

مروری بر مکانیزم‌های واماندگی و شبیه‌سازی المان محدود پوشش‌های سد حرارتی پلازما اسپری

مریم محمدی^۱، اسماعیل پورسعیدی^{۲*}

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

۲ استاد گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران



چکیده

درک مسائل واماندگی پوشش‌های سد حرارتی در ارزیابی قابلیت و دوام آن‌ها بسیار ضروری است. از این پوشش‌ها در شرایط کاری دمای بالا و گرادیان‌های شدید حرارتی استفاده می‌شود. در این مقاله، مروری بر مکانیزم‌های واماندگی پوشش‌های سد حرارتی پلازما 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 عمل‌کرد آن‌ها وجود دارد، این روش‌ها نمی‌توانند شرایط واقعی TBC را به‌خوبی منعکس کنند. از این رو مدل‌سازی المان محدود، نقش مهمی در مطالعه‌ی این مسائل داشته و انتظار می‌رود که با استفاده از این روش‌ها الگوهای واماندگی TBC تحت شرایط واقعی تعیین شود. همچنین این مقاله روش‌های کاربردی و جدید مدل‌سازی المان محدود را جهت شبیه‌سازی مکانیزم‌های واماندگی پوشش‌های سد حرارتی، تحت بارهای حرارتی و مکانیکی بررسی کرده است. از جمله‌ی این روش‌ها می‌توان به روش‌های مجازی بازشدگی ترک، المان محدود توسعه‌یافته و مدل ناحیه چسبنده اشاره کرد. ضمناً، مقایسه‌ای بین روش‌های المان محدود ذکر شده و مزایا و محدودیت‌های آن‌ها، در مسائل واماندگی پوشش‌ها صورت گرفته است.

تاریخ دریافت:

۹۷/۱۱/۲۷

تاریخ پذیرش:

۹۸/۰۱/۳۰

پوشش سد حرارتی، واماندگی، بارگذاری حرارتی و مکانیکی،

روش المان محدود

واژگان کلیدی

۱- مقدمه

کاربرد پوشش‌های سد حرارتی (TBC) در محیط‌های دمای بالا، مانند موتورهای هواپیما و توربین‌های صنعتی و نیروگاهی روز به روز افزایش می‌یابد. پره‌های توربین شرایط بسیار پیچیده‌ای را در توربین تحمل می‌کنند. این پره‌ها در معرض دماهای بسیار بالا و تنش‌های بسیار زیاد قرار دارند. تمامی این عوامل موجب واماندگی پره و در نتیجه 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 می‌شود [۲]. اجزای سیستم TBC باید محیط‌های دمای بالا، گرادیان شدید حرارتی و شرایط پیچیده‌ی تنش 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 لایه بر روی بستر تشکیل شده عبارت‌اند از: لایه‌ی سرامیکی فوقانی (TC)، لایه‌ی فلزی رابط (BC) و لایه‌ی نازک اکسید حرارتی رشدافته (TGO). BC عموماً ترکیبی از $MCrAlY$ است که M می‌تواند Ni یا Co یا هر دوی آن‌ها باشد. TC معمولاً از ۶ تا ۸ درصد وزنی ایتربای پایدار شده با زیرکونیا (YSZ) تشکیل می‌شود و لایه‌ی TGO غالباً Al_2O_3 است [۳].

مسائل واماندگی TBC در دمای بالا مسأله‌ی مهمی به شمار می‌رود و محققان بسیاری به آن پرداخته‌اند. دلیل این امر وجود عوامل متعددی است که بر مودهای شکست آن‌ها اثر می‌گذارند. در همی این موارد، دلایل به دو دسته‌ی داخلی و خارجی تقسیم می‌شوند. دلایل داخلی به ریزساختار پوشش در زمان اعمال آن، ساختار لایه‌ای، ترک‌ها و حفره‌ها 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 می‌دهد [۴].

مطالعه بر روی عملکرد TBC با کارکرد مناسب به صورت آزمایشگاهی به دلیل شرایط کاری، بسیار پیچیده است. بنابراین شبیه‌سازی‌های محاسباتی کمک بزرگی به بهبود روش‌های ساخت و مطالعه بر ساختار پوشش‌ها در شرایط آزمایشگاهی می‌کنند. همچنین روش‌های محاسباتی، زمان و هزینه‌ی تحقیقات کمتری نسبت به روش‌های 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 محاسبه‌ی توزیع دما و تنش در TBC‌ها است [۶-۱۰]. توزیع تنش پسماند در TBC‌ها بسیار مهم بوده و حالت‌های شکست و عمر آن‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد. 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 کارکرد آن‌ها تحت بارگذاری‌های مختلف حرارتی ایجاد می‌شود. زمانی که سیستم TBC از دماهای بالا تا دمای اتاق خنک می‌شود تنش‌های پسماند پیچیده‌ای به علت عدم تطابق ضریب انبساط حرارتی و پارامترهای الاستیک در آن ایجاد می‌شود [۱۹ و ۲۰]. ارزیابی توزیع تنش در سیستم پوشش سد حرارتی به علت رشد نامنظم لایه‌ی TGO در دماهای بالا بسیار پیچیده است. همچنین تنش در سیستم TBC تحت تأثیر مورفولوژی سطح مشترک TC و BC قرار دارد. زمانی که سطح مشترک به صورت یک سطح صاف باشد تنش‌ها در جهت عمودی صفر هستند اما سطح مشترک واقعی بسیار پیچیده است. از آن جایی که فرآیند پوشش‌دهی یکنواخت نبوده و سطح مشترک نامنظم است، تنش‌ها 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 [۲۱-۲۵].

در سال‌های اخیر مطالعه‌ی توزیع تنش و مکانیزم‌های واماندگی پوشش سد حرارتی توسط مدل‌های المان محدود یکی از موضوعاتی است که محققان زیادی به آن پرداخته‌اند. در این مدل‌ها عمدتاً به بررسی توزیع تنش [۲۱ و ۲۶ و ۲۷] رفتار شکست این پوشش‌ها در سطوح مشترک BC و TC، TGO و TGO [۲۸ و ۲۹] تحت انواع بارگذاری‌های حرارتی [۲۲] و مکانیکی [۳۰] پرداخته شده است. نتایج این تحقیقات نشان می‌دهد که حالت تنش و شکست این پوشش‌ها وابستگی زیادی به نرخ بارگذاری ایجاد شده توسط رشد لایه‌ی اکسید و نرخ برابرداری به علت آزادسازی تنش توسط خزش بستگی دارد [۳۱]. این لایه‌ی اکسید حاصل اکسایش BC است که با گذشت عمر پوشش، ضخامت آن بیشتر می‌شود و بنابراین یکی از مهم‌ترین عوامل دخیل در عمر پوشش‌ها می‌باشد [۳۲].

