش حالت IV است. یاو و همکارانش دریافتند که برای سیستمی با ترک موازی اولیه، ترک موجود اثر کمی بر جوانهزنی ترک TGO و رشد آن دارد و رشد ترک سطح مشترک تنشهای کششی، ناشی از عدم تطابق CTE است. از آنجا که در زمان رشد ترک با استفاده از MFEM در یک ناحیه، امکان ایجاد ترک جدید در آن ناحیه وجود ندارد بنابراین اما بعد از حصول شکست کامل در ناحیهای که ترک اولیه رشد کرده، ترکهایی در دامنه ی سطح مشترک ایجاد شده و مکانیزم IV شکل ام اعداق می افتد.

پورسعیدی و همکاران [۹۴] با استفاده از یک روش مدلسازی جدید، یک بخش از تصاویر SEM واقعی بهدست آمده از تستهای آزمایشگاهی [۵۴] را در یک هندسه با ابعاد نمونههای تست جاگذاری کرده و یک مدل المان محدود نزدیک به نمونههای تست ایجاد کردهاند، که در شکل ۱۳ نشان داده شده است. سپس به مطالعهی

www.SID.tr

مکانیزمهای شکست نمونهها با پیرگرماییهای مختلف تحت بارگذاری حرارتی مثلثی (شوک: گرمایش-سرمایش) پرداختهاند. میافتد و ترک از درهی سطوح مشترک آغاز شده و به سمت قلهها رشد می کند. یعنی مکانیزم واماندگی مشابه حالت II در شکل ۱ را بررسی در مرجع [۹۷] پژوهشگران اثر حالت III و VI از شکل ۱ را بررسی کردهاند. نتایج آنها نشان داد که جوانهزنی ترک در TT در قلهی سطح مشترک، قبل از آغاز سیکلهای حرارتی، بهواسطهی تنش پسماند ایجاد شده در TT بهعلت سرد شدن از دمای بالا تا دمای پسماند ایجاد شده در TT بهعلت سرد شدن از دمای بالا تا دمای زش ترک رشد می کند. همچنین با ایجاد ترک بین لایهای بین TGO و TG ترک TC بیشتر انتشار یافته و در نهایت منجر به جدایش بین لایهای در پوشش می شود.

همان طور که ملاحظه می شود با استفاده یه زمان از روش ها می توان مکانیزمهای مختلف واماندگی پوشش ها را همزمان و با دقت بیشتری مطالعه کرد.

٤-۲− شبیهسازی مکانیزمهای شکست TBC تحت بار مکانیکی

٤-۲-۱ شبیهسازی مکانیزمهای شکست تحت بار کششی

زو و همکاران [۹۹و۱۰۰]، ژو و همکاران [۱۰۱] در پژوهشهای خود رفتار ترکخوردگی سطحی بر جدایش بینلایهای در TBC تحت کشش را ارزیابی کردهاند.

در [۹۹] و [۱۰۱] بهترتیب رفتار ترکخوردگی سطح مشترک با استفاده از VCCT و CZM ارزیابی شده است. پژوهشگران در [۹۹] اثرات پارامترهای هندسی و خواص مواد مانند ضخامت و مدول الاستیسیته ی TC و GC را در رفتار جدایش بین لایهای مطالعه کردهاند. جدایش مورد بررسی توسط آنها مانند حالت I از شکل ۵ است. نتایج آنها نشان داد که نیروی پیش برنده ی جدایش به ضخامت TC نسبت به ضخامت BC بسیار حساس تر است. به علاوه جدایش بین لایه ای برای TCهای نسبتاً ضخیم و با سفتی بیشتر نسبت به BC، به سادگی جوانه زده و رشد می کند.

فن و همکارانش [۱۰۲] رفتار ترکخوردگی لایه یالاستیک نازک را بر بستر الاستیک ضخیم تحت کرنش ثابت با استفاده از XFEM ارزیابی کردهاند. در مطالعه ی آنها اثر پارامترهای متعدد شامل طول ترک، ضخامت پوشش، فاصله ی ترک پریودیک و سفتی نسبی بستر بر تنش و ضریب شدت تنش مطالعه شده است. آنها نشان دادند که حساسیت پارامترهای هندسی نسبت به خواص مواد بر ایجاد ترک بسیار بیشتر است.

در [۱۰۱] اثر تراکم ترک سطحی بر جدایش بین لایه ای مطالعه شده است. نتایج آن ها نشان داد که در حالتی که تراکم ترک سطحی کم باشد، ترک سطحی از سطح جوانه زده و تا سطح مشترک پوشش توسعه می یابد. با افزایش این تراکم جدایش بین لایه ای بعد از اندکی رشد متوقف می شود و برای ترک های سطحی با تراکم بالا تنها ترک در سطح پوشش خواهد بود و جدایش بین لایه ای اتفاق نخواهد افتاد.

٤-۲-۲- شبیهسازی مکانیزمهای شکست تحت بار خمشی

ژیانگ و همکارانش [۷۳] با استفاده از یک مدل دوبعدی و روش CZM، ترکهای عمودی نفوذی از TC تا سطح مشترک BC و بستر را برای نمونه تحت بار خمش سهنقطه بررسی کردهاند. نتایج آنها نشان داد که جدایش در سطح مشترک TC و BC برای TBC با مدول یانگ پایین لایه ی BC و TT ضخیم تر اتفاق میافتد. در حالی که جدایش در سطح مشترک BC و بستر زمانی اتفاق میافتد که مدول یانگ BC بالا بوده و TC نازک تر باشد.

