



شبیه‌سازی توزیع تنش در سیستم پوشش سد حرارتی دولایه و درجه‌بندی شده YSZ/ NiCrAlY و مقایسه با نتایج اندازه‌گیری تنش به روش نانوفرورونده

نسیم نایب پاشایی^{۱*}، امیر افکار^۲، مجید نوری کمری^۳، نیما راسخ صالح^۴، سید محمد مهدی هادوی^۵

^۱ گروه پژوهشی مکانیک و فلزشناسی، پژوهشکده مهندسی و فنآوری، پژوهشگاه استاندارد، کرج
^۲ باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شرق، تهران، ایران
^۳ پژوهشکده برق، مکانیک و ساختمان، پژوهشگاه استاندارد، کرج، ایران
^۴ دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شرق، تهران، ایران
^۵ گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۶/۰۵/۱۹
بازنگری: ۱۳۹۶/۱۰/۰۹
پذیرش: ۱۳۹۶/۱۱/۱۱
ارائه آنلاین: ۱۳۹۶/۱۱/۱۸

کلمات کلیدی:

پوشش سد حرارتی درجه‌بندی شده
المان محدود
تنش پسماند
نانوفرورونده

خلاصه: یکی از روش‌های افزایش کارایی اجزاء در دمای بالا اعمال پوشش‌های سد حرارتی برای عایق کردن اجزای موجود در بخش‌های داغ موتورهای توربوفن می‌باشد که بصورت گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این پژوهش یک روش عددی مبتنی بر المان محدود به منظور شبیه‌سازی توزیع تنش در پوشش سد حرارتی معمولی و درجه بندی شده اعمالی روی زیرلایه Hastelloy-x توسعه یافت به منظور ارزیابی مدل، نتایج حاصل از شبیه‌سازی تنش با مقادیر نتایج اندازه‌گیری تنش به روش نانو فرورونده مقایسه و تطابق مناسبی مشاهده گردید. نتایج حاصل از شبیه‌سازی توزیع تنش حاکی از آن بود که در نمونه‌های شوک‌دیده تحت سیکل حرارتی فاقد زمان توقف در دمای تشکیل لایه اکسید رشد یافته حرارتی (TGO)، مقدار متوسط تنش ماکزیمم از ۲۹ مگاپاسکال در سیستم دو لایه معمولی (فصل مشترک لایه روئی / لایه واسط) به ۱۵/۳ مگاپاسکال در سیستم درجه‌بندی شده سه لایه (فصل مشترک لایه کامپوزیتی YSZ/50% NiCrAlY - 50%YSZ) و ۸/۱ مگاپاسکال در سیستم درجه‌بندی شده پنج لایه (فصل مشترک لایه کامپوزیتی YSZ/25% NiCrAlY - 75%YSZ) کاهش یافته و توزیع تنش در فصل مشترک‌ها یکنواخت شده است که این امر به افزایش عمر سیستم سد حرارتی کمک می‌کند.

۱- مقدمه

تکنولوژی‌های بکاررفته در توربین‌های گازی زمینی و هوایی بدلیل شرایط پیچیده عملکردی و دماهای بسیار بالای کاری همواره از رویکردهای علمی به‌روز و علوم پایه مدرن محاسباتی بهره برده است. در این میان محققان توجه ویژه‌ای به مسایلی از قبیل خوردگی، سایش و شکست سازه‌های حساس بکاررفته در توربین دارند تا بتوانند عمر مفید آن‌ها را افزایش داده و بازده کاری این دسته از تجهیزات مدرن و در عین حال گران‌قیمت را بهبود بخشند [۱ و ۲]. کارایی و راندمان موتورهای توربینی، مستقیماً وابسته به دمای کاری است. از این‌رو، افزایش دمای ورودی توربین منجر به بهبود قابل توجه عملکرد و راندمان موتور خواهد شد [۳-۵]. تلاش‌های متعدد انجام شده در دهه‌های گذشته در راستای افزایش دوام، بازدهی و دمای کاری

اجزای موتور، منجر به توسعه پوشش‌های سد حرارتی^۱ برای اجزای موتورهای توربینی شده است. پوشش‌های سد حرارتی با کاهش نرخ انتقال حرارت و پایین نگه‌داشتن دمای زیرلایه سبب بهینه شدن مصرف سوخت، کاهش مقدار هوای خنک‌کننده مورد نیاز، افزایش قدرت موتور و افزایش عمر مفید اجزای موتور می‌شوند [۶-۵].

پوشش‌های سد حرارتی اغلب از دو لایه تشکیل شده‌اند: لایه رویی: لایه رویی سرامیکی معمولاً از جنس اکسید زیرکونیم^۲ به همراه ۶ تا ۸ درصد اکسید ایتیریم جهت پایدارسازی فاز تتراگونال زیرکونیا است. وظیفه اصلی آن کاهش دمای سطح قطعه است [۲ و ۴]. لایه واسط: ترکیب لایه واسط برای سوپرآلیاژهای پایه نیکل به صورت MCrAlY (M= Co, Ni, Co/Ni) است. وظیفه این لایه فراهم نمودن شرایط سطحی مناسب برای چسبیدن لایه رویی به زیرلایه است.

- 1 Thermal Barrier Coating (TBC)
- 2 ZrO₂

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: nayebpashae@alumni.iust.ac.ir



بالک، لایه‌های نازک و پوشش‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۱]. روش نانوفرورونده قابلیت تعیین تنش در ابعاد میکرو/نانو را فراهم ساخته [۹] و ابزار بسیار قدرتمندی برای تعیین خواص مکانیکی مواد در ابعاد بسیار کوچک است. این روش در واقع مقاومت حرکت یک پروب الماسی را در تماس با یک سطح بر اثر اعمال نیرو در ابعاد نانومتری نشان می‌دهد [۹]. به طور کلی، تکنیک نانوفرورونده دو روش برای تعیین تنش دارد: الف- برآورد تنش با استفاده از تکنیک شکست فرورفتگی^۸ و ب- تعیین تنش با استفاده از منحنی بار - عمق نفوذ^۹ فرورونده. روش اول شامل فروردن فرورونده در ناحیه تحت تنش است تا ترک‌های شعاعی در مرکز محل فرورفتگی ایجاد شود. طول این ترک‌ها به اندازه و علامت تنش محل فرورفتگی حساس است. با اندازه گرفتن طول ترک فرورفتگی‌ها روی سطوح دارای تنش و مقایسه آن با طول ترک روی سطح نمونه بدون تنش، مقدار تنش برآورد می‌شود. بدیهی است که روش‌های توسعه یافته در این روش، فقط می‌توانند برای مواد ترد نظیر سرامیک‌ها مورد استفاده قرار گیرد که در آن‌ها هنگامی که بار فرورونده از حد آستانه مشخصی بیشتر شود ترک ایجاد می‌شود. هنگامی که فرورفتگی با نیروی متوسط روی سطح مواد ترد ایجاد شود، اثر دایمی با ترک‌های شعاعی در گوشه فرورفتگی ایجاد می‌شود [۱۱]. روش دیگر بر پایه اثر تنش بر منحنی بار - عمق نفوذ است. تنش اثر قابل ملاحظه‌ای بر سطح تماس، منحنی بارگذاری و منحنی باربرداری نانوفرورونده دارد، که برای تعیین تنش مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۰ و ۱۱].

منحنی بار - عمق نفوذ فرورونده حاوی اطلاعات بسیاری درباره رفتار تغییر فرم مواد مورد آزمایش است. این منحنی نه تنها برای تحلیل خواص مکانیکی همانند مدول الاستیک، سختی، توان کارسختی و چقرمگی شکست، بلکه برای تعیین تنش ماده، مورد استفاده قرار می‌گیرد. مطالعات تئوری و تجربی نشان می‌دهد که تنش اثر قابل ملاحظه‌ای بر منحنی بار - عمق نفوذ مربوط به خواص مکانیکی اندازه‌گیری شده با استفاده از نانوفرورونده دارد. روش‌های متعددی برای تعیین تنش پسماند از منحنی‌های بار - عمق نفوذ فرورونده توسعه یافته‌اند [۱۰].

استفاده از روش‌های عددی به ویژه روش‌های المان محدود در تحلیل و طراحی فرایندهای مهندسی سطح به ویژه پوشش‌های سد حرارتی معمولی و درجه‌بندی شده تولیدشده به روش پاشش حرارتی در تحقیقات بسیاری از محققان دیده شده است [۱۹-۱۴]. در شبیه‌سازی پوشش‌های سد حرارتی به منظور درک توزیع تنش در فصل مشترک فلز-سرامیک و نیز مکانیزم گسترش تنش پسماند در لایه‌های مختلف و همچنین الگوی توسعه ترک و مود فرآیند شکست پوشش‌های سد

لایه واسط، علاوه بر کاهش عدم تطابق مابین لایه رویی سرامیکی و زیرلایه سوپراآلیژی، مقاومت به اکسیداسیون و خوردگی داغ را ایجاد می‌کند [۱ و ۳]. همچنین در دماهای بالا، اکسیداسیون لایه واسط منجر به تشکیل یک لایه اکسیدی در فصل مشترک لایه رویی سرامیکی و لایه واسط فلزی می‌شود. با توجه به آنکه این لایه در اثر حرارت ایجاد می‌شود به آن لایه اکسید رشد یافته حرارتی^۱ گفته می‌شود [۸، ۹]. در سیستم پوشش سد حرارتی، عدم تطابق انبساط حرارتی و لایه فلزی و سرامیکی در فصل مشترک آن‌ها و رشد لایه اکسید رشد یافته حرارتی در اثر اکسیداسیون لایه واسط منجر به پیدایش تنش‌های پسماند بزرگ و در نتیجه ایجاد ترک، لایه لایه شدن و پوسته شدن پوشش طی سیکل‌های حرارتی می‌گردد [۸] و [۹]. تنش پسماند تنشی است که بدون اعمال بار خارجی به ماده در یک ماده باقی مانده است. این تنش معمولاً از عدم تطابق مابین مناطق مختلف سرچشمه می‌گیرد و به طور گسترده‌ای در قطعات مهندسی مختلف، از جمله لایه‌های نازک و پوشش‌های سطحی وجود دارد [۱۰]. تنش پسماند موجود در قطعات اثر عظیمی بر کارایی قطعات و رفتار شکست آن‌ها دارد [۱۰ و ۱۱]. وجود تنش پسماند با توجه به اندازه و کاربرد آن ممکن است مفید یا مضر باشد، به عنوان مثال، مقادیر مناسب تنش پسماند فشاری در پوشش، چسبندگی و استحکام خستگی سیستم را بهبود می‌بخشد، در حالی که تنش‌های کششی بالا ممکن است باعث ترک خوردگی و شکست خستگی شوند. بنابراین، اندازه‌گیری و کنترل دقیق تنش‌های پسماند از دیدگاه علمی و فن‌آوری بسیار اهمیت دارد [۱۱].

اندازه‌گیری تنش پسماند در سیستم پوشش سد حرارتی نقش مهمی در پیش‌بینی و بهبود عمر مفید این پوشش‌ها دارد. امروزه روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری تنش وجود دارد [۱۰ و ۱۱]. روش‌های اندازه‌گیری تنش در پوشش‌ها معمولاً به دو گروه روش‌های مخرب و روش‌های غیرمخرب تقسیم می‌شوند. روش‌های غیرمخرب معمولاً برخی پارامترهای مرتبط با تنش را اندازه‌گیری می‌کنند [۱۲]. برخی از روش‌های اندازه‌گیری تنش عبارتند از: پراش پرتو ایکس^۲، روش سوراخکاری^۳، حذف لایه^۴، پراش نوترون^۵، طیف سنجی رامان^۶، نانوفرورونده^۷ که بعضی از آن‌ها مخرب و بعضی غیرمخرب می‌باشند و هر یک از این روش‌ها مزایا و معایب متعددی دارند [۱۰ و ۱۱].