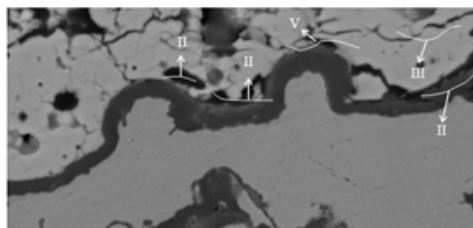
در مدل‌های المان محدودی که برای مطالعه‌ی تنش و شکست پوشش‌ها مورد استفاده قرار گرفته است عموماً از سه راه برای توصیف مورفولوژی سطح مشترک استفاده شده است. راه اول در نظر گرفتن سطح مشترک به صورت ساده مانند منحنی‌های سینوسی یا کسینوسی و دایره‌ای یا نیم‌دایره‌ای است [۲۱ و ۳۳-۳۷] که به بحث در خصوص برخی پارامترهای این منحنی‌ها نیز می‌پردازد. راه دوم که بهبودیافته‌ی راه اول است، توصیف سطح مشترک با منحنی‌های پیچیده‌ی سینوسی یا کسینوسی است که دامنه‌ی آن‌ها به تدریج افزایش می‌یابد [۳۸]. راه سوم استفاده از پارامترهای اندازه‌گیری شده از پوشش واقعی است [۳۹-۴۱] اما برخی ساده‌سازی‌هایی نیز در شرایط مرزی همانند مدل‌های گروه اول در این‌ها نیز دیده می‌شود.

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

پایین تری نسبت به BC دارد. همچنین مدول الاستیسیته‌ی TGO نسبت به TC بسیار بزرگتر است. از سوی دیگر به علت طبیعت نوسانات شدید سطح مشترک فلز و سرامیک، تنش‌های خارج از صفحه‌ای در مجاورت سطح مشترک TGO و TC ایجاد می‌شود به طوری که کشش در قله و فشار در دره وجود خواهد داشت. تنش کششی موجب ایجاد شکست در سطح مشترک TGO و TC در قله (مکانیزم II) [۵۱] و ترک خوردگی در TC در مجاورت قله (مکانیزم III) [۵۲ و ۵۳] می‌شود. با ضخیم شدن TGO، این لایه بخش کوچکی از BC را فرا می‌گیرد. بنابراین تنش‌های حرارتی ناشی از CTE بین BC و TGO به صورت موضعی در برخی نقاط بر تنش‌های حرارتی ناشی از CTE بین BC و TC غالب می‌شود. در ضخامت خاصی از TGO ضریب انبساط حرارتی ترکیبی BC و TGO کمتر از تک لایه‌های BC و TC شده که موجب تغییر تنش‌های TC از فشار به کشش می‌شود. این عکس شدن تنش موجب ترک خوردگی در TC در دره نزدیک قله می‌شود (مکانیزم IV) [۵۴].

علاوه بر مکانیزم‌های فوق پورسعیدی و همکاران دریافتند که در TBC تحت بار پیر گرمایی و سیکلی مکانیزم II می‌تواند به گونه‌ای گسترش یابد که ترک به داخل TC نفوذ کند. این مکانیزم در اینجا مکانیزم V نام گذاری می‌شود. 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 می‌شود مکانیزم‌های مشاهده شده توسط آن‌ها مکانیزم‌های II، III و V است.

محققان در طول دهه‌های اخیر پژوهش‌های متعددی در خصوص بررسی مکانیزم‌های ترک خوردگی TBC تحت بارهای حرارتی انجام داده‌اند. به عنوان مثال ربیعی و ایونس [۵۳] دریافتند که در TBC مدت زمان 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 می‌شود. در حالی که با افزایش نمونه‌ای از این شکست مشاهده می‌شود. در حالی که با افزایش ماندگاری سیستم در دمای بالا (۱۰۱۰ °C)، ضخامت TGO به بیشتر از ۵ میکرون رسیده و ترک‌های ایجاد شده در اطراف نقص‌های سطح مشترک، تا نزدیکی سطح مشترک توسعه می‌یابند. انتشار این ترک‌ها از TC 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 [۵۴ و ۵۶]

ترک می‌شود، روش‌های محاسباتی جدیدی به وجود 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 FEM محاسبه نمود. مسیر انتشار ترک را می‌توان با استفاده از سایر روش‌ها مانند روش بسته شدن مجازی ترک (VCCT)، روش المان محدود توسعه یافته (XFEM) و مدل ناحیه چسبنده (CZM) شبیه‌سازی کرد [۲۵ و ۴۲-۴۵].

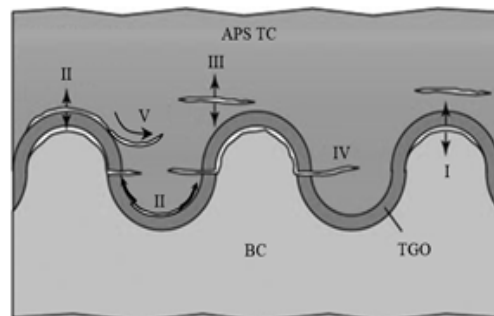
هدف از ارائه‌ی این مطالعه‌ی مروری، بررسی مکانیزم‌های واماندگی TBC تحت بارگذاری‌های حرارتی و مکانیکی و روش‌های مدل‌سازی آن‌ها با استفاده از FEM، مزایا و محدودیت‌ها، فرضیات و ساده‌سازی‌های به کار رفته در مدل‌ها است. با توسعه‌ی روش‌های FEM، مسائل پیچیده را می‌توان مورد مطالعه و ارزیابی قرار داد.

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 [۴۶ و ۴۷]. در طول خنک کاری عدم تطابق ضرایب انبساط حرارتی بین TGO و BC منجر به تنش‌های پسماند حرارتی بسیار بزرگ در TGO شده که به بیشترین مقدار خود در دمای محیط می‌رسد [۴۸ و ۴۹].

چهار مکانیزم واماندگی در TBC پلاسما اسپری، که به علت تنش‌های خارج از صفحه ایجاد می‌شود، 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 می‌شود (مکانیزم I) [۵۰]. عدم تطابق ضریب انبساط حرارتی بین TC و BC و TC و بستر، TC را تحت فشار زیادی در دمای محیط قرار می‌دهد. با این وجود بزرگی تنش‌های ناشی از CTE در TC کمتر از تنش‌های پسماند در TGO است، چرا که تخلخل و ترک‌ها در TC در مقایسه با TGO بسیار پیچیده‌تر بوده و CTE، TC،



شکل ۱: مکانیزم‌های ترک خوردگی در APS TBC [۵۴ و ۵۵]

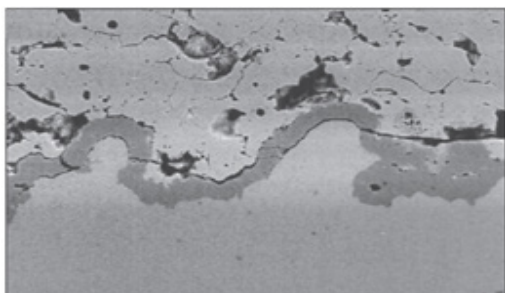
مشترک BC و TGO در قله‌ی زبری BC اتفاق می‌افتد. اصلی‌ترین مود و اماندگی در سطح مشترک BC و TGO، ایجاد ترک در TC و رسیدن این ترک‌ها بهم با شکست TGO اتفاق می‌افتد (مکانیزم II). بارگراسر و همکارانش [۶۱] ویژگی‌های ریزساختار TBCها را بر اساس سیکل حرارتی در 1100°C ، در جهت افزایش طول عمر مورد آزمایش قرار دادند. طبق مشاهدات آن‌ها شکست در نتیجه‌ی کنده شدن کل TC اتفاق می‌افتاد که همان مود شکست عمومی TBCها است [۵۲ و ۵۳-۶۲-۶۶].