لای و همکارانش [۶۸] خصوصیات شکست پوشش TBC با ضخامتهای مختلف TC را تحت بار خمش سهنقطهای به صورت آزمایشگاهی و CZM مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که ترکهای عرضی متعدد عمود بر سطح مشترک پوشش و بستر در پوششهایی با TC نازک، با ضخامت کمتر از ۲۰۰ میکرون، ایجاد شده و منجر به شکست پوشش می شود. در حالی که ترکهای بین لایه ای، مود حاکم شکست نمونه ها با ضخامت بیشتر از ۳۰۰ میکرون را منجر می شد. در صورتی که پوشش نازک باشد حالت شکست مانند شکل ۷ (ج) بوده و ترکهای سطحی متعددی در پوشش ایجاد می شود. اما در

(ب)

صورتی که پوشش ضخیم باشد، حالت شکست مانند شکل ۲ (ه) است و جدایش پوشش از بستر منجر به شکست پوشش می شود.

همان طور که ملاحظه می شود پارامترهای خواص و هندسه تأثیر زیادی بر مکانیزمهای شکست ناشی از بارگذاریهای مکانیکی دارند. می توان از شبیه سازی تست خمش برای به دست آوردن برخی خواص مکانیکی پوشش ها استفاده کرد. برای این منظور باید مکانیزم شکست پوشش را کنترل کرد. بهعنوان مثال اگر هدف بدست آوردن خواصی مانند چقرمگی بین لایههای پوشش، مثلاً BC و TC باشد، باید به گونهای تست را انجام داد که جدایش از بین لایه های BC و TC اتفاق افتد. بدین ترتیب میتوان نمودارهای مربوطه را با تغییر دادن خواص مورد نظر در روش مورد استفاده، CZM یا KFEM بهدست آورده و از مقایسهی آنها با نتایج تست، خواص مورد نظر را یافت. پورسعیدی و همکاران [۱۰۳و۱۰۴] توانستند با استفاده از شبیهسازی تست خمش چهارنقطهای به روش CZM، چقرمگی بین لایههای BC و TC را برای نمونههای TBC با پیر گرماییهای مختلف بهدست آورند. آنها برای دستیابی به این هدف از یک لایه استیفنر از جنس بستر بر روی TC استفاده کردند تا جدایش تنها در سطح مشترک اتفاق افتاده و ترک از سطح پوشش ایجاد نشود. نتایج آنها نشان داد که با افزایش ساعات پیرگرمایی چقرمگی بین لایه ای کاهش می یابد.

٤-۳- استفاده از شبیهسازی FEM برای یافتن پارامترهای شکست

لئو و همکارانش [۱۰۵] با استفاده از CZM و تستهای آزمایشگاهی، خواص تنش-جدایش را، که در مدلسازی مکانیزمهای جدایش TBC مفید هستند، بهدست آوردهاند. آنها در مطالعات خود سه تست کشش، برش و خمش چهارنقطهای نامتقارن را انجام داده، نمودارهای کشش-کرنش و نیرو-جابجایی را برای تستها بهدست آورده و از برازش آنها و نتایج حاصل از شبیهسازی توانستند خواص بین لایهای را برای پوشش خود بهدست آورند.

به روش مشابه پورسعیدی و همکاران در پژوهش [۱۰۳] مقدار چقرمگی شکست بینلایهای TBC پلاسما اسپری و تأثیر پارامتر

پیرگرمایی بر مقدار آن را مورد بررسی قرار کردهاند. آنها با تغییر پارامتر چقرمگی در حل المان محدود به روش CZM نمودارهای تنش-کرنش و نیرو-جابجایی را به گونهای بهدست آوردند که منطبق بر تستهای آزمایشگاهی باشد. لازم به ذکر است که ساخت دستگاه تست خمش چهارنقطهای، که در شکل ۱۴ نشان داده شده، در پژوهش دیگری توسط آنها انجام شده است [۱۰۶].

٥- مقایسهی نتایج، روشها و ایدههای آینده

TBCها می توانند از قطعاتی که در دماهای بسیار زیاد کار می کنند، مانند توربینها و موتورها، با کاهش دمای سطح بستر آنها محافظت کنند. اما طول عمر آنها به علت کار کرد در محیطهایی با دمای بالا به دلایل مختلف از جمله اکسیداسیون، خوردگی، سایش و سایر عوامل خارجی محدود است.