روش نانوفرورونده در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۱۰ و ۱۳] و اغلب برای تعیین خواص مکانیکی مواد جامد

- 1 Thermally Grown Oxide (TGO)
- 2 X-Ray Diffraction
- 3 Hole-Drilling
- 4 Layer Removal
- 5 Neutron Diffraction
- 6 Raman Spectroscopy
- 7 Nanoindentation

8 Indentation Fracture Technique

9 P-h

در این تحقیق هدف آن بوده است تا با استفاده از یک روش عددی مبتنی بر المان محدود، توزیع تنش در پوشش سد حرارتی اعمالی روی زیرلایه هاستلوی-یکس^۱ شبیه‌سازی شود. در این پژوهش، در کنار مطالعات عددی، به منظور انجام مطالعات تجربی پوشش سد حرارتی NiCrAlY/YSZ به روش پاشش پلاسمائی اعمال شده و پس از مشخصه‌یابی ترکیبی و ساختاری، تنش ناشی از شوک حرارتی در آن‌ها به کمک روشی غیرمخرب اندازه‌گیری می‌شود. در این تحقیق از روش نانوفورورونده برای اندازه‌گیری تنش پسماند در پوشش‌های سد حرارتی بهره برده شده و نتایج حاصل با نتایج عددی مقایسه و صحت محاسبات بررسی می‌گردد.

۲- روش تحقیق

در این مطالعه هدف شبیه‌سازی، بررسی و مقایسه توزیع تنش پسماند در دو سیستم پوشش سد حرارتی متداول و درجه‌بندی شده و در ادامه اعمال پوشش سد حرارتی روی نمونه مورد نظر و تحلیل مشخصات پوشش است.

در این بخش توزیع تنش در دو نوع سیستم پوشش سد حرارتی معمولی و درجه‌بندی شده بررسی شده است. به منظور ایجاد هندسه مدل از ساختار چندلایه پوشش مطابق با شکل ۱ استفاده شد. در سیستم‌های پوشش سد حرارتی مورد مطالعه جنس زیرلایه سوپرآلیاژ هاستلوی-یکس است. در سیستم دولایه، پوشش متشکل از لایه واسط NiCrAlY و لایه رویی سرامیکی زیرکونیای تقویت شده با ایتریا است. در سیستم درجه‌بندی شده، پوشش متشکل از لایه واسط، لایه/لایه‌های کامپوزیتی و نهایتاً لایه رویی سرامیکی است. جنس لایه‌های فوق‌الذکر به ترتیب ترکیب NiCrAlY، لایه / لایه‌های کامپوزیتی متشکل از لایه واسط و لایه رویی سرامیکی و نهایتاً لایه سرامیکی زیرکونیای تقویت شده با ایتریا می‌باشد. در این پژوهش، دو دسته پوشش سد حرارتی درجه‌بندی شده سه و پنج لایه در نظر گرفته شدند. در سیستم پوشش درجه‌بندی شده، سه ترکیب مختلف 50% NiCrAlY+50% 8YSZ، 75% NiCrAlY+25% 8YSZ و 25% NiCrAlY+75% 8YSZ به عنوان لایه کامپوزیتی بین لایه‌ها در نظر گرفته شد. تصویر شماتیک مجموعه سیستم پوشش سد حرارتی درجه‌بندی شده در شکل ۱-ب و شکل ۱-ج نشان داده شده است.

۲-۱- شبیه‌سازی عددی

سیستم مورد مطالعه در این پژوهش، شامل لایه پوشش حفاظتی دمای بالا مورد استفاده در منطقه داغ توربین گازی است. سطح پوشش داده شده در معرض گازهای داغ قرار می‌گیرد و از طرف

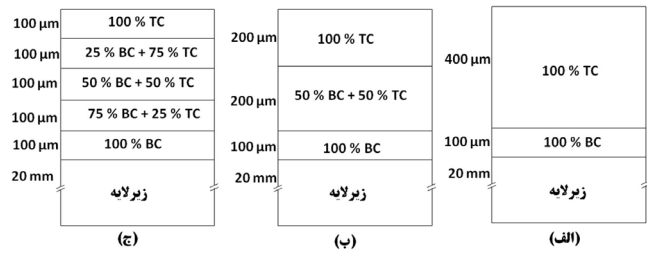
حرارتی کاربرد فراوانی دارد. در بررسی‌های عددی و آزمایشگاهی که روی خوردگی داغ [۶] و رفتار حرارتی [۲۰] دمای بالای پوشش‌های سد حرارتی روی پره‌های قسمت داغ توربین صورت گرفت، نتایجی در مورد نحوه اعمال سیستم خنک‌کاری زیرلایه‌ها در کنار مکان‌های حساس به تخریب‌های محیطی شناسایی شد. همچنین خدماتی و همکاران [۲۱]، مطالعه ریزساختاری جامعی روی تحولات فعال شونده با دما و توزیع فازی دما بالای پوشش‌های سد حرارتی انجام دادند و تمرکز خود را روی عیوب بوجود آمده در فصل مشترک‌های بوجود آمده در پوشش‌های درجه‌بندی قرار دادند. واترمتز و همکاران [۲۲] از یک طراحی دو بعدی برای بدست آوردن مدل بهینه اعمال تماس در فصل مشترک بین لایه‌های مختلف پوشش سد حرارتی درجه‌بندی شده بهره بردند و مدل سینوسی و نیم‌دایره‌ای را به عنوان مدل مزوابعاد برای شبیه‌سازی معرفی نمودند. ژانگ [۲۳] از یک مدل نوین المان محدود با بهره بردن از روش کوپل حرارتی- مکانیکی برای بدست آوردن نقاط در معرض جوانه‌زنی ترک استفاده و مد شکست هر یک از این نقاط را پیش‌بینی نمود. سعیدی و همکاران [۲۴] در یک مطالعه آزمایشگاهی تاثیر عناصر مختلف دوپ شده در پوشش سرامیکی سد حرارتی را در اکسیداسیون دما بالا مورد مطالعه قرار دادند و نرخ کاهش وزن در طول سال را بعنوان معیار از بین رفتن پوشش سد حرارتی معرفی نمودند. اشاعه ترک شکست ناشی از شوک حرارتی و پیش‌بینی نحوه، سرعت و نرخ آزاد شدن انرژی ماده سرامیکی حین بوجود آمدن عیب لایه لایه شدن در فصل مشترک پوشش‌های سد حرارتی از مواردی بود که در مطالعه بیکر و همکاران [۱۵] مورد بررسی قرار گرفت. اکبرپور و همکاران [۲۵] از یک مدل چند مقیاسی میکرومکانیکی برای شبیه‌سازی المان محدود توزیع تنش حرارتی در فصل مشترک این دسته از پوشش‌های سد حرارتی بهره بردند. همچنین در سال‌های اخیر مباحث انتخاب مواد نوین برای پوشش‌های سد حرارتی مورد توجه قرار گرفته است [۲۶].

با توجه به موارد پیش‌گفته، تاکنون پژوهش‌های معدودی در ارتباط با پیش‌بینی توزیع تنش‌های پسماند در پوشش‌های سد حرارتی به کمک روش عددی المان محدود انجام شده است. همچنین، به منظور تایید مدل شبیه‌سازی، ضروری است که نتایج حاصل از مدل، با نتایج آزمون‌های تجربی مقایسه گردد. یکی از مهم‌ترین نتایج قابل مقایسه تنش است. اغلب روش‌های اندازه‌گیری تنش تنها قادر به محاسبه مقادیر تنش در سطح نمونه بوده و روش‌های مربوط به اندازه‌گیری تنش در عمق نمونه غالباً منجر به تخریب قطعه می‌شوند. در سال‌های اخیر روش نانوفورورونده برای تعیین خواص مکانیکی مواد جامد بالک، لایه‌های نازک و پوشش‌ها بسیار مورد توجه قرار گرفته است. این روش قابلیت تعیین تنش در ابعاد میکرو/نانو را فراهم می‌سازد. در این پژوهش این روش برای محاسبه تنش‌ها در نمونه‌های پوشش سد حرارتی درجه‌بندی شده بکار رفته است.

1 Hastelloy-X

2 Yttria-Stabilized Zirconia (8YSZ)

دیگر، سوپرآلیاژ زیرلایه نیز با هوای سرد بصورت



شکل ۱: تصویر شماتیک مجموعه سیستم پوشش سد حرارتی شامل زیر لایه و لایه‌های تشکیل‌دهنده پوشش لایه رویی^۱ و لایه واسط^۲ در الف) پوشش سد حرارتی دولایه، ب) پوشش سد حرارتی درجه‌بندی شده سه لایه و ج) پوشش سد حرارتی درجه‌بندی شده پنج لایه

Fig1. Composition profiles of three types of coatings: (a) duplex, (b) 3-layers, (c) 5-layers

جابجایی خنک می‌گردد. به منظور شبیه‌سازی از نرم‌افزار آباکوس^۳ استفاده شد. تمامی اجزای سیستم شامل زیرلایه و پوشش‌ها، دوبعدی، شکل‌پذیر و با هندسه پوسته‌ای در نظر گرفته شده است. همچنین، فرض شده است که هیچگونه مقاومت حرارتی بین لایه‌ها وجود ندارد و از تخلخل موجود در لایه‌های سرامیکی صرف‌نظر شده است. در تحلیل حاضر برای مش‌بندی مدل، از المان CPE6MT استفاده شده است که المان مثلثی درجه دوم با شش گره در رئوس و وسط اضلاع است. کاربرد این نوع المان، امکان بالاتر بردن صحت انتگرال‌گیری برای محاسبات جابجایی‌های مربوط به کرنش و تنش پسماند را فراهم می‌سازد. به منظور کاهش زمان حل از روش انتگرال‌گیری کاهش‌ی از نوع کرنش صفحه‌ای بهره برده شده است.

در این مطالعه از حضور عیوب ناشی از فرایند پوشش‌دهی صرف‌نظر شده و لذا فرض همسانگردی خواص در هر دو بعد هنگام اختصاص دادن خواص حرارتی و مکانیکی به لایه‌های مختلف، لحاظ شده است. برای انجام تحلیل، خواص حرارتی و مکانیکی تمامی مواد مورد استفاده بصورت تابعی از دما به نرم‌افزار داده شد تا بتوان رفتار ماده را حین قرار گرفتن در معرض بار حرارتی به درستی پیش‌بینی و از خروجی آن در تحلیل پاسخ مکانیکی پوشش استفاده نمود. خواص حرارتی و مکانیکی لایه میانی کامپوزیتی تشکیل‌دهنده پوشش سد حرارتی مطابق با رابطه (۱) از قانون وگارد^۴ قابل تعیین است [۲۷]:

$$M_i = M_A (V_A)_i + M_B (1 - (V_A)_i) \quad (1)$$

که در آن M_i خاصیت ماده در لایه نام (به عنوان مثال لایه NiCrAlY)، $(V_A)_i$ کسر حجمی جز A در لایه نام و M_B خاصیت

- 1 Top Coat
- 2 Bond Coat
- 3 Abaqus
- 4 Vegard

ماده B (به عنوان مثال 8YSZ) است. جدول ۱ خواص مورد استفاده در تحلیل کوپل حرارتی و مکانیکی مورد استفاده را بصورت تابعی گسسته از دما نشان می‌دهد.

به منظور انجام تحلیل با شرایط حداکثری نزدیک به حالت واقعی باید شرایط مرزی هوشمندانه‌ای به گونه‌ای اعمال شود که نتایج نزدیک به واقعیت را ارائه دهد. برای انجام تحلیل ساختاری و محاسبه تنش پسماند، اعمال شرایط مرزی مناسب مکانیکی ضروری است. شرایط مرزی مختلفی بر روی نواحی کناری پوشش اعمال می‌گردد و در این تحقیق نیز بر اساس استراتژی غالب، شرایط مرزی مکانیکی متناسب با شرایط واقعی به طرفین قطعه اعمال گردید.