جونالاگادا و همکارانش [۶۷] در پژوهش‌های خود علاوه بر گزارش نتایج مشابه در خصوص مکانیزم‌های مختلف و اماندگی 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 TC در نزدیکی قله‌ی سطح مشترک BC 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 محتمل‌تر است (ترکیب مکانیزم III و II نشان داده شده در شکل ۱).

همان‌طور که ملاحظه می‌شود مکانیزم‌های و اماندگی TBCها تحت بارهای حرارتی در شکل ۱ خلاصه می‌شود. انتشار ترک بین لایه‌ای مکانیزم غالبی است که در TBCهای تحت بار حرارتی مشاهده می‌شود با توجه به پیچیدگی این نوع از ترک‌ها نیاز به توسعه‌ی ابزارهای محاسباتی و مدل‌هایی دقیق بر پایه‌ی مشاهدات تجربی احساس می‌شود.

۲-۲- مکانیزم‌های شکست تحت بارهای مکانیکی

با وجود اینکه تنش‌های حرارتی علت اصلی و اماندگی 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 ماکروسختی‌سنجی پرداخته‌اند. نتایج پژوهش‌ها نشان داد که برای پوشش TBC پلاسما



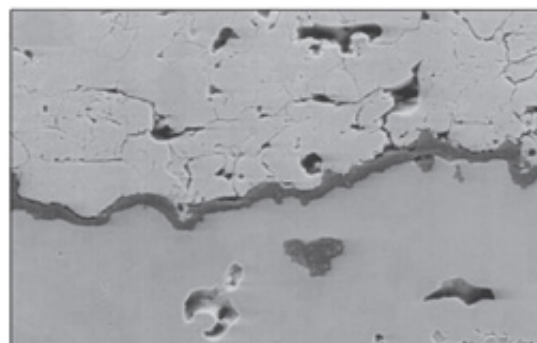
شکل ۴: الگوی ترک خوردگی با $5/5$ میکرون TGO، ترک‌ها در نزدیکی عیوب در TGO نفوذ می‌کنند [۵۳].

گسترش می‌یابند. 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 می‌کند. در شکل ۴ این حالت از شکست مشاهده می‌شود.

پورسعیدی و همکاران در پژوهش‌های خود [۵۴]، [۵۷] تأثیر ضخامت TGO بر مکانیزم شکست TBC و همچنین 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 می‌کند و نیز مکانیزم شکست مورد ارزیابی آن‌ها به صورت مکانیزم جدید V می‌باشد. همچنین در این پژوهش آن‌ها 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 می‌شود. این مقاومت برای TGO با ضخامت $3/5$ میکرون به کمترین مقدار رسیده و سپس مجدداً افزایش می‌یابد. 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 $3/5$ میکرون را می‌توان غالب شدن اثر تنش‌های ناشی از TGO دانست، و علت صعودی شدن مقاومت در برابر شوک از ضخامت $3/5$ به بالا را باید در وجود میکروتورک‌های ایجاد شده بر اثر اعمال پیرگرمایی در نتیجه‌ی آزادسازی تنش‌ها جستجو کرد.

علاوه بر مطالعات فوق پژوهش‌های متعددی در خصوص و اماندگی 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 پیزوآسپکتراسکوپ [۴۹ و ۵۹]، [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 1 GPa در TGO وجود دارد و عمر میانگین TBCها را تعیین کرده‌اند. ترک خوردگی در سطح



شکل ۳: الگوی ترک خوردگی با 3 میکرون TGO، جدایش به صورت مجزا در سطح مشترک دیده می‌شود [۵۳].

مشترک TC و BC، تغییر مسیر می‌دهد. (۳) جدایش بین لایه‌ای در هر دو سطح مشترک به‌طور هم‌زمان مشاهده می‌شود. نتایج پژوهش ژنگ و همکارانش [۷۸] نشان داد که در دمای محیط برای TBC که TC 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 می‌دهد. علت این اتفاق این است که روش HVOF نسبت به APS استحکام چسبندگی بیشتری دارد. در حالی که برای TBC که هر دو لایه‌ی 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 می‌دهد که این مکانیزم‌های شکست به ترتیب در شکل ۵ و شکل ۶ الف و ب نشان داده شده است [۷۲].

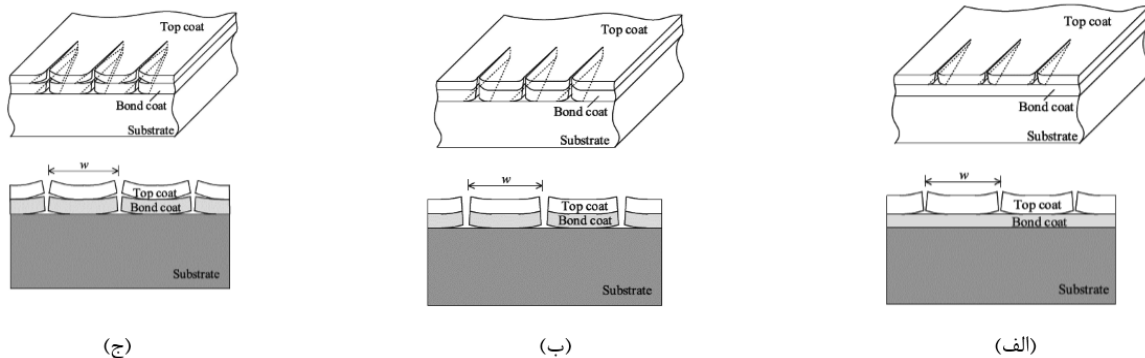
نتیجه‌ی پژوهش لای و همکارانش [۷۰] نشان داد که علاوه بر دو مود شکست ذکر شده، ترک می‌تواند در هر دو سطح مشترک ایجاد و رشد کند. آن‌ها با استفاده از تحلیل عددی حالت‌هایی را که ممکن است این‌گونه مکانیزم را ایجاد کند، برای نسبت‌های مختلف چقرمگی‌های شکست لایه‌ها، ارزیابی کرده‌اند که در بخش بررسی‌های عددی به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

اسپری مورد مطالعه‌ی آن‌ها، در BC با اعمال نیروی ۲ KgF تست میکروسختی‌سنجی ترک ایجاد نمی‌شود. همچنین در این لایه استفاده از تست ماکروسختی‌سنجی، به‌علت بزرگتر بودن عرض فرورونده از ضخامت BC، صحیح نمی‌باشد.

