



تحلیل عددی و تجربی جدایش پوشش‌های سد حرارتی تحت بارگذاری خستگی حرارتی

سهیل نخودچی^{۱*}، حسین ابراهیمی^۲

۱- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

۲- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

*تهران، صندوق پستی ۱۹۹۹-۱۳۹۵، snakhodchi@kntu.ac.ir

چکیده

پوشش‌های سد حرارتی به عنوان محافظه حرارتی در قطعاتی که در شرایط کاری دمای بالا کار می‌کنند، استفاده می‌شوند. این پوشش‌ها عموماً شامل سه لایه که به ترتیب پوشش فوکانی سرامیکی، لایه‌ی اکسید رشدکننده و لایه‌ی پوشش پیوندی نامیده می‌شوند، می‌باشند. با توجه به فرآیند ساخت و ساختار ویژه پوشش‌های سد حرارتی، مکانیزم واماندگی این پوشش‌ها متأثر از بارگذاری‌های روی قطعه پوشش داده شده می‌باشد. در این مقاله جدایش این پوشش‌ها تحت بارگذاری تناوبی حرارتی به روش عددی و تجربی بررسی شده است. نمونه‌ای از اینکوئل 617 که به روش پاشش هوا-پلاسمای پوشش دهی شده با استفاده از یک دستگاه تست با قابلیت اعمال بار خشی چهارگانه‌ای، تحت بارگذاری تناوبی حرارتی با دمای بیشینه‌ی سیکل 1170°C به همراه بار خشی مکانیکی تابت Nmm 7500 قرار گرفته است. آزمایش انجام‌شده تا رسیدن پوشش‌ها دامنه داشته که در حين انجام آزمایش‌ها دمای روی سطوح نمونه اندازه‌گیری شده است. مدلسازی اجزا محدود با نرم‌افزار ABAQUS برای شبیه‌سازی شرایط بارگذاری حرارتی و مکانیکی آزمایش انجام‌شده و از مدل ناحیه‌ی چسبنده برای مدلسازی جدایش پوشش فوکانی و واماندگی پوشش استفاده شده است. در انتها با انجام سعی و خطأ در مقدایر خواص چسبنده، نتایج اجزا محدود بر نتایج آزمایش منطبق شده و خواص چسبنده‌ی بین‌سطحی برای این پوشش‌ها بر این اساس تخمین زده شد.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۰۷ آذر ۱۳۹۴

پذیرش: ۲۶ بهمن ۱۳۹۴

ارائه در سایت: ۲۴ اسفند ۱۳۹۴

کلید واژگان:

پوشش‌های سدحرارتی

مکانیزم‌های تحریب

آزمایش بارگذاری تناوبی حرارتی - مکانیکی

مدل ناحیه‌ی چسبنده

Numerical and Experimental Analysis of Thermal Barrier Coatings Delamination under Cyclic Thermal Loading

Soheil Nakhodchi^{*}, Hossein Ebrahimi

Department of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

* P.O.B. 1999-19395, Tehran, Iran, snakhodchi@kntu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 28 November 2015

Accepted 15 February 2016

Available Online 14 March 2016

Keywords:

Thermal Barrier Coating

Failure Mechanisms

Thermomechanical Cyclic Experiment

Cohesive Zone Model

ABSTRACT

Thermal Barrier Coatings (TBC) are used as thermal protective for components operating at high temperature. These coatings normally have three layers of: ceramic top coat, thermally grown oxide and the bond coat layer. Due to the manufacturing process and the special structure of a TBC system, failure mechanisms of these coatings are affected by both thermal and mechanical loads introduced to the coated part. In this paper delaminations of TBC layers subjected to the cyclic thermal loads have been numerically and experimentally studied. A rectangular specimen made of Inconel 617 coated by air plasma spray (APS) method was loaded in a specific design test setup with capability of simultaneously applying a constant four point bending load and thermal cyclic loadings. The thermal cycles were carried out until the coating was spalled out. The temperature of the specimen surfaces was measured and recorded during the test. Finite elements modeling was also performed using ABAQUS to simulate the the experiment. A cohesive zone model was used to simulate the top coat delamination. Finally, using a trial and error approach on the cohesive properties, finite elements results have been adapted on the experimental results and interfacial cohesive properties have been estimated.