در این مقاله مکانیزمهای واماندگی TBC تحت بارهای حرارتی و مکانیکی بررسی شد. برخی از نتایج به صورت زیر خلاصه می شود: ۲- ترکخوردگی در TBC پلاسما اسپری تحت بار حرارتی در نزدیک سطوح مشترک لایهها، بهعلت رشد TGO و عیوب متعددی که در بین لایهها وجود دارد، ظاهر می شود. در بار گذاری های سیکلی که فقط شامل گرمایش و سرمایش است، واماندگی به علت عدم تطابق CTE اتفاق میافتد. در حالی که در بارگذاریهای سیکلی که ماندگاری در دمای بالا نیز به گرمایش و سرمایش اضافه می شود، واماندگی ناشی از رشد TGO نیز اضافه می شود. همچنین تحت شرایط مختلفی از این بارگذاریها ممکن است ترکخوردگی در TC اتفاق افتاده یا جدایش بین لایهای بهوجود آید. همچنین ترکخوردگی در TC مى تواند بر جدايش بين لايه اى تأثير گذارد يا عكس آن اتفاق افتد. همچنین سیکلهای حرارتی می توانند منجر به ایجاد ترکهای متعدد و بههم پیوستن آنها در TGO شود. برای مطالعهی مکانیزمهای واماندگی لایه های مختلف TBCها دانستن خواص مکانیکی، حرارتی و شکست آنها در محدودهی دمایی عملکرد، و همچنین تغییرات این خواص با افزایش مدتزمان کارکرد، ضروری است. از آنجا که این خواص و تغییرات آنها بهطور کامل واضح نیست، بنابراین نیاز به طراحی و انجام برخی تستهای آزمایشگاهی و برخی اندازه گیریها

شکل ١٤: تست خمش چهار نقطهای [۵۶].

در این خصوص احساس می شود. که در مطالعات آینده بایستی مدنظر قرار گیرد.

۲- تحت بار مکانیکی در شرایط مختلفی از ضخامت و پارامترهای خواص مواد، الگوهای شکست، ایجاد و رشد ترک متفاوت خواهد بود. برای TBC تحت بار مکانیکی خمش سهنقطه، جدایش می تواند از سطح مشترک TC و CG یا CG و بستر اتفاق افتد. همچنین رشد ترک در خود لایهها یا سطوح مشترک بین لایهها برای پارامترهای خواص آنها و هندسه مختلف، تحت بارهای مکانیکی قابل بررسی است. اما مطالعه مکانیزمهای واماندگی TBTها تحت برخی بارهای مکانیکی، مانند خمشی، در دماهای بالا، به علت پیچیدگی انتشار ترکها نیازمند بررسیهای بیشتری است که در مطالعات آینده باید مدنظر قرار گیرند.

۳- جهت مدلسازی مکانیزمهای واماندگی اشاره شده روشهای مختلفی استفاده شده است. روش بسته شدن مجازی ترک، المان محدود توسعه یافته و مدل ناحیه چسبنده، سه روش مهم برای شبیهسازی رفتار انتشار ترک در TBC هستند. VCCT برای محاسبهی پارامترهای مکانیک شکست در جهت پیش بینی رشد ترک استفاده می شود. XFEM برای شبیه سازی رفتار انتشار ترک در TC و CZM برای شبیه سازی رفتار انتشار ترک در سطح مشترک استفاده می شود. طبق مطالعات نویسندگان مشخص شد که سطح مشترک TGO و TT مستعد ایجاد ترک و انتشار آن بوده و یکی از مكانيزمهاي اصلى واماندكي TBC جدايش بينلايهاي است، بنابراين روش CZM برای ارزیابی این نوع از مکانیزمهای شکست بسیار كاراًمد است. با توجه به اينكه ريزساختار TBC بسيار نامنظم است و ریز حفرات و ریز ترکها به صورت تصادفی در سیستم پراکنده شدهاند، بررسی انتشار ترک در چنین سیستمی بسیار پیچیده است. مطالعات جوانهزنی و نحوهی انتشار ترک، و بهطور کلی مکانیزمهای واماندگی، در TBCها در محدودهی دمایی عمل کرد آن ها تحت بارهای ترکیبی با استفاده از روشهای محاسباتی با در نظر گرفتن خواص متغیر با دما، باید در مطالعات آینده توسعه داده شوند تا بتوانند شرایط واقعی کارکرد این سیستم پوششها را شبیهسازی کنند. همچنین توسعهی روشهای مدلسازی موجب می شود تا بتوان پیشبینی صحیحی از طول عمر TBCها ارائه كرد.

element method," J. Mater. Process. Technol., vol. 180, no. 1–3, pp. 239–245, 2006.

[15] W. G. Mao, Y. C. Zhou, L. Yang, and X. H. Yu, "Modeling of residual stresses variation with thermal cycling in thermal barrier coatings," Mech. Mater., vol. 38, no. 12, pp. 1118–1127, 2006.

[16] G. Lee, A. Atkinson, and A. Selçuk, "Development of residual stress and damage in thermal barrier coatings," Surf. Coatings Technol., vol. 201, no. 7, pp. 3931–3936, 2006.

[17] A. N. Khan, J. Lu, and H. Liao, "Effect of residual stresses on air plasma sprayed thermal barrier coatings," Surf. Coatings Technol., vol. 168, no. 2–3, pp. 291–299, 2003.

[18] محمدی م. و پورسعیدی ا، ارزیابی آزمایشگاهی و المان محدود تنش ناشی از اعمال پوشش سد حرارتی، اولین کنفرانس ملی مکانیک محاسباتی و تجربی، دانشگاه شهید رجائی، تهران، ایران، ۱۳۹۷.

[19] V. Teixeira, M. Andritschky, W. Fischer, H. Buchkremer, and D. Stöver, "Analysis of residual stresses in thermal barrier coatings," J. Mater. Process. Technol., vol. 92, pp. 209–216, 1999.