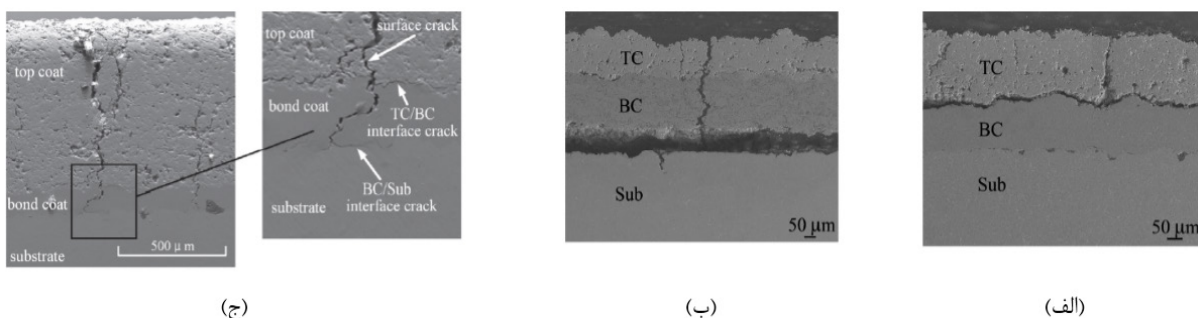
از آنجاییکه برای بررسی مکانیزم‌های شکست تحت بارهای مکانیکی بیشتر بر خواص لایه‌های پوشش تأکید می‌شود، ممکن است این مطالعات قبل از قرارگیری پوشش تحت بار حرارتی انجام شود که در این صورت لایه‌ی TGO در آن‌ها در نظر گرفته نمی‌شود. در ادامه به بررسی مکانیزم‌های شکست تحت بارهای مکانیکی پرداخته خواهد شد.

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. همان‌طور 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 BC تغییر مسیر داده و تا جدایش کامل TC انتشار می‌یابد. (۲) ترک سطحی به BC نفوذ کرده و سپس به سطح مشترک BC و بستر بدون جدایش سطح



شکل ۵: شماتیک نشان دهنده‌ی مدهای واماندگی برای TBCهای ترک خورده با ترک‌های عمودی متراکم: (الف) مود واماندگی I، (ب) مود واماندگی II و (ج) مود واماندگی III [۷۰].

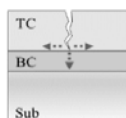


شکل ۶: مدهای شکست TBC با ترک اولیه‌ی سطحی و انتشار آن در مسیر جدایش سطح مشترک: (الف) BC و بستر [۷۲]، (ب) سطح مشترک TC و BC [۷۲]، (پ) هر دو سطح مشترک [۷۰].

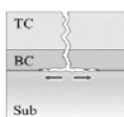
۲-۲-۲- مکانیزم‌های شکست تحت بار خمشی

مانند مسائل ترک در TBC تحت کشش، در TBC تحت بار خمشی، از جمله خمش سه‌نقطه‌ای، مسیر انتشار ترک مستقیماً مود شکست را تعیین می‌کند. شکل ۷ مسیرهای احتمالی رشد ترک را نشان می‌دهد. دو مود متمایز از واماندگی عبارت‌اند از: (۱) ترک‌ها از سطح پوشش ایجاد شده و در نهایت شکست در سطح مشترک TC و BC اتفاق می‌افتد و (۲) ترک‌ها در سطح مشترک BC و بستر منتشر شده و در

نهایت جدایش از این سطح مشترک به‌وقوع می‌پیوندد. ژیانگ و همکارانش [۷۳] در پژوهش خود دریافتند که نسبت مدول الاستیسیته و ضخامت لایه‌ها، پارامترهای اصلی کنترل‌کننده 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 می‌شود و زمانی که ضخامت TC کم و مدول BC افزایش یابد موقعیت جدایش تغییر کرده و پوشش از سطح مشترک

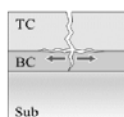


(الف) مسیرهای احتمالی رشد ترک، تغییر مسیر یا نفوذ



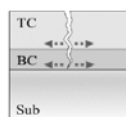
(د) جدایش از سطح مشترک TC و BC

بستر



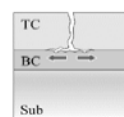
(د) جدایش از سطح مشترک TC و BC

BC



(ج) مسیرهای احتمالی ترک‌های سطح مشترک

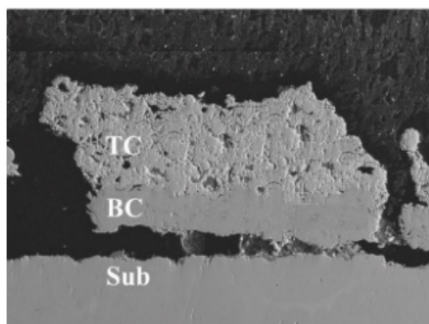
مشترک



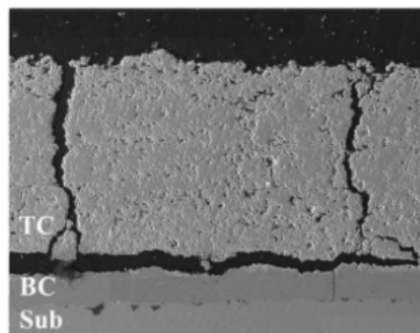
(ب) جدایش از سطح مشترک TC و BC

BC

شکل ۷: شماتیک نشان دهنده‌ی مسیرهای انتشار ترک [۷۳]

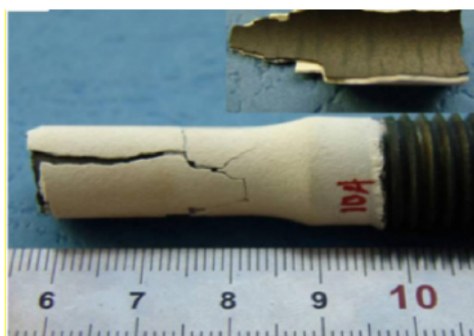


(ب)

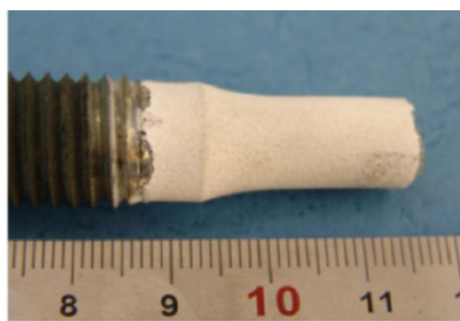


(الف)

شکل ۸: تصاویر SEM نشان دهنده‌ی مدهای متفاوت شکست به‌واسطه‌ی ضخامت‌های مختلف TC: (الف) جدایش از سطح مشترک TC و BC اتفاق می‌افتد، TC ۶۰۰ میکرون می‌باشد، (ب) جدایش از سطح مشترک BC و بستر اتفاق می‌افتد، TC ۳۰۰ میکرون می‌باشد [۷۳].



(ب)



(الف)

شکل ۹: تصویر نمونه‌های تخریب شده در (الف) IP TMF و (ب) OP TMF [۸۵]

سطح مشترک بین لایه‌ها و ترک خوردگی، در دو شرایط فازی متفاوت هستند. تحت شرایط IP، نمونه‌ها در طول خود بدون جدایش وامانده می‌شوند در حالی که در تست‌های OP، پوشش به‌واسطه‌ی تنش‌های بزرگتر پیرامونی ترک خورده و کنده می‌شود. شکل ۹ تصویر نمونه‌ی وامانده را نشان می‌دهد. شکل ۱۰ (الف) و (ب) به‌ترتیب فرکتوگراف نمونه‌ی وامانده شده تحت شرایط IP TMF و OP را نشان می‌دهد. روش‌های دیگر مورد استفاده برای ارزیابی عمر TBC خستگی سیکل پایین (LCF) و خستگی سیکل بالا (HCF) است. جنیسترنده و همکارانش [۴۴] مکانیزم‌های واماندگی TBCها را با استفاده از مدل‌سازی المان محدود و فرکتوگرافی مطالعه کرده‌اند.