جدول ۱: خواص حرارتی و مکانیکی لایه‌های تشکیل‌دهنده پوشش سد حرارتی درجه‌بندی شده [۳۰-۲۸]

Table1. Material Properties of the Graded Coating

75% NiCrAlY + YSZ 25%	25% NiCrAlY + YSZ 75%	50% NiCrAlY + YSZ 50%	زیرلایه هاستلوی-ایکس	دما (K)	خواص ماده
۲۲/۳	۲۱۳	۲۱۰	۲۱۶/۴	۲۲۵	۲۷۶
۱۹۱/۹	۲۰۱/۲	۲۰۵	۱۹۶/۹	۱۸۶	۶۷۳
۱۵۷/۶	۱۷۴/۳	۱۸۱	۱۶۶/۶	۱۴۷	۱۰۷۳
۱۴۲/۷	۱۵۶/۵	۱۶۲	۱۵۰/۱	۱۳۴	۱۴۷۳
					۲۷۶
					۶۷۳
					۱۰۷۳
					۱۴۷۳
					۲۷۶
					۶۷۳
					۱۰۷۳
					۱۴۷۳
۱۰/۸۲	۹/۵۹	۹/۱	۱۰/۱۶	۱۱/۶	۱۳/۴
۱۲/۹۴	۱۱/۲۶	۱۰/۵۸	۱۲/۰۳	۱۴	۱۴/۲
۱۴/۴۸	۱۲/۰۹	۱۱/۱۳	۱۳/۲	۱۶	۱۵/۶
۱۶/۹۷	۱۰/۹۳	۸/۵	۱۲/۷۲	۲۰/۸	۱۵/۸
۵۰/۰۶۹	۵۰/۰۲	۵۰/۰	۵۰/۰۴۳	۵۰/۱	۴۴۲
۵۸۷/۰۲	۵۷۹/۱۶	۵۷۶	۵۸۲/۸	۵۹۲	۵۱۴
۷۳۶/۱۸	۶۶۵/۴۲	۶۳۷	۶۹۸/۱۳	۷۸۱	۶۶۸
۷۲۸/۵۲	۶۷۲/۵	۶۵۰	۶۹۸/۳۹	۷۶۴	۸۳۱
۳/۲۹	۱/۷	۱/۰۶	۲/۴۳	۴/۳	۱۰/۴
۴/۶۶	۱/۹۱	۰/۸	۳/۱۸	۶/۴	۱۸/۶
۷/۲۳	۲/۵۳	۰/۶۵	۴/۷۰	۱۰/۲	۲۳/۸
۷/۹۸	۲/۷۳	۰/۶۲	۵/۱۵	۱۱/۳	۲۷/۴

با اعمال قیود مناسب می‌توان از حرکت قطعه در جهات مقید شده جلوگیری نمود و نیز تفسیر صحیحی از تنش‌های پسماند درون ماده به دست آورد. از این‌رو، گوشه‌های افقی ساختار پوشش در جهت عمودی مقید شده و گوشه‌های عمودی از حرکت در جهت افقی بازداشته شده‌اند. به منظور نمایش تکرار هندسه فصل مشترک در

است. سیکل حرارتی شامل گرمایش از دمای ۲۵ درجه سانتیگراد تا ۱۱۵° درجه سانتیگراد (دمای کاری اجزای داغ موتور هواپیما [۷]) در ۳۰۰ ثانیه، نگهداری در دمای ۱۱۵° درجه سانتیگراد و در نهایت مرحله سرمایش از ۱۱۵° درجه سانتیگراد تا ۲۵ درجه سانتیگراد طی ۳۰۰ ثانیه است (شکل ۳). این سیکل حرارتی در دو حالت در نظر گرفته شد: تشکیل لایه اکسیدی و عدم تشکیل لایه اکسیدی (حالت شوک). سیکل حرارتی در حالت تشکیل لایه اکسیدی دارای سه مرحله گرمایش، حالت مانا و سرمایش است در حالی که در حالت شوک بدون رشد لایه اکسیدی از مرحله دوم بارگذاری صرف نظر کردیم.

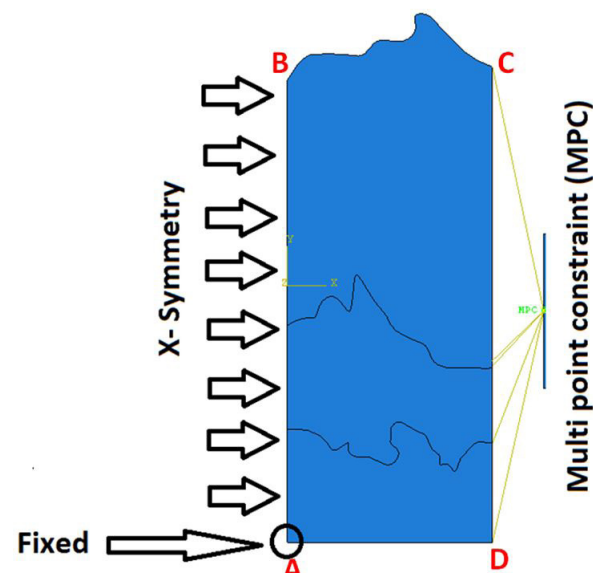
در پوشش‌های سد حرارتی، فصل مشترک بین لایه‌ها سطحی زبر و ناصاف دارند که وابسته به نوع فرآیند و روش اعمال پوشش، دارای دامنه و طول موج‌های مختلفی است [۳۱ و ۳۲]. در پژوهش حاضر، هندسه فصل مشترک واقعی با استفاده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی در نظر گرفته شد. توزیع دما به صورت مستقیم در معادله مکانیکی تاثیر داشته و به همین دلیل در مراحل حل، ابتدا معادله انتقال حرارت برای زمان‌های مختلف حل شده و در هر مقطع زمانی اطلاعات دمایی به عنوان ورودی در معادله مکانیکی مورد استفاده قرار گرفته و توزیع تنش متناسباً محاسبه خواهد شد.

۲-۲- مطالعات تجربی

در این تحقیق از سوپر آلیاژ هاستلوی-ایکس به عنوان زیرلایه استفاده شد. به منظور انجام آزمایش‌ها، قطعه‌ای از جنس سوپرآلیاژ هاستلوی-ایکس تهیه گردید. به وسیله ماشینکاری و سیم برش^۲ نمونه‌هایی دیسکی شکل به قطر ۲۰ میلی‌متر و ضخامت ۴۰ میلی‌متر و نمونه‌های مکعب مستطیل شکل به طول و عرض ۵ میلی‌متر و ۸ میلی‌متر و ضخامت در حدود ۵ میلی‌متر آماده شدند. سطح جانبی نمونه‌های مربوط به انجام تست نانوفرورونده، پس از سیم برش، تحت سنباده‌زنی با درجات مختلف از ۶۰ تا ۱۲۰۰ قرار گرفت و سپس پولیش توسط خمیر الماس ۱ میکرون و پارچه ماهوت روی این سطوح انجام شد تا کاملاً براق شوند. این آماده‌سازی اولیه به منظور یکنواختی و بررسی لایه‌ها پس از انجام فروروندگی در سطح جانبی انجام شد. برای آماده‌سازی مواد اولیه پاشش، پودرهای مواد اولیه با مشخصات مورد نظر مطابق با جدول ۲ تهیه شدند.

امتداد پوشش (مسطح، سینوسی و یا هندسه واقعی) بایستی از قید دیگری استفاده شود که به نوعی حرکت گره‌ها را در جهت افقی با هم هماهنگ سازد. به عبارت دیگر، این قید که اصطلاحاً حالت قیدگذاری چند نقطه‌ای^۱ نامیده می‌شود بگونه‌ای عمل می‌کند که تمامی گره‌ها در جهت افقی با هم و به یک میزان جابجا شوند. شکل ۲ شرایط مرزی مکانیکی اعمال شده در این پژوهش را نشان می‌دهد.

بمنظور انجام تحلیل حرارتی و استخراج نتایج صحیح و نزدیک به واقعیت، باید از شرایط مرزی حرارتی مناسب و بجا استفاده نمود. ابتدا با توجه به دمای اولیه مجموعه، باید از شرایط اولیه دمایی مناسب استفاده کرد و در نمو اول حل به مجموعه وارد نمود. این دما در حل‌های بعدی با توجه به شرایط حرارت‌دهی و قیود مکانیکی تغییر می‌کند. در مرحله اول به منظور در نظر



شکل ۲: شرط مرزی مکانیکی اعمال شده در سیستم پوشش سد حرارتی
Fig2. Mechanical boundary conditions used for simulation of TBC

گرفتن تنش‌های ناشی از اعمال پوشش سد حرارتی، یک پیش مرحله شامل سرمایش از دمای اعمال پوشش تا دمای محیط در نظر گرفته شد. در این پیش مرحله (سیکل سرمایش) مجموعه پوشش و زیرلایه از دمای اعمال پوشش تا دمای محیط در ۱۲۰۰۰ ثانیه سرد شد. به منظور محاسبه تنش‌های ایجاد شده حین فرآیند سرمایش، لایه رویی در دمای ذوب ماده پاشش ۲۶۸° درجه سانتیگراد و بخش‌های دیگر سیستم پوشش سد حرارتی (زیرلایه و لایه واسط) در دمای پیش گرم ۱۰۰° درجه سانتیگراد قرار داده شدند و در زمان تعیین شده تا دمای محیط سرد شدند.

سیکل حرارتی روی سطح لایه رویی شامل سه مرحله اصلی

به منظور محاسبه تنش با این روش لازم است که نخست خواص مکانیکی ماده نظیر مدول یانگ، سختی و چقرمگی شکست ۴ محاسبه شود تا در مرحله بعد در محاسبه تنش مورد استفاده قرار گیرند.
 ۲-۱-۱-۲-۲-۱- تعیین سختی و مدول یانگ پوشش به روش نانوفرورونده مدول یانگ پوشش سد حرارتی را می‌توان از منحنی بار-عمق نفوذ نانوفرورونده از طریق رابطه (۲) محاسبه نمود [۱۱ و ۳۳-۳۵]:

$$E_r = \frac{\sqrt{\pi} S}{2\beta \sqrt{A_c}} \quad (2)$$

جدول ۲: مشخصات پودرهای مورد استفاده در پاشش پلاسمائی

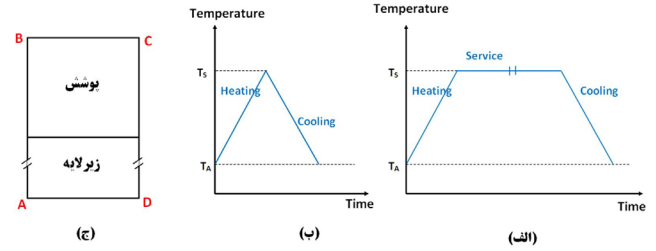
Table 2. Characteristics of powders used in atmospheric plasma spraying

لایه واسط	لایه رویی	لایه
Ni-22Cr-10Al-1Y	ZrO ₂ -8wt% Y ₂ O ₃	ترکیب شیمیایی
AMDRY 962	Metco 204 -NS	نام تجاری پودر
۴۰-۷۵	کروی	مورفولوژی
۱۱-۱۰۶	کروی	اندازه ذرات پودرها (میکرومتر)

جدول ۳: پارامترهای مورد استفاده برای پاشش پلاسمائی اتمسفری

Table 3. Operating parameter of plasma spraying

YSZ met-(co204Ns)	Ni- 25 CrAlY+ 75 YSZ	Ni- 50 CrAlY+ 50 YSZ	Ni- 75 CrAlY+ YSZ+25	NiCrAlY Am-(dry962)	واحد	پارامتر
۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰	۴۵۰	۴۵۰	A	جریان
۵۵	۵۵	۵۵	۵۰	۵۰	V	ولتاژ
۸۰	۸۰	۸۰	۸۵	۸۵	SCFH	نرخ شارش گاز آرگون
۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	SCFH	نرخ شارش گاز هیدروژن
۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	SCFH	نرخ شارش گاز حامل پودر (آرگون)
۲۵	۲۰	۲۰	۱۵	۱۵	lb/hr	نرخ تغذیه پودر
۸	۸	۱۰	۱۰	۱۲	cm	فاصله پاشش



شکل ۳: سیکل دما-زمان اعمالی بر روی لایه سطحی پوشش سد حرارتی (الف) با زمان اکسیداسیون و تشکیل اکسید رشد یافته حرارتی و (ب) فاقد زمان اکسیداسیون و عدم تشکیل اکسید رشد یافته حرارتی و (ج) تصویر شماتیک سیستم پوشش و زیرلایه

Fig3. Thermal cycle strategy loaded to the top surface of ceramic coating (a) with oxidation time and TGO growth and (b) without oxidation time and TGO growth, (c) Thermal Barrier Coating system

به منظور آماده‌سازی پودرهای کامپوزیتی ۷۵٪ NiCrAlY+۲۵٪ 8YSZ، ۵۰٪ NiCrAlY+۵۰٪ 8YSZ و ۲۵٪ NiCrAlY+۷۵٪ 8YSZ از روش آلیاژسازی مکانیکی استفاده شد. به این منظور پودرهای 8YSZ و NiCrAlY با نسبت‌های مورد نظر و با گلوله‌های آلومینائی درون آسیاب گلوله‌ای ریخته شدند و به مدت یک ساعت و با سرعت ۱۸۰ دور بر دقیقه مخلوط گردیدند.