[20] G. Qian, T. Nakamura, and C. C. Berndt, "Effects of thermal gradient and residual stresses on thermal barrier coating fracture," Mech. Mater., vol. 27, no. 2, pp. 91–110, 1998.

[21] M. Ranjbar-Far, J. Absi, G. Mariaux, and F. Dubois, "Simulation of the effect of material properties and interface roughness on the stress distribution in thermal barrier coatings using finite element method," Mater. Des., vol. 31, no. 2, pp. 772–781, 2010.

[22] M. Ranjbar-Far, J. Absi, S. Shahidi, and G. Mariaux, "Impact of the non-homogenous temperature distribution and the coatings process modeling on the thermal barrier coatings system," Mater. Des., vol. 32, no. 2, pp. 728–735, 2011.

[23] K. Sfar, J. Aktaa, and D. Munz, "Numerical investigation of residual stress fields and crack behavior in TBC systems," Mater. Sci. Eng. A, vol. 333, no. 1–2, pp. 351–360, 2002.

[24] W. Zhu, M. Cai, L. Yang, J. W. Guo, Y. C. Zhou, and C. Lu, "The effect of morphology of thermally grown oxide on the stress field in a turbine blade with thermal barrier coatings," Surf. Coatings Technol., vol. 276, pp. 160–167, 2015.

[25] M. Bäker, "Finite element simulation of interface cracks in thermal barrier coatings," Comput. Mater. Sci., vol. 64, pp. 79–83, 2012.

[26] M. Białas, "Finite element analysis of stress distribution in thermal barrier coatings," Surf. Coatings Technol., vol. 202, no. 24, pp. 6002–6010, 2008.

[27] A. Moridi, M. Azadi, and G. H. Farrahi, "Thermo-mechanical stress analysis of thermal barrier coating system considering thickness and roughness effects," Surf. Coatings Technol., vol. 243, pp. 91–99, 2014.

[28] M. Ranjbar-far, J. Absi, G. Mariaux, and D. S. Smith, "Crack propagation modeling on the interfaces of thermal barrier coating system with different thickness of the oxide layer and different interface morphologies," Mater. Des., vol. 32, no. 10, pp. 4961–

٥- مراجع

 [1] V. Sankar, P. B. Ramkumar, D. Sebastian, D. Joseph, J. Jose, and A. Kurian, "Optimized Thermal Barrier Coating for Gas Turbine Blades," Mater. Today Proc., vol. 11, pp. 912–919, 2019.
 [2] عزیزی فر ۱، پورسعیدی ۱. و رحیمی ج، بررسی اثر پوشش های سدحرارتی بر توزیع دما و فرکانس پرههای متحرک ردیف دوم در توربین های گازی GEF9 چهارمین کنفرانس ملی و دومین کنفرانس بین المللی پژوهش های کاربردی در مهندسی برق، مکانیک و مکاترونیک، تهران، ایران، ۱۳۹۵.

[3] H. Xu and H. Guo, Thermal barrier coatings. Elsevier, 2011.
[4] L. Wang et al., "Modeling of thermal properties and failure of thermal barrier coatings with the use of finite element methods: A review," J. Eur. Ceram. Soc., vol. 36, no. 6, pp. 1313–1331, 2016.
[5] A. Shanian, A. S. Milani, N. Vermaak, K. Bertoldi, T. Scarinci, and M. Gerendas, "A combined finite element-multiple criteria optimization approach for materials selection of gas turbine components," J. Appl. Mech., vol. 79, no. 6, p. 61019, 2012.

[6] J.-H. Qiao, R. Bolot, H. Liao, P. Bertrand, and C. Coddet, "A 3D finite-difference model for the effective thermal conductivity of thermal barrier coatings produced by plasma spraying," Int. J. Therm. Sci., vol. 65, pp. 120–126, 2013.

[7] X. Ma, F. Wu, J. Roth, M. Gell, and E. H. Jordan, "Low thermal conductivity thermal barrier coating deposited by the solution plasma spray process," Surf. Coatings Technol., vol. 201, no. 7, pp. 4447–4452, 2006.

[8] D. R. Clarke, "Materials selection guidelines for low thermal conductivity thermal barrier coatings," Surf. Coatings Technol., vol. 163, pp. 67–74, 2003.

[9] G. Bertrand, P. Bertrand, P. Roy, C. Rio, and R. Mevrel, "Low conductivity plasma sprayed thermal barrier coating using hollow psz spheres: Correlation between thermophysical properties and microstructure," Surf. Coatings Technol., vol. 202, no. 10, pp. 1994–2001, 2008.

[10] N. P. Bansal and D. Zhu, "Effects of doping on thermal conductivity of pyrochlore oxides for advanced thermal barrier coatings," Mater. Sci. Eng. A, vol. 459, no. 1–2, pp. 192–195, 2007.

[11] X. C. Zhang, B. S. Xu, H. D. Wang, Y. Jiang, and Y. X. Wu, "Prediction of three-dimensional residual stresses in the multilayer coating-based systems with cylindrical geometry," Compos. Sci. Technol., vol. 66, no. 13, pp. 2249–2256, 2006.