نتایج هر دو روش نشان داد که افزایش ضخامت TGO عمر LCF نمونه‌های پوشش داده شده را کاهش می‌دهد. ترک‌های خستگی در TBC هم از سطح مشترک TC و BC یا از BC ایجاد می‌شوند. بررسی‌های آن‌ها نشان داد که ترک‌ها در لایه‌ی TGO، بالای BC شکل گرفته و جهتشان به سمت BC تغییر می‌کند. زیرا تنش‌های بزرگ محوری در سطح مشترک ماده وجود دارند. شکل ۱۱ نمایی از این نوع ترک‌ها را نشان می‌دهد.

۳- بررسی روش‌های مدل‌سازی مکانیزم‌های واماندگی

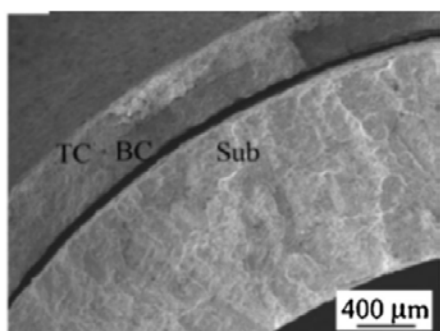
روش‌های زیادی برای شبیه‌سازی رشد ترک مورد استفاده شده‌اند. در گذشته از روش‌های مکانیک شکست کلاسیک استفاده می‌شد که روش‌هایی استاتیکی بوده و نحوه‌ی انتشار ترک را پیش‌بینی نمی‌کنند. روش VCCT، روش XFEM و CZM سه روش مهم بوده که در

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

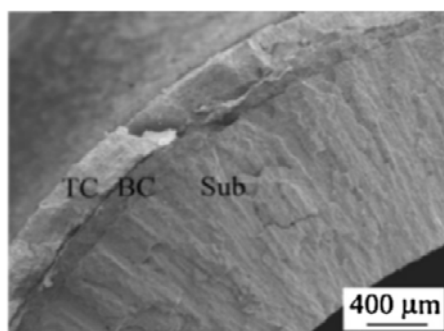
۲-۳- مکانیزم‌های شکست تحت بارهای حرارتی- مکانیکی

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 [۷۴]. برخی محدودیت‌ها در تست‌های TMF مانند روش‌های مناسب گرم کردن و خنک کاری مناسب در سیستم پوشش و نیاز به پایایی سرویس مانند گرادیان دمایی در ضخامت سیستم TBC وجود دارد [۷۵ و ۷۶]. بنابراین کارهای مطالعاتی نسبتاً محدود در مورد تست‌های TMF در سیستم TBC انجام شده است [۷۵-۸۴]. انواع تجهیزات متفاوت گرم کردن در تست‌های TMF عبارت‌اند از: کوره‌های تشعشعی، کوره‌های لامپ‌دار و گرم کردن مستقیم/غیرمستقیم القایی.

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



(ب)



(الف)

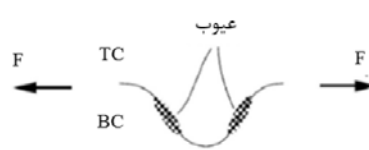
شکل ۱۰: فرکتوگراف نمونه‌ی وامانده شده در (الف) IP TMF و (ب) OP TMF [۸۵]



(ج)



(ب)



(الف)

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

چند دهه‌ی اخیر توسعه یافته‌اند.

VCCT ابتدا برای محاسبه‌ی نرخ آزادسازی انرژی (یا J انتگرال) برای جسم ترک‌دار توسعه داده شد. سپس به‌طور گسترده در مدل‌سازی رشد ترک سطح مشترک در کامپوزیت‌های لایه‌ای استفاده شد. به‌طور کلی، مدل‌سازی‌های رشد ترک بر اساس VCCT فرضیات زیر را در نظر می‌گیرند: (۱) انتشار ترک عموماً در طول مسیر از پیش تعریف شده اتفاق می‌افتد، (۲) ماده‌ی مدل، الاستیک خطی بوده و خواص پلاستیک در شبیه‌سازی در نظر گرفته نمی‌شوند، (۳) تحلیل شبه‌استاتیک بوده و اثرات گذرا را در نظر نمی‌گیرد. معیار شکست بر اساس نرخ آزادسازی انرژی (J انتگرال) است که با استفاده از VCCT محاسبه می‌شود [۴].

XFEM یک روش محاسباتی جدید نیز، اخیراً با توسعه‌ی 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 می‌کند در حالی که این نواحی به مش بسیار ریز احتیاج دارند. مدل‌سازی به مش‌بندی مجدد به هنگام انتشار ترک ندارد. هر مسیر رشد با استفاده از XFEM قابل شبیه‌سازی است. جدایش بین لایه‌ای توسط روش‌های مکانیک شکست سنتی مانند تکنیک جدایش‌گره‌ای مدل می‌شود. به جای استفاده از این روش‌ها می‌توان از روش‌هایی 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 می‌شود. از CZM برای شبیه‌سازی 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 می‌گیرد. مقایسه‌ای از روش‌های فوق در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱: مقایسه‌ی بین VCCT، XFEM و CZM

روش محاسباتی	مزایا	معایب
VCCT	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 که ترک را می‌بندد.	یک ترک اولیه باید برای انتشار یافتن قبل از شبیه‌سازی تعریف شود. مسیر انتشار ترک باید در فرآیند شبیه‌سازی تعیین شود. خواص پلاستیک در نظر گرفته نمی‌شود. تحلیل شبه استاتیک بوده و اثرات گذرا را در نظر نمی‌گیرد.
XFEM	خیزای به تعریف ترک اولیه ندارد. می‌تواند مسائل انتشار ترک را با خصوصیات ناپیوستگی حل کند. خیزا به تعیین مسیر انتشار ترک‌ها نمی‌باشد، به جزئیات داخلی ساختار هندسی وابسته نبوده و تنها به شکل خارجی ساختار جسم وابسته می‌باشد. زمانی که ترک به اندازه‌ی مشخصی منتشر می‌شود خیزای به مش‌بندی مجدد نمی‌باشد. مسیر انتشار ترک را دنبال می‌کند.	- این روش برای مدل‌سازی مسائل شکست بین لایه‌ای مناسب نیست. برای مدل‌سازی و اماندگی ترک‌هایی که همزمان جوامه می‌زنند مناسب نیست. پارامترهای زیادی باید وارد شود. هزینه‌ی محاسباتی زیاد است.
CZM	- خیزای به مش‌بندی مجدد در طول فرآیند شبیه‌سازی نمی‌باشد.	

[۸۷] مکانیزم‌های متفاوت ایجاد ترک در حالتی که نرخ بارگذاری توسط رشد TGO نسبت به نرخ آزادسازی خزشی TC و BC 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 می‌شود. 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 می‌تواند در حالت واقعی از دره نیز ایجاد شده و به سمت قله‌ها رشد کند. رنجبرفر و همکارانش با مطالعه‌ی توزیع تنش در پوشش امکان‌پذیر و جوانه‌زنی و رشد ترک در پوشش را ارزیابی کرده‌اند. آن‌ها در مرجع [۲۸] حالت II و در مرجع [۲۹] حالت I از شکل ۱ را بررسی کرده‌اند. آن‌ها در شبیه‌سازی‌های خود در مرجع [۲۹] با مدل‌سازی متخلخل TC دریافتند که ترک می‌تواند از سطح مشترک TC و TGO به درون TC نیز نفوذ کند.