فرآیند پوشش‌دهی با استفاده از دستگاه پاشش پلاسمائی اتمسفری^۱ مجهز به تفنگ متکو ۳ ام.بی.۲ انجام گرفت. به منظور بهبود چسبندگی پوشش، سطح زیرلایه قبل از انجام فرآیند پوشش‌دهی توسط ذرات آلومینا (ذرات ساینده آلومینا با اندازه ۷۰۰ تا ۸۰۰ میکرومتر) ذره‌پاشی شد تا زبری سطح به حدود ۴ تا ۶ میکرومتر برسد. در مرحله بعد سطح زیرلایه با استفاده از محلول آلی (استون) شستشو داده شد تا هرگونه چربی زوده شود. زیرلایه قبل از فرآیند پاشش‌دهی تا دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد پیش گرم شد. پارامترهای مربوط به دستگاه پاشش پلاسمائی لایه‌ها در جدول ۳ گزارش شده است.

به منظور مطالعه رفتار شوک حرارتی، هر یک از سیکل‌های حرارتی (حاوی توقف در زمان اکسیداسیون و فاقد زمان توقف) تا ۴۵ بار تکرار شد. پس از این مرحله، عملیات بررسی مشخصات لایه‌ها انجام پذیرفت.

۲-۲-۱- محاسبه تنش به روش نانوفرورونده

در این مطالعه، مبنای اندازه‌گیری تنش به روش نانوفرورونده، رویکرد موسوم به روش شکست فرورونده^۲ می‌باشد. در این رویکرد، هنگامی که یک ماده ترد با یک نیروی متوسط تحت فروروندگی قرار می‌گیرد، یک اثر دائمی با ترک‌های شعاعی در امتداد گوشه‌های اثر فرورونده ایجاد می‌شود.

- 1 Atmospheric Plasma Spray (APS)
- 2 Metco 3MB
- 3 Indentation Fracture Technique

فشار تماس متوسط معمولاً از عمق تماس نفوذ، h_c ، محاسبه می‌شود. سطح تماس تصویرشده برای فرورونده برکوویچ از رابطه (۹) به دست می‌آید [۱۱ و ۳۳ و ۳۵]:

$$A_c = 24.49 h_c^2 \approx 24.5 h_c^2 \quad (9)$$

بنابراین سختی از رابطه (۱۰) محاسبه می‌گردد [۱۱ و ۳۳ و ۳۵]:

$$H = \frac{P_{\max}}{24.5 h_c^2} \quad (10)$$

مقادیر متوسط مدول یانگ و سختی برای محاسبات چقرمگی شکست و تنش مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۲-۱-۲-۲. تعیین تنش سیستم پوشش سد حرارتی به روش

نانوفرورونده

هنگام اعمال فرورونده برکوویچ معمولاً ترک‌هایی بر روی نمونه ایجاد می‌شوند. در حالتی که فرض شود که هیچگونه تنشی در ماده وجود نداشته باشد، رابطه مابین چقرمگی شکست K_{IC} و میانگین طول ترک‌های ایجاد شده c از رابطه (۱۱) پیروی می‌کند [۱۱ و ۳۴]:

$$K_{IC} = \gamma \left(\frac{E}{H} \right)^{1/2} \frac{P}{c^{3/2}} \quad (11)$$

که در آن c میانگین طول ترک‌های ایجاد شده از مرکز فرورفتگی تا نوک ترک $c = (c_1 + c_r + c_p) / 3$ برای ترک‌های شعاعی c_1 ، c_r و c_p است، P بار اعمالی و γ ثابت تجربی است که به هندسه فرورونده وابسته است و برای فرورونده برکوویچ $\alpha = 0.16$ و E و H به ترتیب مدول یانگ و سختی نمونه تحت آزمایش هستند [۱۱ و ۳۵].

هنگامی که پوشش سد حرارتی حاوی تنش باشد و فرورونده مطابق با شکل ۴ در راستای عمود بر سطح مقطع لایه‌های پوشش اعمال شود، چقرمگی شکست در راستای عمود بر پوشش از رابطه (۱۲) به دست می‌آید [۱۱ و ۳۵]:

$$K_{IC} = \delta \left(\frac{E}{H} \right)_i^{1/2} \frac{P}{c^{3/2}} + \frac{\gamma}{\sqrt{\pi}} \sigma c^{1/2} \quad (12)$$

بنابراین مطابق با رابطه (۱۳) خواهیم داشت [۱۱ و ۳۵]:

$$\frac{P}{c^{3/2}} = \left(\frac{K_{IC}}{\chi_i} \right) + \left(-\frac{\gamma \sigma}{\sqrt{\pi} \chi_i} \right) c^{1/2} \quad (13)$$

که در آن $\chi_i = \delta \left(\frac{E}{H} \right)_i^{1/2}$ می‌باشد [۱۱ و ۳۵].

رابطه (۱۳) نشان‌دهنده رابطه خطی مابین $P/c^{3/2}$ و $c^{1/2}$ است.

رابطه (۱۳) و $\left(-\frac{\gamma \sigma}{\sqrt{\pi} \chi_i} \right)$ و $\left(\frac{K_{IC}}{\chi_i} \right)$ به ترتیب نشان‌دهنده شیب و عرض از مبدا معادله (۱۳) هستند. به منظور دستیابی به رابطه خطی بهتر، مجموعه‌ای از

تست‌های فرورونده بایستی تحت بارهای

که در آن E_r مدول الاستیک کاهش یافته^۱، S سفتی، A_c سطح تماس تصویرشده^۲ مابین نمونه و فرورونده و b ضریب تصحیح بدون بعد وابسته به شکل فرورونده است که برای فرورونده برکوویچ معمولاً $\beta = 1/0.5$ به کار می‌رود. سفتی از رابطه (۳) محاسبه می‌گردد و در حقیقت از شیب قسمت اولیه منحنی برداشتن بار بدست می‌آید [۱۱ و ۳۴].

$$S = \left(\frac{dP}{dh} \right)_{h=h_{\max}} \quad (3)$$

A_c سطح تماس تصویرشده مابین نمونه و فرورونده و h_{\max} ماکزیمم عمق نفوذ نانوفرورونده است و مطابق با رابطه (۴) به عمق تماس h_c وابسته است [۱۱ و ۳۶-۳۳].

$$A_c = f(h_c) \quad (4)$$

که در آن عمق تماس h_c از طریق رابطه (۴) قابل محاسبه است [۱۱ و ۳۶-۳۳]:

$$h_c = h_{\max} - \varepsilon \frac{P}{S} \quad (5)$$

در رابطه (۴)، ε ثابتی است که بستگی به شکل هندسی فرورونده دارد و برای فرورونده برکوویچ برابر با ۰/۷۵ است.

رابطه مابین مدول الاستیک کاهش یافته (E_r) و مدول الاستیک نمونه و فرورونده از طریق رابطه (۶) بیان می‌شود [۱۱ و ۳۶-۳۳]:

$$\frac{1}{E_r} = \frac{1 - \theta_i^2}{E_i} + \frac{1 - \theta_s^2}{E_s} \quad (6)$$

که در آن v_s و E_s به ترتیب مدول الاستیک و ضریب پواسون برای نمونه تحت آزمون هستند و v_i و E_i به ترتیب مدول الاستیک و ضریب پواسون برای فرورونده هستند. بنابراین از رابطه (۷) مدول الاستیک نمونه تحت آزمون فرورفتگی محاسبه می‌شود [۱۱ و ۳۵]:

$$E = \frac{1 - \theta^2}{\left(\frac{1}{E_r} \right) - \left(\frac{1 - \theta_i^2}{E_i} \right)} \quad (7)$$

برای فرورونده الماس $E_i = 1141 \text{ GPa}$ و $U_i = 0.07$ [۱۱ و ۳۳] و $U_s = 0.2$ در نظر گرفته می‌شود. در پوشش سد حرارتی $U_s = 0.2$ است [۳۶].

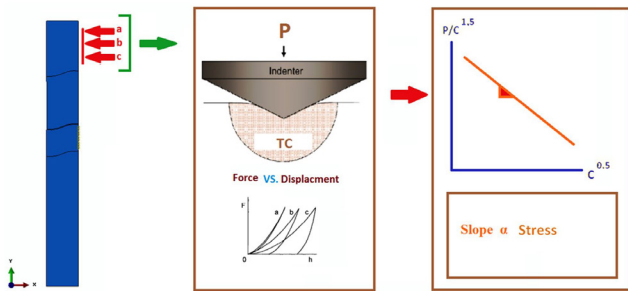
در روش نانوفرورونده، سختی به صورت بار تقسیم بر سطح تماس تصویرشده فرورفتگی تعریف می‌شود و در حقیقت فشار متوسطی است که ماده تحت بار می‌تواند تحمل کند. سختی از منحنی بار-عمق نفوذ نانوفرورونده در بیشینه بار از رابطه (۸) به دست می‌آید [۳۳]:

$$H = \frac{P_{\max}}{A_c} \quad (8)$$

که در آن P_{\max} بیشینه بار و A_c سطح تماس تصویر شده است.

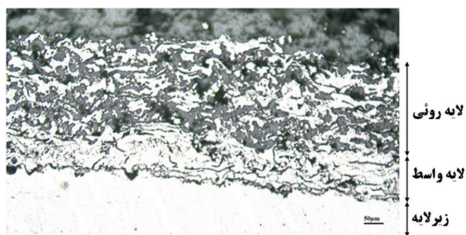
- 1 Reduced Modulus
- 2 Projected Contact Area

قرار گرفته تقریباً موازی با سطح زیرلایه است. چنین ریزساختاری از ویژگی‌های اصلی پوشش‌های پاشش پلاسمایی است که در تحقیقات سایر پژوهشگران [۳۸-۴۰] نیز به آن اشاره شده است.

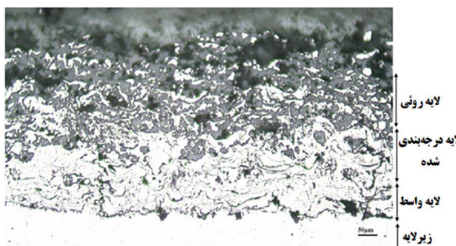


شکل ۵: روند نمای محاسبه تنش با استفاده از روش نانوفرورونده
Fig5. Stress measurement by Nano indentation method

مطابق با شکل ۶-ب در تصویر میکروسکوپ نوری مربوط به ریزساختار پوشش‌های سد حرارتی درجه‌بندی شده، لایه‌ها بخوبی بر روی هم با زبری معینی قرار گرفته‌اند. پوشش‌ها ساختار لایه‌ای دارند و هر لایه شامل میکروتُرک‌ها و حفراتی می‌باشد که به رنگ سیاه دیده می‌شوند. در پوشش‌های سد حرارتی درجه‌بندی شده حد فاصل مشخصی بین لایه‌های مختلف کامپوزیتی درجه‌بندی شده دیده نمی‌شود. این تغییر تدریجی لایه‌های مختلف باعث تغییر تدریجی خواص فیزیکی و مکانیکی در این لایه‌ها شده است. امتیاز اصلی پوشش‌های درجه‌بندی شده مقاومت بالای آن‌ها در برابر محیط‌هایی با گرادیان درجه حرارت بالا (تغییرات دمایی بالا) می‌باشد، به گونه‌ای که مولفه سرامیکی ماده به دلیل ضریب هدایت حرارتی پایین باعث مقاومت در برابر دماهای بالا می‌گردد. از سوی دیگر، مولفه فلزی باعث جلوگیری از رشد ترک و شکست ماده در اثر تنش‌های حرارتی می‌شود [۴۱ و ۴].