[12] X. C. Zhang, B. S. Xu, H. D. Wang, Y. Jiang, and Y. X. Wu, "Modeling of thermal residual stresses in multilayer coatings with graded properties and compositions," Thin Solid Films, vol. 497, no. 1–2, pp. 223–231, 2006.

[13] X. Wu et al., "Size effect of thermal shock crack patterns in ceramics and numerical predictions," J. Eur. Ceram. Soc., vol. 35, no. 4, pp. 1263–1271, 2015.

[14] F. Sen, O. Sayman, M. Toparli, and E. Celik, "Stress analysis of high temperature ZrO2 insulation coatings on Ag using finite

Stresses in Thermal Barrier Coatings," J. Am. Ceram. Soc., vol. 82, no. 4, pp. 1073–1075, 1999.

[42] B. Zhou and K. Kokini, "Effect of pre-existing surface crack morphology on the interfacial thermal fracture of thermal barrier coatings: a numerical study," Mater. Sci. Eng. A, vol. 348, no. 1–2, pp. 271–279, 2003.

[43] A. K. Ray and R. W. Steinbrech, "Crack propagation studies of thermal barrier coatings under bending," J. Eur. Ceram. Soc., vol. 19, no. 12, pp. 2097–2109, 1999.

[44] M. Jinnestrand and H. Brodin, "Crack initiation and propagation in air plasma sprayed thermal barrier coatings, testing and mathematical modelling of low cycle fatigue behaviour," Mater. Sci. Eng. A, vol. 379, no. 1–2, pp. 45–57, 2004.

[45] Z. X. Chen, L. H. Qian, and S. J. Zhu, "Determination and analysis of crack growth resistance in plasma-sprayed thermal barrier coatings," Eng. Fract. Mech., vol. 77, no. 11, pp. 2136–2144, 2010.

[46] E. Schumann, C. Sarioglu, J. R. Blachere, F. S. Pettit, and G. H. Meier, "High-Temperature Stress Measurements During the Oxidation of NiAl," Oxid. Met., vol. 53, pp. 259–272, 2000.

[47] Y. Z. Liu, X. B. Hu, Y. L. Zhu, H. Wei, V. P. Dravid, and W. W. Zhang, "Effects of isothermal oxidation on microstructure and mechanical properties of thermal barrier coatings," Ceram. Int., 2019.
[48] D. M. and Lipkin and D. R. Clarke, "Measurement of the stress in oxide scales formed by oxidation of alumina-forming alloys," Oxid. Met., vol. 45, no. 3–4, pp. 267–280, 1996.

[49] K. W. Schlichting, K. Vaidyanathan, Y. H. Sohn, E. H. Jordan, M. Gell, and N. P. Padture, "Application of Cr3+ photoluminescence piezo-spectroscopy to plasma-sprayed thermal barrier coatings for residual stress measurement," Mater. Sci. Eng. A, vol. 291, no. 1–2, pp. 68–77, 2000.

[50] D. R. Clarke and W. Pompe, "Critical radius for interface separation of a compressively stressed film from a rough surface," Acta Mater., vol. 47, no. 6, pp. 1749–1756, 1999.

[51] C. H. Hsueh, P. F. Becher, E. R. Fuller, S. A. Langer, and W. C. Carter, "Surface-roughness induced residual stresses in thermal barrier coatings: computer simulations," in Materials science forum, 1999, vol. 308, pp. 442–449.

[52] K. W. Schlichting, N. P. Padture, E. H. Jordan, and M. Gell, "Failure modes in plasma-sprayed thermal barrier coatings," Mater. Sci. Eng. A, vol. 342, no. 1–2, pp. 120–130, 2003.

[53] A. Rabiei and A. G. Evans, "Failure mechanisms associated with the thermally grown oxide in plasma-sprayed thermal barrier coatings," Acta Mater., vol. 48, no. 15, pp. 3963–3976, 2000.

[54] K. Torkashvand, E. Poursaeidi, and M. Mohammadi, "Effect of TGO thickness on the thermal barrier coatings life under thermal shock and thermal cycle loading," Ceram. Int., vol. 44, no. 8, pp. 9283–9293, 2018.

4969, 2011.

[29] M. Ranjbar-Far, J. Absi, and G. Mariaux, "Finite element modeling of the different failure mechanisms of a plasma sprayed thermal barrier coatings system," J. Therm. Spray Technol., vol. 21, no. 6, pp. 1234–1244, 2012.

[30] H. Ebrahimi and S. Nakhodchi, "Thermal fatigue testing and simulation of an APS TBC system in presence of a constant bending load," Int. J. Fatigue, vol. 96, pp. 1–9, 2017.

[31] M. Baker, J. Rosler, and M. Volgmann, "Stress State and Failure Mechanisms of Thermal Barrier Coatings : Role of Creep in Thermally," vol. 49, pp. 3659–3670, 2001.

[32] A. M. Freborg, B. L. Ferguson, W. J. Brindley, and G. J. Petrus, "Modeling oxidation induced stresses in thermal barrier coatings," Mater. Sci. Eng. A, vol. 245, no. 2, pp. 182–190, 1998.

[33] W. G. Mao, J. P. Jiang, Y. C. Zhou, and C. Lu, "Effects of substrate curvature radius, deposition temperature and coating thickness on the residual stress field of cylindrical thermal barrier coatings," Surf. Coatings Technol., vol. 205, no. 8–9, pp. 3093–3102, 2011.