جونولاگادا و همکارانش [۸۸و۶۷] در شبیه‌سازی‌های خود به منظور مشخص کردن موقعیت جوانه‌زنی و نحوه‌ی انتشار ترک و همچنین تعیین طول عمر پوشش تحت بار حرارتی سیکیلی از روش مکانیک شکست [۸۹-۹۱] استفاده کرده‌اند. مدل استفاده شده توسط این پژوهشگران و سایر محققین برای اکثر روش‌های 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. آن‌ها با در نظر گرفتن مسیریهای متعدد برای انتشار ترک، با استفاده از چندین مدل، ضریب شدت تنش را برای طول‌های مختلف ترک در مدل‌ها را به دست آورده و با ارزیابی این ضرایب مسیر صحیح گسترش ترک را تعیین کرده‌اند.

همان‌طور که بیان شد در بسیاری از مدل‌های ارائه شده در شبیه‌سازی‌های انجام شده با استفاده از روش‌های کلاسیک نیاز به قرار دادن ترک اولیه بوده و انتشار ترک توسط رسیدن ماده به تنش بحرانی یا انرژی بحرانی کنترل می‌شود. در این شبیه‌سازی‌ها عموماً بعد از یک مرحله رشد ترک نیاز به مش‌بندی مجدد هست که به دشواری‌های حل می‌افزاید. در روش‌های توسعه یافته‌ی نوین انتشار ترک با معیارهای دیگری کنترل شده و ضمناً نیازی به مش‌بندی مجدد با هر مرحله رشد ترک وجود ندارد.

۴- بررسی شبیه‌سازی مکانیزم‌های واماندگی TBC پلازما اسپری با استفاده از FEM.

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

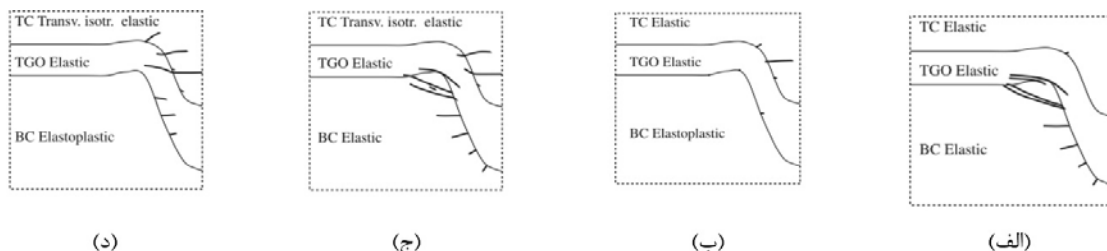
از آنجا که بسیاری از خواص لایه‌های پوشش به‌طور دقیق در بازه‌ی دمایی عملکرد آن مشخص نیست، روش المان محدود این امکان را فراهم می‌کند که با تغییر پارامترهای شکست و خواص مواد به ارزیابی درستی از خواص دست یافته و همچنین تأثیر این پارامترها بر مکانیزم‌های شکست را مورد بحث و بررسی قرار داد. در بسیاری از پژوهش‌های 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 می‌شود، تعیین پارامترهای شکست است. در قسمت سوم این بخش نیز به بررسی کاربردهای المان محدود در تعیین خواص شکست پرداخته خواهد شد.

۴-۱- شبیه‌سازی مکانیزم‌های شکست TBC تحت بار حرارتی

۴-۱-۱- روش مکانیک شکست کلاسیک در شبیه‌سازی مکانیزم‌های 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 TC در مراجع [۳۱] و [۸۶] و [۲۹] و [۲۸] و [۸۷] و جدایش از سطح مشترک TGO و BC در مراجع [۲۹] 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



شکل ۱۲: الگوهای ترک خوردگی در نزدیکی لایه‌ی TGO: (الف) TC، TGO و BC الاستیک، (ب) TC و TGO الاستیک و BC الاستوپلاستیک، (ج) TC الاستیک ایزوتروپیک تقاطعی و BC و TGO الاستیک، (د) TC الاستیک ایزوتروپیک تقاطعی، TGO الاستیک و BC الاستوپلاستیک [۹۳].

۴-۱-۲- روش‌های توسعه‌یافته‌ی نوین در شبیه‌سازی مکانیزم‌های شکست

پژوهشگران در مطالعات متعددی شرایط و مکانیزم‌های شکست TBC را با استفاده از روش‌های XFEM و CZM به صورت مجزا [۲۶ و ۳۰-۹۲] 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 استفاده از شرط مرزی تقارن، مکانیزم‌های شکست را توسط CZM مطالعه کرده‌اند. شکست در این مطالعات مانند حالت II شکل ۱ است. البته بارگذاری در مرجع [۳۰] به صورت 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 می‌شود. ابراهیمی و نخودچی در مطالعه‌ی خود دریافتند که رشد جدایش بین لایه‌های با ادامه‌ی روند سیکل‌های حرارتی در مقایسه با جوانه‌زنی ترک‌های جدید، مکانیزم و اماندگی در پوشش را رقم خواهد زد. همچنین آن‌ها با استفاده از این شبیه‌سازی و انطباق سیکل‌های و اماندگی با تست‌های انجام‌شده‌ی خودشان توانستند پارامترهای CZM را برای پوشش مورد استفاده به دست آورند.

ونگ و همکارانش [۹۲] با استفاده از XFEM رفتار انتشار ترک را در TBC ارزیابی کرده و مکانیزم‌های شکست به وجود 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 کششی را در موقعیت‌های مختلف ترک‌های عمودی و افقی مورد بحث قرار داده‌اند. در واقع آن‌ها موقعیت‌های مختلف ترک حالت III از شکل ۱ را بر ترک بین لایه‌های TC و TGO بررسی کرده‌اند. نتایج آن‌ها نشان داد که موقعیت و حالت ترک تأثیر زیادی بر مسیر رشد آن و نحوه‌ی ایجاد و رشد ترک بین لایه‌ای دارد.

هیل و همکارانش [۹۳] امکان جوانه‌زنی ترک را در TBC تحت فرآیند خنک‌کاری 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. همان‌طور که ملاحظه می‌شود مکان‌های جوانه‌زنی ترک ارائه شده در مطالعه‌ی [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 نمی‌افتد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود المان محدود این امکان را فراهم می‌سازد تا با متفاوت در نظر گرفتن خواص لایه‌های پوشش به ارزیابی صحیحی از خواص پوشش دست یافت.

سانگ و همکارانش [۹۵ و ۹۸]، 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 بین لایه‌ها توسط XFEM و جدایش بین لایه‌های TGO و BC یا 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 می‌شود چرا که TGO رشدی ندارد. اما در بارگذاری ذوزنقه‌ای چون سیستم در دمای بالا ماندگاری دارد TGO و نیز آسیب بین لایه‌ای رشد یافته و موقعیت ماکزیمم تنش از نزدیکی قله به نزدیکی دره منتقل می‌شود. مکانیزم شکست TBC تحت بار مثلثی مشابه حالت II شکل ۱ بوده، با این تفاوت که ترک تنها در قله جوانه زده و به درون TC نفوذ می‌کند. در حالی که در بار ذوزنقه‌ای ترک در قله جوانه زده و در راستای سطح مشترک TC و TGO منتشر می‌شود. 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 نمی‌کند اما زبر شدن سطح بین لایه‌ها عمر TBC ها را کاهش می‌دهد.