(الف)

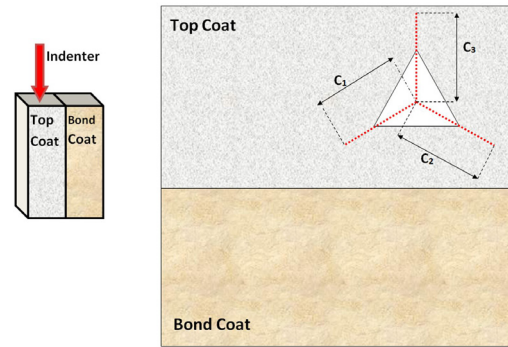


(ب)

شکل ۶: تصویر میکروسکوپ نوری از سطح مقطع نمونه پوشش سد حرارتی

الف- دو لایه معمولی و ب- درجه‌بندی شده سه لایه

Fig6. Optical microstructure of thermal barrier coating (a)
Dublex (b) 3-layers FG- TBC



شکل ۴: طرح شماتیک اعمال فرورونده بر کوویچ در راستای عمود بر لایه روی
Fig4. Berkovich nano-indentation perpendicular on the top coat

مختلف انجام شود. در مرحله بعد به نتایج نمودار، خطی برازش می‌شود. K_{IC} و σ نمونه به ترتیب از روی عرض از مبدا و شیب معادله خطی برازش شده به نمودار تعیین می‌شوند. شکل ۵ مراحل نمای محاسبه تنش با استفاده از روش نانوفرورونده را نشان می‌دهد.

۲-۱-۳. انجام آزمون نانوفرورونده

به منظور اندازه‌گیری تنش به روش نانوفرورونده از یک دستگاه تریبوسکوپ^۱ دارای فرورونده بر کوویچ استفاده شد. دستگاه مجهز به میکروسکوپ نیروی اتمی^۲ بود که به منظور بررسی توپوگرافی سطحی نمونه تحت آزمون، مورد استفاده قرار گرفت. نرخ بارگذاری 5 mNs^{-1} و زمان مکث ۵ ثانیه و نرخ باربرداری 5 mNs^{-1} در نظر گرفته شد. در دمای اتاق مجموعه‌ای از نیروهای در بازه $500 \mu\text{N}$ تا $10000 \mu\text{N}$ با فواصل $1000 \mu\text{N}$ در راستای عمود بر سطح مقطع لایه رویی پوشش سد حرارتی به نمونه اعمال شد تا اثر فرورونده با ترک‌های شعاعی در گوشه فرورفتگی بر روی نمونه ایجاد شود. نرم افزار پردازش تصویر متلب^۳ به منظور تعیین راستا و طول ترک‌ها در نمونه‌های تحت آزمون نانوفرورونده مورد استفاده قرار گرفت. نمونه‌های مورد بررسی تحت سیکل حرارتی معرفی شده در شکل ۳ قرار گرفته بودند.

۳- نتایج

شکل ۶ تصویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار نمونه پوشش سد حرارتی دولایه معمولی و پوشش سد حرارتی درجه‌بندی شده سه لایه را نشان می‌دهد. مطابق با تصویر ۶-الف، در نمونه پاشش پلاسمایی شده سه منطقه لایه رویی، لایه واسط و زیرلایه دیده می‌شود. نواحی روشن معرف فازهای فلزی و نواحی خاکستری تیره معرف فازهای سرامیکی و نقاط سیاه رنگ نیز بیانگر حفره‌هایی موجود در پوشش می‌باشند. لایه واسط به رنگ روشن‌تر دیده می‌شود و ساختار لایه‌ای دارد. این ساختار لایه‌ای شامل اسپلت‌های روی هم

- 1 Triboscope system (HiStron Inc. USA)
- 2 AFM (NanoScope E, Digital Instruments, USA)
- 3 Matlab

پوشش‌های سد حرارتی درجه‌بندی شده را پس از اعمال چرخه شوک حرارتی نشان می‌دهد. چرخه شوک حرارتی در همه نمونه‌ها تا ۴۵ سیکل تکرار شد. همانگونه که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، جدایش و لایه لایه شدگی در پوشش سد حرارتی دولایه در مناطق وسیع‌تری نسبت به پوشش‌های درجه‌بندی شده اتفاق افتاده است. با توجه به شکل می‌توان اظهار نمود که نمونه پوشش سد حرارتی درجه‌بندی شده پنج لایه پس از اعمال ۴۵ چرخه شوک حرارتی تقریباً دست نخورده باقی مانده است. از این‌رو، می‌توان تایید نمود که پوشش سد حرارتی دولایه



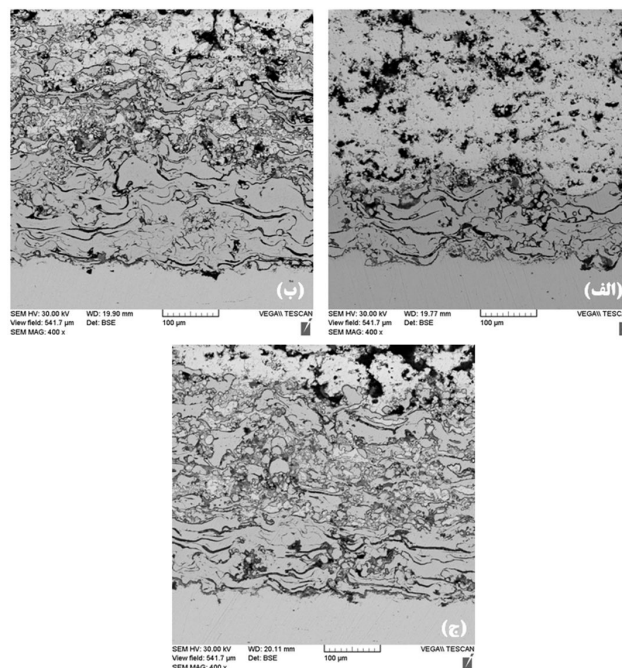
شکل ۸: سطح نمونه پوشش درجه‌بندی شده پس از اعمال شوک حرارتی در حالت (الف) پوشش دولایه معمولی، (ب) پوشش درجه بندی شده سه لایه و (ج) پوشش درجه بندی شده پنج لایه

Fig8. Surface of Thermal Barrier Coating samples after thermal shock (a) Dublex (b) 3-layer FG- TBC, (c) 5-layer FG-TBC

مقاومت کمتری در مقابل لایه لایه شدگی نسبت به پوشش درجه‌بندی شده دارد. مطابق با شکل ۸ بخش‌های وسیعی از پوشش درجه‌بندی شده سه لایه بجز لبه‌ها دست نخورده باقی مانده است. به عبارت دیگر، به دلیل شیب تند تغییرات ضریب انبساط حرارتی از لایه واسط به لایه سرامیکی، پوشش دو لایه به راحتی حین فرآیند سرمایش جدا می‌شود.

شکل ۹ توزیع تنش S_{pp} را در سیستم پوشش سد حرارتی دولایه معمولی و سیستم‌های پوشش سد حرارتی سه و پنج لایه نشان می‌دهد. همانگونه که در این شکل دیده می‌شود توزیع تنش در سیستم پوشش سد حرارتی درجه‌بندی شده پنج لایه نسبت به سیستم پوشش سد حرارتی دو لایه معمولی و سیستم پوشش سد حرارتی درجه‌بندی شده سه لایه ملایم‌تر و یکنواخت‌تر است. همچنین مقادیر تنش در فصل مشترک‌ها در پوشش سد حرارتی درجه‌بندی شده نسبت به پوشش سد حرارتی دو لایه معمولی کاهش قابل توجهی داشته است.

نتایج حاصل از شبیه‌سازی توزیع تنش نشان داد که در نمونه‌های شوک‌دیده تحت سیکل حرارتی فاقد زمان توقف در دمای تشکیل اکسید رشد یافته حرارتی، مقدار متوسط تنش ماکزیمم از ۲۹ مگاپاسکال در سیستم پوشش سد حرارتی دو لایه معمولی (فصل مشترک لایه رویی / لایه واسط) به ۱۵/۳ مگاپاسکال در سیستم پوشش سد حرارتی درجه‌بندی شده سه لایه (فصل مشترک لایه کامپوزیتی 50% NiCrAlY- 50% YSZ / ۸/۱ و ۸/۱ مگاپاسکال در سیستم پوشش سد حرارتی درجه‌بندی شده پنج لایه (فصل



شکل ۷: تصاویر حاصل از الکترون‌های برگشتی میکروسکوپ الکترونی روبشی در نمونه‌های پوشش سد حرارتی الف - دو لایه معمولی، (ب) درجه‌بندی شده سه لایه و (ج) درجه‌بندی شده پنج لایه

Fig7. BSE-SEM image of thermal barrier coating (a) Dublex (b) 3-layer FG- TBC, (c) 5-layer FG-TBC

شکل ۷ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح مقطع پولیش شده نمونه‌های پوشش سد حرارتی دو لایه معمولی و پوشش‌های درجه‌بندی شده سه و پنج لایه را نشان می‌دهد. همانگونه که در شکل ۷-الف مشاهده می‌گردد، فصل مشترک مابین لایه رویی و لایه واسط به وضوح قابل تشخیص می‌باشد. شکل ۷-ب و ۷-ج به ترتیب تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح مقطع پولیش شده نمونه پوشش سد حرارتی درجه‌بندی شده سه و پنج لایه پاشش پلاسمایی شده شوک حرارتی دیده شامل لایه واسط (NiCrAlY) و لایه روئی سرامیکی (YSZ) و لایه / لایه‌های کامپوزیتی را نشان می‌دهد. مطابق با این تصاویر لایه‌ها بخوبی بر روی هم با زبری معینی قرار گرفته و حد فاصلی بین لایه‌های مختلف دیده نمی‌شود. پوشش‌ها ساختار لایه‌ای دارند و هر لایه شامل میکروتکرک‌ها و حفرات می‌باشد که با رنگ سیاه دیده می‌شوند. لایه YSZ ساختاری نسبتاً متخلخل دارد و این تخلخل بطور پیوسته در سراسر لایه پراکنده شده است. در لایه NiCrAlY تخلخل کمتری دیده می‌شود و دارای ساختار لایه‌ای و مواج می‌باشد. ساختار لایه‌ای پوشش با موج‌های ظریف در لایه NiCrAlY معرف آن است که ذرات پودرهای فلزی به خوبی در شعله ذوب و بر روی فلز زمینه مسطح شده‌اند و تقریباً هیچ ذره ذوب نشده‌ای دیده نمی‌شود.

شکل ۸ ظاهر نمونه‌های پوشش سد حرارتی دولایه معمولی و

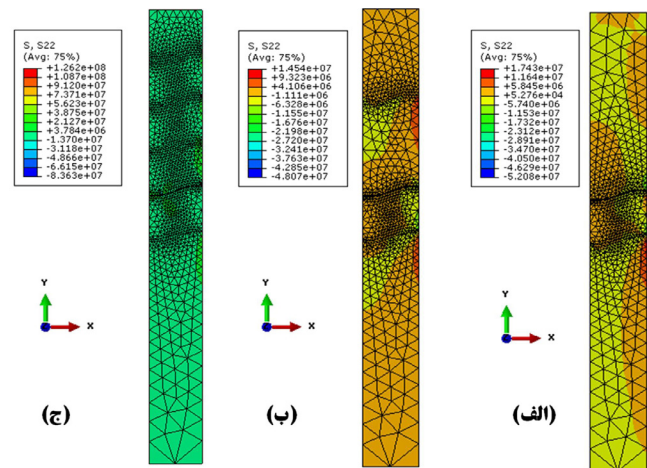
گزارش شده است که در پوشش سد حرارتی درجه بندی شده^۱ یک تغییر آهسته گرادیان ترکیب شیمیایی از سرامیک‌های مقاوم به حرارت تا فلزات مقاوم به شکست، زمینه را برای کاهش اختلاف ضرایب انبساط حرارتی فراهم کرده و منجر به کاهش تنش حرارتی فصل مشترک که بدلیل عدم تطابق ضرایب انبساط حرارتی رخ می‌دهد، می‌گردد. نتیجه این امر، کاهش تنش‌های باقیمانده، افزایش عمر خستگی حرارتی-مکانیکی، عدم گسستگی در محل اتصال لایه‌ها، افزایش قدرت چسبندگی و بهبود کارایی بلند مدت پوشش سد حرارتی خواهد بود [۴۵ و ۴۶]. نکته قابل ملاحظه دیگر، روند و شیب کندتر تغییرات تنشی در سیستم‌های پوشش سد حرارتی درجه بندی شده نسبت به سیستم پوشش سد حرارتی معمولی است که ناشی از همان اختلاف کمتر ضرایب انبساط حرارتی در فصل مشترک لایه واسط/لایه رویی سرامیکی است. این مساله به نوبه خود باعث کاهش احتمال رشد ترک و گسستگی خستگی ناشی از بارگذاری حرارتی سیکلی در منطقه فصل مشترک می‌گردد و باعث افزایش استحکام فصل مشترک و افزایش عمر سیستم می‌گردد. در مجموعه سیستم پوشش سد حرارتی، تنش در حالت درجه بندی شده بطور قابل ملاحظه‌ای کمتر از پوشش دو لایه معمولی می‌باشد. نکته قابل ملاحظه این است که این کاهش تنش که عامل بسیار موثر و قابل توجهی در طراحی مهندسی و افزایش عمر و بازدهی موتور توربوفن می‌باشد، بدون انجام تغییرات اساسی و گران‌قیمت در سیستم و فقط با اعمال درجه بندی بین لایه‌ها بدست آمده است. همانگونه که پیش‌تر اشاره شد، دلیل این بهبود کارایی کاهش اختلاف ضرایب انبساط حرارتی بین لایه‌های مختلف است.