[34] M.-J. Pindera, J. Aboudi, and S. M. Arnold, "The effect of interface roughness and oxide film thickness on the inelastic response of thermal barrier coatings to thermal cycling," Mater. Sci. Eng. A, vol. 284, no. 1–2, pp. 158–175, 2000.

[35] W. X. Zhang, X. L. Fan, and T. J. Wang, "The surface cracking behavior in air plasma sprayed thermal barrier coating system incorporating interface roughness effect," Appl. Surf. Sci., vol. 258, no. 2, pp. 811–817, 2011.

[36] M. Ahrens, R. Vaßen, and D. Stöver, "Stress distributions in plasma-sprayed thermal barrier coatings as a function of interface roughness and oxide scale thickness," Surf. Coatings Technol., vol. 161, no. 1, pp. 26–35, 2002.

[37] R. Eriksson, S. Sjöström, H. Brodin, S. Johansson, L. Östergren, and X. H. Li, "TBC bond coat-top coat interface roughness: Influence on fatigue life and modelling aspects," Surf. Coatings Technol., vol. 236, pp. 230–238, 2013.

[38] Q. M. Yu and Q. He, "Effect of material properties on residual stress distribution in thermal barrier coatings," Ceram. Int., vol. 44, no. 3, pp. 3371–3380, 2018.

[39] N. Nayebpashaee, S. H. Seyedein, M. R. Aboutalebi, H. Sarpoolaky, and S. M. M. Hadavi, Finite element simulation of residual stress and failure mechanism in plasma sprayed thermal barrier coatings using actual microstructure as the representative volume, vol. 291. Elsevier B.V., 2016.

[40] M. Gupta, K. Skogsberg, and P. Nylén, "Influence of topcoatbondcoat interface roughness on stresses and lifetime in thermal barrier coatings," J. Therm. Spray Technol., vol. 23, no. 1–2, pp. 170–181, 2014.

[41] C. Hsueh et al., "Effects of Interface Roughness on Residual

[69] M. Khoshnejad, "Determination of mechanical properties of APS thermal barrier coatings under thermal loading by indentation test methode," (under submission).

[70] B. Li, X. Fan, H. Okada, and T. Wang, "Mechanisms governing the failure modes of dense vertically cracked thermal barrier coatings," Eng. Fract. Mech., vol. 189, pp. 451–480, 2018.

[71] H.-J. Jang, D.-H. Park, Y.-G. Jung, J.-C. Jang, S.-C. Choi, and U. Paik, "Mechanical characterization and thermal behavior of HVOF-sprayed bond coat in thermal barrier coatings (TBCs)," Surf. Coatings Technol., vol. 200, no. 14–15, pp. 4355–4362, 2006.
[72] Z. B. Chen, Z. G. Wang, and S. J. Zhu, "Tensile fracture behavior of thermal barrier coatings on superalloy," Surf. coatings Technol., vol. 205, no. 15, pp. 3931–3938, 2011.

[73] P. Jiang, X. Fan, Y. Sun, D. Li, B. Li, and T. Wang, "Competition mechanism of interfacial cracks in thermal barrier coating system," Mater. Des., vol. 132, pp. 559–566, 2017.

[74] T. C. Totemeier, W. F. Gale, and J. E. King, "Isothermal fatigue of an aluminide-coated single-crystal superalloy: Part II. effects of brittle precracking," Metall. Mater. Trans. A, vol. 27, no. 2, pp. 363–369, 1996.

[75] E. Tzimas, H. Müllejans, S. D. Peteves, J. Bressers, and W. Stamm, "Failure of thermal barrier coating systems under cyclic thermomechanical loading," Acta Mater., vol. 48, no. 18–19, pp. 4699–4707, 2000.

[76] B. Baufeld, E. Tzimas, H. Müllejans, S. Peteves, J. Bressers, and W. Stamm, "Thermal-mechanical fatigue of MAR-M 509 with a thermal barrier coating," Mater. Sci. Eng. A, vol. 315, no. 1–2, pp. 231–239, 2001.

[77] Y. H. Zhang, P. J. Withers, M. D. Fox, and D. M. Knowles,
"Damage mechanisms of coated systems under thermomechanical fatigue," Mater. Sci. Technol., vol. 15, no. 9, pp. 1031–1036, 1999.
[78] P. K. Wright, "Influence of cyclic strain on life of a PVD TBC," Mater. Sci. Eng. A, vol. 245, no. 2, pp. 191–200, 1998.

[79] J. Shi, A. M. Karlsson, B. Baufeld, and M. Bartsch, "Evolution of surface morphology of thermo-mechanically cycled NiCoCrAlY bond coats," Mater. Sci. Eng. A, vol. 434, no. 1–2, pp. 39–52, 2006.

[80] A. Peichl, T. Beck, and O. Vöhringer, "Behaviour of an EB-PVD thermal barrier coating system under thermal–mechanical fatigue loading," Surf. Coatings Technol., vol. 162, no. 2–3, pp. 113–118, 2003.

[81] B. Baufeld, E. Tzimas, P. Hähner, H. Müllejans, S. D. Peteves, and P. Moretto, "Phase-angle effects on damage mechanisms of thermal barrier coatings under thermomechanical fatigue," Scr. Mater., vol. 45, no. 7, pp. 859–865, 2001.