نتیجه‌ی 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 XFEM در یک ناحیه، امکان ایجاد ترک جدید در آن ناحیه وجود ندارد بنابراین به هنگام رشد یک ترک در TC ترک جدید در آن به وجود نمی‌آید. اما بعد از حصول شکست کامل در ناحیه‌ای که ترک اولیه رشد کرده، ترک‌هایی در دامنه‌ی سطح مشترک ایجاد شده و مکانیزم IV شکل ۱ اتفاق می‌افتد.

پورسعیدی و همکاران [۹۴] با استفاده از یک روش مدل‌سازی جدید، یک بخش از تصاویر SEM واقعی به دست 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

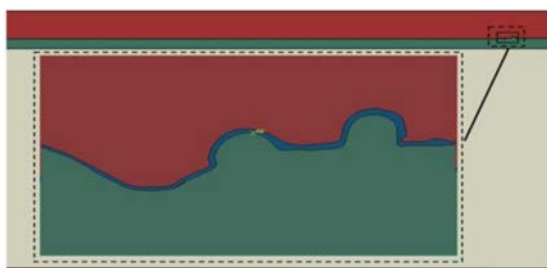
فن و همکارانش [۱۰۲] رفتار ترک خوردگی لایه‌ی الاستیک نازک را بر بستر الاستیک ضخیم تحت کرنش ثابت با استفاده از XFEM ارزیابی کرده‌اند. در مطالعه‌ی آن‌ها اثر پارامترهای متعدد شامل طول ترک، ضخامت پوشش، فاصله‌ی ترک پریودیک و سفتی نسبی بستر بر تنش و ضریب شدت تنش مطالعه شده است. آن‌ها نشان دادند که حساسیت پارامترهای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

در [۱۰۱] اثر تراکم ترک سطحی بر جدایش بین لایه‌ای مطالعه شده است. نتایج آن‌ها نشان داد که در حالتی که تراکم ترک سطحی کم باشد، ترک سطحی از سطح جوانه زده و تا سطح مشترک پوشش توسعه می‌یابد. با افزایش این تراکم جدایش بین لایه‌ای بعد از اندکی رشد متوقف می‌شود و برای ترک‌های سطحی با تراکم بالا تنها ترک در سطح پوشش خواهد بود و جدایش بین لایه‌ای اتفاق نخواهد افتاد.

۴-۲-۲- 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 خمشی سه نقطه بررسی کرده‌اند. نتایج آن‌ها نشان داد که جدایش در سطح مشترک TC و BC برای TBC با مدول یانگ پایین لایه‌ی BC و TC ضخیم‌تر اتفاق می‌افتد. در حالی که جدایش در سطح مشترک BC و بستر زمانی اتفاق می‌افتد که مدول یانگ BC بالا بوده و TC نازک‌تر باشد.

لای و همکارانش [۶۸] خصوصیات شکست پوشش TBC با ضخامت‌های مختلف TC را تحت بار خمشی سه نقطه‌ای 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 می‌شود. در حالی که ترک‌های بین لایه‌ای، مود حاکم شکست نمونه‌ها با ضخامت بیشتر از ۳۰۰ میکرون را منجر می‌شد. در صورتی که پوشش نازک باشد حالت شکست مانند شکل ۷ (ج) بوده و ترک‌های سطحی متعددی در پوشش ایجاد می‌شود. اما در



(ب)

شکل ۱۳: هندسه‌ی مورد استفاده برای مدل‌سازی عددی: (الف) شماتیک هندسه و المان مورد مطالعه، (ب) هندسه‌ی سطح مشترک استخراج شده از SEM شکل [۲] [۹۴]

مکانیزم‌های شکست نمونه‌ها با پیرگرمایی‌های مختلف تحت بارگذاری حرارتی مثلثی (شوگ: گرمایش-سرمایش) پرداخته‌اند. نتایج آن‌ها نشان داد که جدایش از سطح مشترک TGO و TC اتفاق می‌افتد و ترک از دره‌ی سطوح مشترک آغاز شده و به سمت قله‌ها رشد می‌کند. یعنی مکانیزم واماندگی مشابه حالت II در شکل ۱ است. در مرجع [۹۷] پژوهشگران اثر حالت III و IV از شکل ۱ را بررسی کرده‌اند. نتایج آن‌ها نشان داد که جوانه‌زنی ترک در TC در قله‌ی سطح مشترک، قبل از آغاز سیکل‌های حرارتی، به واسطه‌ی تنش پسماند ایجاد شده در TC به علت سرد شدن از دمای بالا تا دمای اتاق، اتفاق می‌افتد. سپس با رشد TGO و آزاد شدن تنش به واسطه‌ی خزش ترک رشد می‌کند. همچنین با ایجاد ترک بین لایه‌ای بین TGO و BC ترک TC بیشتر انتشار یافته و در نهایت منجر به جدایش بین لایه‌ای در پوشش می‌شود.

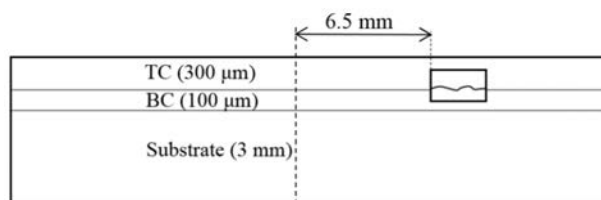
همان‌طور که ملاحظه می‌شود با استفاده‌ی هم‌زمان از روش‌ها می‌توان مکانیزم‌های مختلف واماندگی پوشش‌ها را هم‌زمان و با دقت بیشتری مطالعه کرد.

۴-۲-۴- شبیه‌سازی مکانیزم‌های شکست TBC تحت بار مکانیکی

۴-۲-۱- شبیه‌سازی مکانیزم‌های شکست تحت بار کششی

زو و همکاران [۹۹ و ۱۰۰]، ژو و همکاران [۱۰۱] در پژوهش‌های خود رفتار ترک خوردگی سطحی بر جدایش بین لایه‌ای در TBC تحت کشش را ارزیابی کرده‌اند.

در [۹۹] و [۱۰۱] به ترتیب رفتار ترک خوردگی سطح مشترک با استفاده از VCCT و CZM ارزیابی شده است. پژوهشگران در [۹۹] اثرات پارامترهای هندسی و خواص مواد مانند ضخامت و مدول الاستیسیته‌ی TC و BC 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 پیش‌برنده‌ی جدایش به ضخامت TC نسبت به ضخامت BC بسیار حساس‌تر است. به علاوه جدایش بین لایه‌ای برای TC‌های نسبتاً ضخیم و با سفتی بیشتر نسبت به BC، به سادگی جوانه زده و رشد می‌کند.



(الف)

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 به دست 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].