شکل ۱۰ توزیع تنش بر روی فصل مشترک زبر و با پستی و بلندی لایه واسط/لایه رویی سرامیکی را در پوشش سد حرارتی دو لایه معمولی و پوشش سد حرارتی درجه بندی شده سه لایه نشان می‌دهد. مطابق با شکل ۱۰ به دلیل عدم تطابق ضرایب انبساط حرارتی مابین دو لایه عایق سرامیکی و لایه واسط و بالاتر بودن این فاکتور در لایه واسط، تنش کششی در دره و تنش فشاری در قله فصل مشترک ایجاد می‌گردد و این مناطق بعنوان نواحی تمرکز تنش درون سیستم در نظر گرفته می‌شوند و حساس به جوانه زنی ترک خواهند بود. این الگوی توزیع تنش در پوشش دو لایه معمولی دیده می‌شود. روند یکنواخت توزیع تنش در منطقه فصل مشترک لایه واسط/لایه رویی در پوشش سد حرارتی درجه بندی شده باعث افزایش استحکام فصل مشترک و در نتیجه افزایش عمر سیستم می‌گردد.

مشترک لایه کامپوزیتی YSZ / 25% NiCrAlY- 75% YSZ کاهش یافته است. در پوشش سد حرارتی، ماده سرامیکی به علت دارا بودن ضریب انتقال حرارت کم و مقاومت زیاد در مقابل درجه حرارت، درجات حرارت بالا را تحمل نموده و زیرلایه سوپراآلیاژی را در برابر تخریب‌های ناشی از دمای بالا حفاظت می‌کند [۳۹ و ۴۲ و ۴۳]. در عین حال، در پوشش‌های سد حرارتی دو لایه معمولی، به علت استحکام ضعیف پیوند آن‌ها، اختلاف بین ضرایب انبساط حرارتی لایه رویی با لایه واسط که منجر به ایجاد تنش‌های بالا می‌گردد، منجر به دوام کم این پوشش‌ها در طول چرخه‌های حرارتی می‌شود [۳۸]. در این پوشش‌ها معمولاً پوسته شدن، ورقه شدن و شکست زودهنگام تحت بارگذاری‌های حرارتی و مکانیکی رخ می‌دهد [۳ و ۴].

گزارش شده است که در سیستم سد حرارتی شامل لایه رویی عایق سرامیکی، لایه واسط فلزی و زیرلایه سوپراآلیاژی (با ترکیب شیمیایی مشابه پوشش لایه واسط) ضعیف‌ترین ناحیه از لحاظ استحکام پیوندی، فصل مشترک لایه رویی سرامیکی/ لایه واسط فلزی است و در آزمون کشش نیز شکست در این ناحیه رخ می‌دهد [۱۸ و ۴۴].

مطابق با شکل ۹ به دلیل عدم تطابق ضرایب انبساط حرارتی در فصل مشترک مابین دو لایه رویی عایق سرامیکی و لایه واسط، مناطق قله، دره و نزدیک قله در فصل مشترک سینوسی به‌عنوان نواحی تمرکز تنش درون سیستم در نظر گرفته می‌شوند و حساس به جوانه زنی ترک خواهند بود. در پوشش سد حرارتی درجه بندی شده به دلیل حضور لایه کامپوزیتی مابین لایه رویی سرامیکی و لایه واسط، اختلاف ضرایب انبساط حرارتی کمتری مابین لایه‌ها وجود دارد و این منشا کاهش خواص نامطلوب وابسته به استحکام پیوند نظیر تنش می‌گردد.

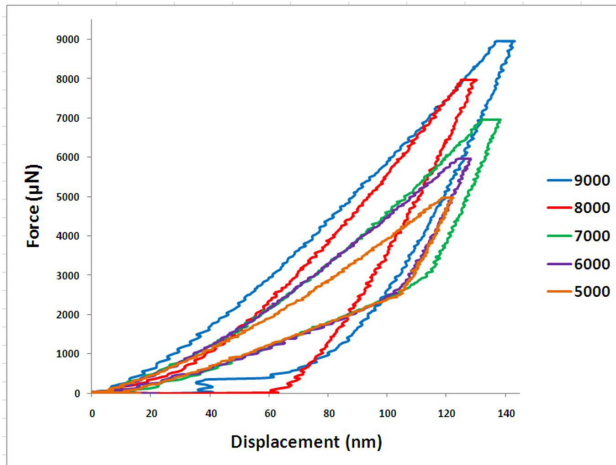


شکل ۹: توزیع تنش S22 (بر حسب پاسکال) در سیستم پوشش سد حرارتی الف) دو لایه معمولی، ب) درجه بندی شده سه لایه و ج) درجه بندی شده پنج لایه.
Fig9. Stress distribution in (a) duplex TBC, (b) 3-layer FG-TBC and (c) 5-layer FG-TBC

نانوفرورونده با نیروهای مختلف در راستای عمود بر سطح مقطع نمونه پوشش سد حرارتی درجه‌بندی شده شوک دیده سه لایه و در نقاط مختلف در محدوده لایه رویی اعمال شد. خروجی سیستم نافرورونده نمودار نیرو-عمق نفوذ نافرورونده بود. این نمودار حاوی اطلاعات ارزشمندی در ارتباط با خواص مکانیکی لایه رویی پوشش است.

در شکل ۱۱، منحنی‌های بار-عمق نفوذ نافرورونده حاصل از اعمال فرورونده بر کوویچ در راستای عمود بر سطح مقطع لایه رویی در سیستم پوشش سد حرارتی درجه‌بندی شده سه لایه شوک دیده به ازای نیروهای مختلف در بازه ۵۰۰۰ تا ۹۰۰۰ میکرونیوتن مشاهده می‌شود. در این نمودار سه بخش اصلی شامل مرحله بارگذاری، مکث در بار ماکزیمم و باربرداری مشاهده می‌شود. شیب نمودار در بخش اولیه از منحنی باربرداری معرف سفتی تماس (S) می‌باشد. مطابق با این شکل به ازای تمامی نیروهای اعمالی روند مشابهی در منحنی‌های بارگذاری و باربرداری مشاهده می‌شود.

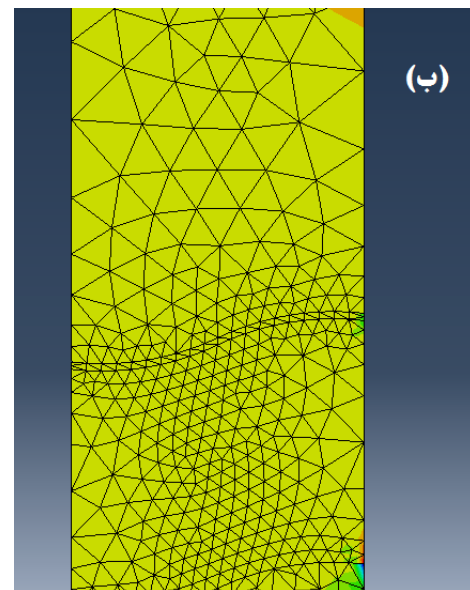
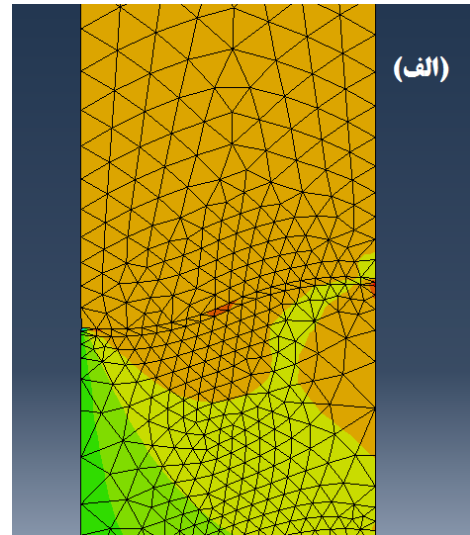
دستگاه نافرورونده مجهز به میکروسکوپ نیروی اتمی جهت کنترل و بررسی منشا اثر نفوذ در ابعاد نانو، ردیابی راستا و طول ترک‌های ایجاد شده بر روی سطح نمونه می‌باشد. شکل ۱۲ نمونه‌ای از تصاویر حاصل از میکروسکوپ نیروی اتمی را در نیروی ۶۰۰۰ میکرونیوتن نشان می‌دهد. مطابق با شکل ۸ هیچ‌گونه انباشت^۱ و یا فرورفتگی^۲ قابل ملاحظه‌ای



شکل ۱۱: منحنی‌های بار - عمق نفوذ نافرورونده حاصل از اعمال فرورونده بر کوویچ در راستای عمود بر سطح مقطع لایه رویی در سیستم پوشش سد حرارتی درجه بندی شده سه لایه شوک دیده به ازای نیروهای مختلف در بازه ۵۰۰۰ - ۹۰۰۰ میکرونیوتن

Fig11. load-depth curves of Berkovich nano-indentation perpendicular on cross section of top coat in shocked 3-layer FG-TBC for loads 5000-9000 μN

- 1 Pile Up
- 2 Sink In

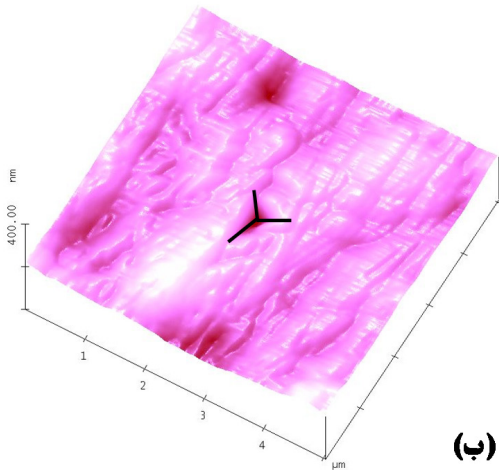


شکل ۱۰: توزیع تنش در فصل مشترک سیستم پوشش سد حرارتی الف-معمولی ب-درجه‌بندی شده سه لایه.

Fig10. Stress in interface of thermal barrier coating (a) Duplex (b) 3-layers FG-TBC

۲-۳. تعیین تنش به روش نافرورونده

در این مطالعه تنش در سیستم پوشش سد حرارتی با استفاده از روش نافرورونده تعیین شد. در این راستا، با استفاده از رویکرد تکنیک شکست نافرورونده، منشا اثر فرورونده از نقطه نظر طول ترک‌های ایجاد شده در رئوس فرورفتگی مثلی ایجاد شده مورد بررسی قرار گرفت. به این منظور نمونه پوشش سد حرارتی درجه‌بندی شده شامل سه لایه متشکل از زیرلایه، لایه واسط، لایه کامپوزیتی و نهایتاً لایه سرامیکی در نظر گرفته شد. جنس لایه‌های فوق‌الذکر به ترتیب سوپرآلیاژ هاستلوی، ترکیب NiCrAlY، لایه کامپوزیتی NiCrAlY + 50% YSZ و لایه زیرکونیای تقویت شده با ایتریا می‌باشد. نمونه مورد آزمایش تحت چرخه شوک حرارتی معرفی شده در روش تحقیق قرار گرفته و حاوی لایه اکسید رشد یافته حرارتی بود.