[82] B. Baufeld, M. Bartsch, S. Dalkiliç, and M. Heinzelmann, "Defect evolution in thermal barrier coating systems under multiaxial thermomechanical loading," Surf. Coatings Technol., vol. [55] N. P. Padture, M. Gell, and E. H. Jordan, "Thermal barrier coatings for gas-turbine engine applications," Science (80-.)., vol. 296, no. 5566, pp. 280–284, 2002.

[۵۶] محمدی م، پورسعیدی ۱. و ترکاشوند ک، بررسی تجربی و عددی واماندگی پوششهای سد حرارتی تحت بارگذاری حرارتی، بیست و هفتمین همایش سالانه بین المللی مکانیک ایران، دانشگاه تربیت مدرس و دانشگاه تهران، تهران، ایران، ۱۳۹۸.

[57] K. Torkashvand and E. Poursaeidi, "Effect of temperature and ceramic bonding on BC oxidation behavior in plasma-sprayed thermal barrier coatings," Surf. Coatings Technol., 2018.

[58] M. Bäker, J. Rösler, and G. Heinze, "A parametric study of the stress state of thermal barrier coatings Part II: Cooling stresses," Acta Mater., vol. 53, no. 2, pp. 469–476, 2005.

[59] E. A. G. Shillington and D. R. Clarke, "Spalling failure of a thermal barrier coating associated with aluminum depletion in the bond-coat," Acta Mater., vol. 47, no. 4, pp. 1297–1305, 1999.

[60] R. J. Christensen, D. M. Lipkin, D. R. Clarke, and K. Murphy, "Nondestructive evaluation of the oxidation stresses through thermal barrier coatings using Cr3+ piezospectroscopy," Appl. Phys. Lett., vol. 69, no. 24, pp. 3754–3756, 1996.

[61] C. Bargraser et al., "Life approximation of thermal barrier coatings via quantitative microstructural analysis," Mater. Sci. Eng. A, vol. 549, pp. 76–81, 2012.

[62] D. Zhu, S. R. Choi, and R. A. Miller, "Development and thermal fatigue testing of ceramic thermal barrier coatings," Surf. Coatings Technol., vol. 188, pp. 146–152, 2004.

[63] P. K. Wright and A. G. Evans, "Mechanisms governing the performance of thermal barrier coatings," Curr. Opin. Solid State Mater. Sci., vol. 4, no. 3, pp. 255–265, 1999.

[64] O. Trunova, T. Beck, R. Herzog, R. W. Steinbrech, and L. Singheiser, "Damage mechanisms and lifetime behavior of plasma sprayed thermal barrier coating systems for gas turbines—Part I: Experiments," Surf. Coatings Technol., vol. 202, no. 20, pp. 5027–5032, 2008.

[65] A. G. Evans, D. R. Mumm, J. W. Hutchinson, G. H. Meier, and
F. S. Pettit, "Mechanisms controlling the durability of thermal barrier coatings," Prog. Mater. Sci., vol. 46, no. 5, pp. 505–553, 2001.
[66] E. P. Busso, J. Lin, S. Sakurai, and M. Nakayama, "A mechanistic study of oxidation-induced degradation in a plasma-sprayed thermal barrier coating system.: Part I: model formulation," Acta Mater., vol. 49, no. 9, pp. 1515–1528, 2001.

[67] K. P. Jonnalagadda et al., "A study of damage evolution in high purity nano TBCs during thermal cycling: A fracture mechanics based modelling approach," J. Eur. Ceram. Soc., vol. 37, no. 8, pp. 2889–2899, 2017.

[68] X. N. Li, L. H. Liang, J. J. Xie, L. Chen, and Y. G. Wei, "Thickness-dependent fracture characteristics of ceramic coatings bonded on the alloy substrates," Surf. Coatings Technol., vol. 258, pp. 1039–1047, 2014.

www.SID.ir

Technol., 2018.

[96] S. T. Kyaw, I. A. Jones, and T. H. Hyde, "Simulation of failure of air plasma sprayed thermal barrier coating due to interfacial and bulk cracks using surface-based cohesive interaction and extended finite element method," J. Strain Anal. Eng. Des., vol. 51, no. 2, pp. 132–143, 2016.

[97] J. Jiang, W. Wang, X. Zhao, Y. Liu, Z. Cao, and P. Xiao, "Numerical analyses of the residual stress and top coat cracking behavior in thermal barrier coatings under cyclic thermal loading," Eng. Fract. Mech., vol. 196, pp. 191–205, 2018.

[98] J. Song, S. Li, X. Yang, D. Shi, and H. Qi, "Numerical study on the competitive cracking behavior in TC and interface for thermal barrier coatings under thermal cycle fatigue loading," Surf. Coatings Technol., vol. 358, pp. 850–857, 2019.

[99] R. Xu, X. L. Fan, W. X. Zhang, Y. Song, and T. J. Wang, "Effects of geometrical and material parameters of top and bond coats on the interfacial fracture in thermal barrier coating system," Mater. Des., vol. 47, pp. 566–574, 2013.

[100] R. Xu, X. Fan, and T. J. Wang, "Mechanisms governing the interfacial delamination of thermal barrier coating system with double ceramic layers," Appl. Surf. Sci., vol. 370, pp. 394–402, 2016.