۵- مقایسه‌ی نتایج، روش‌ها و ایده‌های آینده

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

در این مقاله مکانیزم‌های و اماندگی TBC تحت بارهای حرارتی و مکانیکی بررسی شد. برخی از نتایج به صورت زیر خلاصه می‌شود:

۱- ترک خوردگی در TBC پلاسما اسپری تحت بار حرارتی در نزدیک سطوح مشترک لایه‌ها، به علت رشد TGO و عیوب متعددی که در بین لایه‌ها وجود دارد، ظاهر می‌شود. در بارگذاری‌های سیکلی که فقط شامل گرمایش و سرمایش است، و اماندگی به علت عدم تطابق CTE اتفاق می‌افتد. در حالی که در بارگذاری‌های سیکلی که ماندگاری در دمای بالا نیز به گرمایش و سرمایش اضافه می‌شود، و اماندگی ناشی از رشد TGO نیز اضافه می‌شود. همچنین تحت شرایط مختلفی از این بارگذاری‌ها ممکن است ترک خوردگی در TC اتفاق افتاده یا جدایش بین لایه‌ای به وجود آید. همچنین ترک خوردگی در TC می‌تواند بر جدایش بین لایه‌ای تأثیر گذارد یا عکس آن اتفاق افتد. همچنین سیکل‌های حرارتی می‌توانند منجر به ایجاد ترک‌های متعدد و به هم پیوستن آن‌ها در TGO شود. برای مطالعه‌ی مکانیزم‌های و اماندگی لایه‌های 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 به طور کامل واضح نیست، بنابراین نیاز به طراحی و انجام برخی تست‌های آزمایشگاهی و برخی اندازه‌گیری‌ها

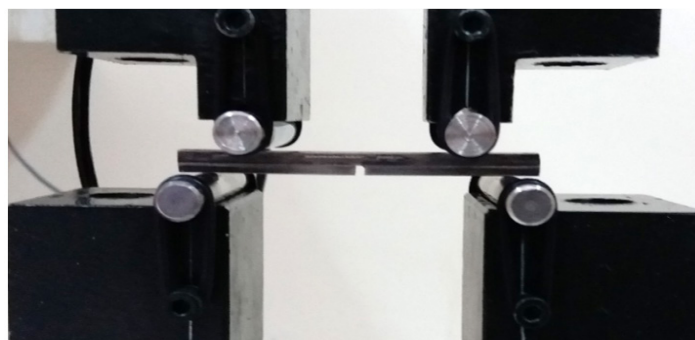
صورتی که پوشش ضخیم باشد، حالت شکست مانند شکل ۷(ه) است و جدایش پوشش از بستر منجر به شکست پوشش می‌شود.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود پارامترهای خواص و هندسه تأثیر زیادی بر مکانیزم‌های شکست ناشی از بارگذاری‌های مکانیکی دارند. می‌توان از شبیه‌سازی تست خمش برای به دست آوردن برخی خواص مکانیکی پوشش‌ها استفاده کرد. برای این منظور باید مکانیزم شکست پوشش را کنترل کرد. به عنوان مثال اگر هدف به دست آوردن خواصی مانند چقرمگی بین لایه‌های پوشش، مثلاً BC و TC باشد، باید به گونه‌ای تست را انجام داد که جدایش از بین لایه‌های BC و TC اتفاق افتد. بدین ترتیب می‌توان نمودارهای مربوطه را با تغییر دادن خواص مورد نظر در روش مورد استفاده، CZM یا XFEM، به دست آورده و از مقایسه‌ی آن‌ها با نتایج تست، خواص مورد نظر را یافت. پورسعی و همکاران [۱۰۳ و ۱۰۴] توانستند با استفاده از شبیه‌سازی تست خمش چهارنقطه‌ای به روش CZM، چقرمگی بین لایه‌های BC و TC را برای نمونه‌های TBC با پیرگرمایی‌های مختلف به دست آورند. آن‌ها برای دستیابی به این هدف از یک لایه استیفر 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 لایه‌ای کاهش می‌یابد.

۴-۳- 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، به دست آورده‌اند. آن‌ها در مطالعات خود سه تست کشش، برش و خمش چهارنقطه‌ای نامتقارن را انجام داده، نمودارهای تنش-کرنش و نیرو-جابجایی را برای تست‌ها به دست آورده و از برازش آن‌ها و نتایج حاصل از شبیه‌سازی توانستند خواص بین لایه‌ای را برای پوشش خود به دست آورند.

به روش مشابه پورسعی و همکاران در پژوهش [۱۰۳] مقدار چقرمگی شکست بین لایه‌ای TBC پلاسما اسپری و تأثیر پارامتر



شکل ۱۴: تست خمش چهار نقطه‌ای [۱۰۶].

در این خصوص احساس می‌شود. 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 سه نقطه، جدایش می‌تواند از سطح مشترک TC و BC یا BC و BCT اتفاق افتد. همچنین رشد ترک در خود لایه‌ها یا سطوح مشترک بین لایه‌ها برای پارامترهای خواص آن‌ها و هندسه‌ی مختلف، تحت بارهای مکانیکی قابل بررسی است. اما مطالعه‌ی مکانیزم‌های واماندگی TBCها تحت برخی بارهای مکانیکی، مانند خمشی، در دماهای بالا، به‌علت پیچیدگی انجام تست‌ها در چنین دماها و همچنین کنترل موقعیت آغاز و نحوه‌ی 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 بسته‌شدن مجازی ترک، المان محدود توسعه‌یافته و مدل ناحیه چسبنده، سه روش مهم برای شبیه‌سازی رفتار انتشار ترک در TBC هستند. VCCT برای محاسبه‌ی پارامترهای مکانیک شکست در جهت پیش‌بینی رشد ترک استفاده می‌شود. XFEM برای شبیه‌سازی رفتار انتشار ترک در TC و CZM برای شبیه‌سازی رفتار انتشار ترک در سطح مشترک استفاده می‌شود. طبق مطالعات نویسندگان مشخص شد که سطح مشترک TGO و TC مستعد ایجاد ترک و انتشار آن بوده و یکی از مکانیزم‌های اصلی واماندگی TBC جدایش بین‌لایه‌ای است، بنابراین روش CZM برای ارزیابی این نوع از مکانیزم‌های شکست بسیار کارآمد است. با توجه به اینکه ریزساختار TBC بسیار نامنظم است و ریزحفرات و ریزترک‌ها به‌صورت 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 آن‌ها 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 می‌شود تا بتوان پیش‌بینی صحیحی از طول عمر TBCها ارائه کرد.

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-

۵- 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 ا.، پورسعیدی ا. و رحیمی ج.، بررسی اثر پوشش های سد حرارتی بر توزیع دما و فرکانس پره های 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. Nayebpashae, 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 topcoat-bondcoat 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. Dalkılıç, and M. Heinzelmann, "Defect evolution in thermal barrier coating systems under multi-axial thermomechanical loading," *Surf. Coatings Technol.*, vol. 258, pp. 1039–1047, 2014.
- [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 ا. و ترکاشوند ک، بررسی تجربی و عددی واماندگی پوشش‌های سد حرارتی تحت بارگذاری حرارتی، بیست و هفتمین همایش سالانه بین‌المللی 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.

- 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 لایه‌های برای پوشش‌های سبب 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 traction-separation 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," Zanzan 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. Heinzlmann, "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 revision).
- [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*