(ب)

شکل ۱۲: تصویر میکروسکوپ نیروی اتمی از محل اعمال نانو فرورونده در لایه روئی پوشش سد حرارتی درجه‌بندی شده شوک دیده تحت نیروی ۶۰۰۰ میکرونیوتن.
Fig12. AFM image of Berkovich Nano-indentation perpendicular on the top coat in thermal shocked FG-TBC

جدول ۴: نتایج محاسبه مدول یانگ و سختی در پوشش سد حرارتی درجه‌بندی شده سه لایه شوک دیده

Table4. Young's modulus and Hardness in thermal shocked 3- layer FG-TBC

بار p	مدول الاستیک کاهش یافته E_f	مدول الاستیک فرورونده E_i	ضریب پواسون فرورونده ν_i	ضریب پواسون پوشش ν	مدول یانگ پوشش E	سختی پوشش H
۴۰۰۰	۱۷۰	۱۱۴۱	۰/۰۷	۰/۲۵	۱۹۸/۸۱	۱۰/۰۳
۵۵۰۰	۲۱۵/۷	۱۱۴۱	۰/۰۷	۰/۲۵	۲۶۴/۶۴	۱۳/۳
۶۵۰۰	۲۳۸/۸	۱۱۴۱	۰/۰۷	۰/۲۵	۳۰۰/۴۴	۱۴/۶۸
۸۰۰۰	۱۶۷/۱	۱۱۴۱	۰/۰۷	۰/۲۵	۱۹۴/۸۴	۱۰/۹
۸۵۰۰	۱۹۹/۶	۱۱۴۱	۰/۰۷	۰/۲۵	۲۴۰/۷۳	۱۳/۸۴
۹۰۰۰	۲۱۷/۵	۱۱۴۱	۰/۰۷	۰/۲۵	۲۶۷/۳۷	۱۴/۵۴
۹۵۰۰	۱۳۰/۷	۱۱۴۱	۰/۰۷	۰/۲۵	۱۴۶/۹۴	۷/۱۸

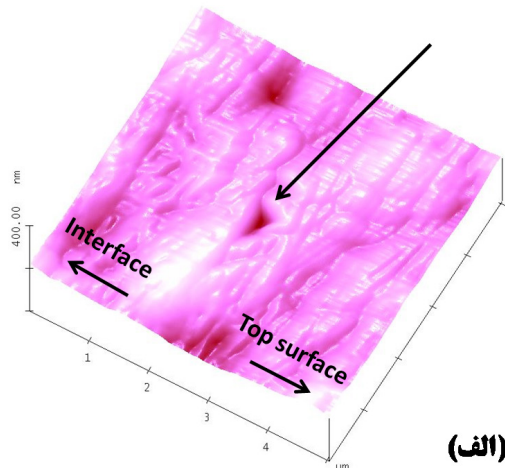
مقدار چقرمگی محاسبه شده در تطابق قابل قبولی با مقادیر گزارش شده قبلی است [۳۵ و ۴۸]. تفاوت اندک در مقادیر محاسبه شده و مقادیر گزارش شده می‌تواند به علت اختلاف در میزان تخلخل پوشش‌ها و وجود احتمالی ساختارهای غیرهموزن در پوشش باشد [۴۹].

در پایان سیکل حرارتی تشکیل اکسید رشد یافته حرارتی، توزیع تنش‌های نرمال S11 (بر حسب پاسکال) در مناطق مختلف سیستم پوشش سد حرارتی درجه‌بندی شده سه لایه تنش‌ها در لایه رویی غالباً فشاری هستند. مقدار عددی متوسط تنش در این محدوده ۰/۱۵۱ مگاپاسکال است. همانگونه که در جدول ۸ قابل مشاهده است نتایج حاصل از شبیه‌سازی تطابق خوبی با نتایج آزمایش تجربی اندازه‌گیری تنش به روش نانوفرورونده دارد.

در اطراف محل منشأ اثر فرورونده مشاهده نمی‌شود، بنابراین فرمول‌های ارائه شده در بخش روش تحقیق بدون نیاز به انجام اصلاحات بر روی سطح تماس تصویر شده فرورونده (A_p) قابل کاربرد خواهند بود [۴۷]. با استفاده از نمودار نیرو-جابجایی و با استفاده از روابط ارائه شده در بخش روش تحقیق سختی و مدول یانگ لایه سطحی محاسبه شد. نتایج در جدول ۴ گزارش شده است. مقدار متوسط سختی و مدول یانگ در محاسبه چقرمگی شکست و تنش لایه رویی پوشش سد حرارتی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

با استفاده از تصاویر میکروسکوپ نیروی اتمی و نرم‌افزار پردازش تصاویر، راستا و اندازه ترک‌های شعاعی در امتداد رئوس اثر فرورونده تعیین شد. نمونه‌ای از تصاویر میکروسکوپ نیروی اتمی با مشخص شدن راستای ترک‌های شعاعی به ازای نیروی ۶۰۰۰ میکرونیوتن در شکل ۱۲ نشان داده شده است. با استفاده از تصاویر میکروسکوپ نیروی اتمی و نرم‌افزار پردازش تصاویر، طول ترک‌های شعاعی در سه راستای c_1 ، c_2 و c_3 تعیین شد و مقدار میانگین طول ترک c در محاسبات تنش مورد استفاده قرار گرفت. نتایج در جدول ۵ گزارش شده است.

با رسم نمودار $\frac{P}{C^{1/5}}$ بر حسب $C^{4/5}$ و برازش نمودن خط به داده‌ها، شیب و عرض از مبدا خط حاصل به دست خواهد آمد. شکل ۱۳ نمودار مربوطه را نشان می‌دهد. در شکل ۱۳ شیب خط برازش شده به داده‌ها برابر با $(\frac{-2\sigma}{\sqrt{\pi x_i}})$ و عرض از مبدا معادله برازش شده معادل با (K_{IC}/X_i) است. با استفاده از مقادیر متوسط سختی و مدول یانگ محاسبه شده در جدول ۵ مقدار ثابت X تعیین می‌شود. نتایج محاسبات انجام شده در جدول ۶ گزارش شده است. در مرحله بعد با معادل قرار دادن عدد شیب نمودار با عبارت $(\frac{-2\sigma}{\sqrt{\pi x_i}})$ مقدار تنش در راستای محور X در محدوده پوشش رویی نمونه پوشش سد حرارتی سه لایه شوک دیده تعیین می‌شود. نتایج محاسبات مربوط به تعیین تنش در لایه رویی پوشش سد حرارتی درجه‌بندی شده سه لایه شوک دیده در جدول ۶ و نتایج محاسبات مربوط به تعیین تانفس شکست در جدول ۷ گزارش شده است.



(الف)

جدول ۷: نتایج محاسبه تنش در لایه رویی پوشش سد حرارتی درجه بندی شده سه لایه شوک دیده

Table7. Measured stress on the top coat of thermal shocked 3-layer FG-TBC

عرض از مبدا	X	H_{avg} (GPa)	E_{avg} (GPa)	α
۶۵/۴۶۱	۱۹/۱۷	۱۱/۴۷۸	۲۱۹/۸۸۲	۰/۰۱۶

جدول ۸: مقایسه نتایج آزمون نانوفورورونده و نتایج شبیه سازی و اعتبارسنجی نتایج
Table8. Comparison of Nano-indentation test results and simulation results and result validation

نمونه	لایه	σ_{xx} (نانوفورورونده)	σ_{xx} (شبیه سازی)	خطا (درصد)
۱-FG	YSZ	۰/۱۴۸	۰/۱۵۱	۱/۹۸۷

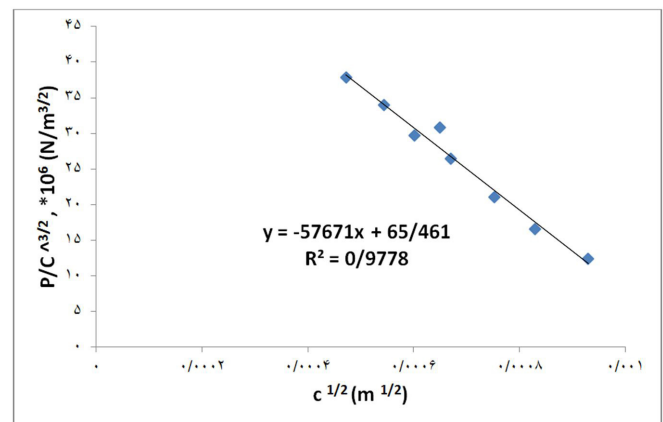
۴- نتیجه گیری

در این تحقیق هدف آن بوده است تا با استفاده از یک روش عددی مبتنی بر المان محدود، توزیع تنش در پوشش سد حرارتی NiCrAlY/YSZ پاشش پلاسمایی شده روی زیرلایه هاستلوی-ایکس شبیه سازی شود. در این پژوهش، در کنار مطالعات عددی، به منظور انجام مطالعات تجربی پوشش سد حرارتی NiCrAlY/YSZ به روش پاشش پلاسمایی اعمال شده و پس از مشخصه یابی ترکیبی و ساختاری، تنش ناشی از شوک حرارتی در آن ها به کمک روشی غیرمخرب اندازه گیری شد. در این تحقیق از روش نانوفورورونده برای اندازه گیری تنش پسماند در پوشش های سد حرارتی بهره گرفته شد و نتایج حاصل با نتایج عددی مقایسه و صحت محاسبات با آن تایید شد. از مجموع نتایج محاسباتی و تجربی حاصل از این تحقیق می توان به موارد زیر اشاره نمود:

۱. نتایج حاصل از شبیه سازی توزیع تنش حاکی از آن بود که در نمونه های شوک دیده تحت سیکل حرارتی فاقد زمان توقف در دمای تشکیل لایه اکسید رشد یافته حرارتی، مقدار متوسط تنش ماکزیمم از ۲۹ مگاپاسکال در سیستم دو لایه معمولی (فصل مشترک لایه رویی/ لایه واسط) به ۱۵/۳ مگاپاسکال در سیستم درجه بندی شده سه لایه (فصل مشترک لایه کامپوزیتی ۵۰% NiCrAlY- 50% YSZ) و ۸/۱ مگاپاسکال در سیستم درجه بندی شده پنج لایه (فصل مشترک لایه کامپوزیتی ۷۵% NiCrAlY- 25% YSZ) کاهش یافته و توزیع تنش در فصل مشترک ها یکنواخت شده است که این امر به افزایش عمر سیستم سد حرارتی کمک می کند.

۲. نتایج آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان داد که در پوشش درجه بندی شده ریزساختار، تخلخل و ترکیب شیمیایی بطور تدریجی تغییر می کند.

در این تحقیق از روش نانوفورورونده برای اندازه گیری تنش پسماند در پوشش های سد حرارتی بهره برده شده و نتایج حاصل با نتایج عددی مقایسه و صحت محاسبات با آن تایید شد



شکل ۱۳: رابطه مابین $\frac{P}{C^{3/2}}$ و $C^{1/2}$ هنگامی که نانوفورورونده عمود بر سطح مقطع لایه رویی پوشش سد حرارتی درجه بندی شده سه لایه شوک دیده وارد می شود.