[101] W. Zhu, L. Yang, J. W. Guo, Y. C. Zhou, and C. Lu, "Numerical study on interaction of surface cracking and interfacial delamination in thermal barrier coatings under tension," Appl. Surf. Sci., vol. 315, no. 1, pp. 292–298, 2014.

[102] X. Fan, W. Zhang, T. Wang, G. Liu, and J. Zhang, "Investigation on periodic cracking of elastic film/substrate system by the extended finite element method," Appl. Surf. Sci., vol. 257, no. 15, pp. 6718–6724, 2011.

[۱۰۳] حیدریان آ.و پورسعیدی ا، بدست آوردن مقدار چقرمگی شکست بین لایهای برای پوششهای سپر حرارتی تولید شده به روش APS، دومین کنفرانس ملی تحقیقات بین رشتهای در مهندسی کامپیوتر، برق، مکانیک و مکاترونیک، تهران، ایران، ۱۳۹۶.

[104] A. Heydarian, E. Poursaeidi, "Determination of interlayer fracture toughness for thermal barrier coatings with four point bending test and investigating the effect of ageing on its value," (under submission).

[105] C. V. Di Leo, J. Luk-Cyr, H. Liu, K. Loeffel, K. Al-Athel, and L. Anand, "A new methodology for characterizing tractionseparation relations for interfacial delamination of thermal barrier coatings," Acta Mater., vol. 71, pp. 306–318, 2014.

[106] M. Eshraghi, "Design and construction of a four point two tone bending machine and doing a laboratory test with numerical simulation," Zanjan University, 1396.

[107] Q. Zhu, W. He, J. Zhu, Y. Zhou, and L. Chen, "Investigation on interfacial fracture toughness of plasma-sprayed TBCs using a three-point bending method," Surf. Coatings Technol., vol. 353, pp. 75–83, 2018. 200, no. 5-6, pp. 1282-1286, 2005.

[83] M. Bartsch, G. Marci, K. Mull, and C. Sick, "Fatigue testing of ceramic thermal barrier coatings for gas turbine blades," Adv. Eng. Mater., vol. 1, no. 2, pp. 127–129, 1999.

[84] M. Bartsch, B. Baufeld, S. Dalkilic, L. Chernova, and M. Heinzelmann, "Fatigue cracks in a thermal barrier coating system on a superalloy in multiaxial thermomechanical testing," Int. J. Fatigue, vol. 30, no. 2, pp. 211–218, 2008.

[85] Z. B. Chen, Z. G. Wang, and S. J. Zhu, "Thermomechanical fatigue behavior of an air plasma sprayed thermal barrier coating system," Mater. Sci. Eng. A, vol. 528, no. 29–30, pp. 8396–8401, 2011.

[86] M. Bäker and J. Rösler, "Simulation of crack propagation in thermal barrier coatings with friction," Comput. Mater. Sci., vol. 52, no. 1, pp. 236–239, 2012.

[87] J. Rösler, M. Bäker, and M. Volgmann, "Stress state and failure mechanisms of thermal barrier coatings: role of creep in thermally grown oxide," Acta Mater., vol. 49, no. 18, pp. 3659–3670, 2001.

[88] K. P. Jonnalagadda, R. Eriksson, X.-H. Li, and R. L. Peng, "Fatigue life prediction of thermal barrier coatings using a simplified crack growth model," J. Eur. Ceram. Soc., vol. 39, no. 5, pp. 1869–1876, 2019.

[89] S. Sjöström and H. Brodin, "Thermomechanical fatigue life of TBCs-experimental and modelling aspects," in 34th International Conference on Advanced Ceramics and Composites, Daytona Beach, USA, 24th-29th January, 2010, 2010, vol. 31, pp. 23–39.

[90] H. Brodin, R. Eriksson, S. Johansson, and S. Sjöström, "Fracture mechanical modelling of a plasma sprayed TBC system," in 33rd International Conference on Advanced Ceramics and Composites, Daytona Beach, FL, USA, January 18-23, 2009, 2009, vol. 30, no. 3, pp. 113–124.

[91] J. Aktaa, K. Sfar, and D. Munz, "Assessment of TBC systems failure mechanisms using a fracture mechanics approach," Acta Mater., vol. 53, no. 16, pp. 4399–4413, 2005.

[92] L. Wang et al., "Influence of cracks in APS-TBCs on stress around TGO during thermal cycling: A numerical simulation study," Surf. Coatings Technol., vol. 285, pp. 98–112, 2016.

[93] T. S. Hille, a. S. J. Suiker, and S. Turteltaub, "Microcrack nucleation in thermal barrier coating systems," Eng. Fract. Mech., vol. 76, no. 6, pp. 813–825, 2009.

[94] M. Mohammadi, and E. Poursaeidi, "Finite Element Analysis of the Effect of Thermal Cycles and Ageing on the Interface Delamination of Plasma Sprayed Thermal Barrier Coatings," Surf. Coatings Technol, (under rivision).

[95] J. Song, S. Li, X. Yang, H. Qi, and D. Shi, "Numerical investigation on the cracking behaviors of thermal barrier coating system under different thermal cycle loading waveforms," Surf. Coatings