Fig13. Relationships of $P/c^{1.5}$ versus $c^{0.5}$ under different thermal cycles when indented perpendicular on the top coating surface of thermal shocked 3-layer FG-TBC

جدول ۵: نتایج محاسبه طول میانگین ترک در پوشش سد حرارتی درجه بندی شده سه لایه شوک دیده

Table5. Average crack length in thermal shocked 3-layer FG-TBC

$C^{0.5}$ (m)	$10^{-6} \times (N/m.m^{0.5})$	C_{avg} (m)	C_{avg} (μm)	C_r (μm)	C_r (μm)	C_l (μm)	P (μN)
۰/۰۰۰۴۷	۳۷/۹۰	$2/23 \times 10^{-7}$	۰/۲۳	۰/۲۷	۰/۲	۰/۲	۴۰۰۰
۰/۰۰۰۵۵	۳۴/۰۴	$2/30 \times 10^{-7}$	۰/۳۰	۰/۲۶	۰/۲۶	۰/۳۷	۵۵۰۰
۰/۰۰۰۶۰	۲۹/۶۸	$3/62 \times 10^{-7}$	۰/۳۶	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۴۳	۶۵۰۰
۰/۰۰۰۶۷	۲۶/۵۰	$4/51 \times 10^{-7}$	۰/۴۵	۰/۳۶	۰/۴۳	۰/۵۶	۸۰۰۰
۰/۰۰۰۶۵	۳۰/۸۶	$4/23 \times 10^{-7}$	۰/۴۲	۰/۳۴	۰/۳۳	۰/۶	۸۵۰۰
۰/۰۰۰۷۵	۲۱/۱۰	$5/67 \times 10^{-7}$	۰/۵۷	۰/۴۳	۰/۵۷	۰/۷	۹۰۰۰
۰/۰۰۰۸۳	۱۶/۵۷	$6/91 \times 10^{-7}$	۰/۶۹	۰/۵	۰/۶۷	۰/۹	۹۵۰۰
۰/۰۰۰۹۳	۱۲/۳۹	$8/71 \times 10^{-7}$	۰/۸۷	۰/۷	۰/۸	۱/۱	۱۰۰۰۰

جدول ۶: نتایج محاسبه پارامتر X در لایه روئی پوشش سد حرارتی درجه بندی شده سه لایه شوک دیده

Table6. Measuring results of X parameter in thermal shocked 3-layer FG-TBC

X	E/H	H_{avg} (GPa)	E_{avg} (GPa)	α
۰/۰۷۰	۱۹/۱۷	۱۱/۴۷۸	۲۱۹/۸۸۲	۰/۰۱۶

- [11] Zhu, L.-N., et al., Measurement of residual stresses using nanoindentation method. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 2015. 40(2): p. 77-89.
- [12] Zhu, J., et al., Cross-sectional residual stresses in thermal spray coatings measured by moiré interferometry and nanoindentation technique. *Journal of thermal spray technology*, 2012. 21(5): p. 810-817.
- [13] Moradi, M. and E. Golchin, Investigation on the effects of process parameters on laser percussion drilling using finite element methodology; statistical modelling and optimization. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 2017. 14(3): p. 464-484.
- [14] Dean, J., G. Aldrich-Smith, and T. Clyne, Use of nanoindentation to measure residual stresses in surface layers. *Acta Materialia*, 2011. 59(7): p. 2749-2761.
- [15] Alaboodi, A.S. and Z. Hussain, Finite element modeling of nano-indentation technique to characterize thin film coatings. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, 2019. 31(1): p. 61-69.
- [16] Bäker, M., Finite element simulation of interface cracks in thermal barrier coatings. *Computational Materials Science*, 2012. 64: p. 79-83.
- [17] Li, B., et al., Design of thermal barrier coatings thickness for gas turbine blade based on finite element analysis. *Mathematical Problems in Engineering*, 2017. 2017.
- [18] Wang, L., et al., Thermal shock behavior of 8YSZ and double-ceramic-layer La2Zr2O7/8YSZ thermal barrier coatings fabricated by atmospheric plasma spraying. *Ceramics International*, 2012. 38(5): p. 3595-3606.
- [19] Moradi, M., M. Ghoreishi, and A. Rahmani, Numerical and experimental study of geometrical dimensions on laser-TIG hybrid welding of stainless steel 1.4418. *Journal of Modern Processes in Manufacturing and Production*, 2016. 5(2): p. 21-31.
- [20] Qiao, J.-H., et al., A 3D finite-difference model for the effective thermal conductivity of thermal barrier coatings produced by plasma spraying. *International Journal of thermal sciences*, 2013. 65: p. 120-126.
- [21] Khoddami, A., A. Sabour, and S. Hadavi, Microstructure formation in thermally-sprayed duplex and functionally
۳. بررسی سطح ظاهری نمونه‌ها پس از اعمال شوک حرارتی نشان داد که جدایش و لایه لایه شدگی در پوشش سد حرارتی دولایه در مناطق وسیع‌تری نسبت به پوشش‌های درجه‌بندی شده اتفاق افتاده است که این پدیده با نتایج شبیه‌سازی توافق دارد.
۴. نتایج اندازه‌گیری تنش پسماند به روش نانوفورورونده حاکی از آن است که روش طراحی شده با دقت مناسبی قادر به اندازه‌گیری تنش در در امتداد پوشش می‌باشد.

منابع و مراجع

- [1] decnavdA ,aladneM .B dna ,abzdwS .L .,M ,kyczńamteH senigne-orea ni sgnitaoc evitcetorp dna slairetam dna slairetaM ni stnemeveihcA fo lanruoJ .noitacilppa .gnireenignE gnirutcafunaM .۱۸۳-۲۷۳ .p : (۱) ۴۲ .۷۰۰۲ .
- [2] Tamarin, Y., Protective coatings for turbine blades. 2002: ASM international.
- [3] Clarke, D.R. and S.R. Phillpot, Thermal barrier coating materials. *Materials today*, 2005. 8(6): p. 22-29.
- [4] Goswami, B., A.K. Ray, and S. Sahay, Thermal barrier coating system for gas turbine application-A review. *High Temperature materials and processes*, 2004. 23(2): p. 73-92.
- [5] Smarsly, W. Coatings for advanced aero engine materials. in 8 th HIPIMS Conference. 2009.
- [6] Vaßen, R., et al., Overview on advanced thermal barrier coatings. *Surface and Coatings Technology*, 2010. 205(4): p. 938-942.
- [7] Hetmańczyk, M., L. Swadźba, and B. Mendala, Advanced materials and protective coatings in aero-engines application. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 2007. 24(1): p. 372-381.
- [8] Karaoglanlı, A., et al., Structure and durability evaluation of YSZ+ Al2O3 composite TBCs with APS and HVOF bond coats under thermal cycling conditions. *Surface and Coatings Technology*, 2011. 205: p. S369-S373.
- [9] Chen, W., et al., TGO growth and crack propagation in a thermal barrier coating. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2008. 17(5-6): p. 858.
- [10] Xu, Z.-H. and X. Li, Residual stress determination using nanoindentation technique, in *Micro and nano mechanical testing of materials and devices*. 2008, Springer. p. 136-150.

- Kadkhodapour, Micromechanics stress-strain behavior prediction of dual phase steel considering plasticity and grain boundaries debonding. *Materials & Design*, 2015. 68: p. 167-176.
- [33] Langroudi, A.E., A brief review of nanoindentation technique and its applications in hybrid nanocomposite coatings. *Int. J. Bio-Inorg. Hybd. Nanomat*, 2013. 2(2): p. 337-344.
- [34] Liu, Y., Fracture toughness assessment of shales by nanoindentation. 2015.
- [35] Mao, W., et al., Evaluation of microhardness, fracture toughness and residual stress in a thermal barrier coating system: A modified Vickers indentation technique. *Surface and Coatings Technology*, 2012. 206(21): p. 4455-4461.
- [36] Zhao, X. and P. Xiao, Residual stresses in thermal barrier coatings measured by photoluminescence piezospectroscopy and indentation technique. *Surface and Coatings Technology*, 2006. 201(3-4): p. 1124-1131.
- [37] Meng, Q., et al., Influence of the residual stress on the nanoindentation-evaluated hardness for zirconiumnitride films. *Surface and Coatings Technology*, 2012. 206(14): p. 3250-3257.
- [38] Mahade, S., et al., Failure analysis of Gd₂Zr₂O₇/YSZ multi-layered thermal barrier coatings subjected to thermal cyclic fatigue. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016. 689: p. 1011-1019.
- [39] Mohammadi, M., et al., Thermal shock properties and microstructure investigation of LVPS and HVOF-CoNiCrAlYSi coatings on the IN738LC superalloy, *Vacuum*, 2013. 88: p.124-129.
- [40] Moridi, A., M. Azadi, and G. Farrahi. Numerical simulation of thermal barrier coating system under thermo-mechanical loading. in *Word Congress on Engineering*. 2011.
- [41] Johari, A.D. and M.M. Rahman. A review of advance thermal barrier coating architecture. in *The 3rd National Graduate Conference (Nat Grad 2015)*. Malaysia: Universiti Tenaga Nasional, Putrajaya Campus. 2015.
- [42] Jin, Z.-H. and R. Batra, Some basic fracture mechanics graded NiCrAlY/Yttria-Stabilized Zirconia coatings. *Surface and Coatings Technology*, 2007. 201(12): p. 6019-6024.
- [22] Watremetz, B., M. Baietto-Dubourg, and A. Lubrecht, 2D thermo-mechanical contact simulations in a functionally graded material: A multigrid-based approach. *Tribology international*, 2007. 40(5): p. 754-762.
- [23] Zhang, X., et al., Modeling of the residual stresses in plasma-spraying functionally graded ZrO₂/NiCoCrAlY coatings using finite element method. *Materials & design*, 2006. 27(4): p. 308-315.
- [24] Saeedi, B., et al., Influence of the Thermal Barrier Coatings Design on the Oxidation Behavior. *Journal of materials science & technology*, 2009. 25(4): p. 499.
- [25] Akbarpour, S., H. Motamedian, and A. Abedian. Micromechanical FEM modeling of thermal stresses in functionally graded materials. in *26th International congress of the Aeronautical Sciences*. 2008.
- [26] Guo, L., et al., Preparation and hot corrosion behavior of plasma sprayed nanostructured Gd₂Zr₂O₇-LaPO₄ thermal barrier coatings. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017. 698: p. 13-19.
- [27] Bäker, M., Influence of material models on the stress state in thermal barrier coating simulations. *Surface and Coatings Technology*, 2014. 240: p. 301-310.
- [28] Chen, H., et al., Design, preparation, and characterization of graded YSZ/La₂Zr₂O₇ thermal barrier coatings. *Journal of the American Ceramic Society*, 2010. 93(6): p. 1732-1740.
- [29] Haynes International, I., <https://www.haynesintl.com>. HASTELLOY® X ALLOY. (1997).
- [30] Wang, L., et al., Thermal shock behavior of 8YSZ and double-ceramic-layer La₂Zr₂O₇/8YSZ thermal barrier coatings fabricated by atmospheric plasma spraying. *Ceramics International*, 2012. 38(5): p. 3595-3606.
- [31] Jiang, Y. and H. Fan, A micromechanics model for predicting the stress-strain relations of filled elastomers. *Computational Materials Science*, 2013. 67: p. 104-108.
- [32] Hosseini-Toudeshky, H., B. Anbarlooie, and J.

- [46] Khor, K. and Y. Gu, Thermal properties of plasma-sprayed functionally graded thermal barrier coatings. *Thin Solid Films*, 2000. 372(1-2): p. 104-113.
- [47] Zhu, L.-N., et al., Measurement of residual stresses using nanoindentation method. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 2015. 40(2): p. 77-89.
- [48] Marinis, A., et al., Fracture toughness of yttria-stabilized zirconia sintered in conventional and microwave ovens. *The Journal of prosthetic dentistry*, 2013. 109(3): p. 165-171.
- [49] Baig, M., et al., Properties and residual stress distribution of plasma sprayed magnesia stabilized zirconia thermal barrier coatings. *Ceramics International*, 2014. 40(3): p. 4853-4868.
- concepts in functionally graded materials. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1996. 44(8): p. 1221-1235.
- [43] Stathopoulos, V., et al., Design of functionally graded multilayer thermal barrier coatings for gas turbine application. *Surface and Coatings Technology*, 2016. 295: p. 20-28.
- [44] MANUAL, O., Aircraft characteristics airport and maintenance planning. Airbus.
- [45] Afrasiabi, A., M. Saremi, and A. Kobayashi, A comparative study on hot corrosion resistance of three types of thermal barrier coatings: YSZ, YSZ+ Al₂O₃ and YSZ/Al₂O₃. *Materials Science and Engineering: A*, 2008. 478(1-2): p. 264-269.