سد حرارتی از طریق افزایش یک لایه با رسانایی حرارتی کم، میزان نرخ حرارت منتقل شده به قطعات را پایین می‌آورند [۱]. عمر قطعات پوشش داده شده متأثر از عمر پوشش‌ها بوده و در نتیجه افزایش دانش در خصوص چگونگی واماندگی این پوشش‌ها تاثیر قابل توجهی در افزایش دانش طراحی و طول عمر قطعات خواهد داشت. اولین کاربردهای پوشش‌های سد حرارتی را می‌توان مربوط به اوایل دهه ۵۰ میلادی دانست که از این پوشش‌ها در محافظت از قطعات ساخته شده از

یکی از روش‌های متدائل در جلوگیری از واماندگی زودهنگام قطعاتی مانند اجزای داخلی توربین‌های گازی که در معرض حرارت بالا قرار دارند، استفاده از پوشش‌های سد حرارتی^۱ است. این پوشش‌ها ابتدا برای محافظت از قطعات تحت حرارت بالا در نازل موشک‌ها و سپس برای محافظت از پره‌های توربین گاز در مسیر گازهای داغ و افزایش عمر آن‌ها بکار برده شده است. پوشش‌های

^۱ Thermal Barrier Coatings (TBCs)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

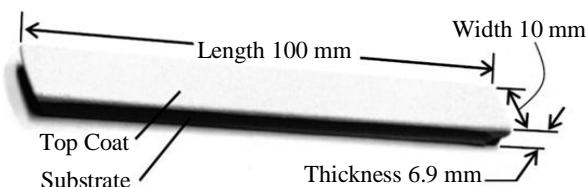
S. Nakhodchi, H. Ebrahimi, Numerical and Experimental Analysis of Thermal Barrier Coatings Delamination under Cyclic Thermal Loading, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 3, pp. 285-294, 2016 (in Persian)

در این مقاله جدایش در یک پوشش سد حرارتی که تحت بارگذاری تناویی حرارتی به همراه بار خمشی ثابت قرار دارند، به صورت عددی و آزمایشگاهی بررسی شده است. تست آزمایشگاهی نمونه‌های پوشش‌داده شده در دستگاه تستی که به همین منظور ساخته شده انجام می‌شود به نحوی که نمونه تحت بار خمشی ثابت و معلوم حاصل از خمش چهار نقطه‌ای، قرار گرفته و همزمان سیکل‌های حرارتی نمونه را بین دمای بیشینه 1170°C و دمای کمینه 20°C قرار می‌دهد. سپس با استفاده از شرایط مرزی دمایی و مکانیکی استخراج شده از آزمایش‌های انجام شده، یک مدل اجزا محدود توسعه داده شده است. در مدل اجزا محدود، جزئیات در حد امکان لحاظ شده است تا بتوان جدایش پوشش فوقانی از سایر لایه‌ها را مدلسازی نمود. علاوه بر آن به کمک نتایج بدست آمده از آزمایش و مدلسازی، خواص چسبندگی پوشش تقریب زده شده است.

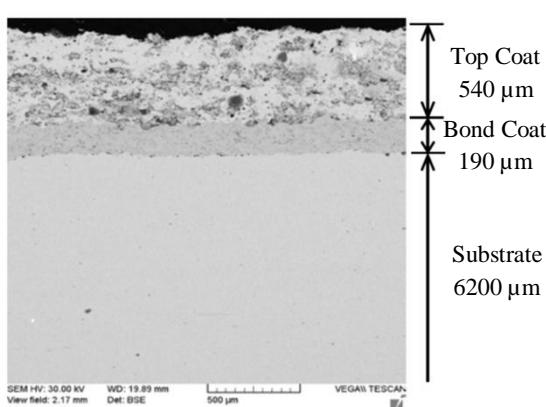
۲- آزمون تجربی

نمونه مورد استفاده در آزمایش از جنس سوپرآلیاژ پایه‌نیکل اینکومن 617، با ابعاد تقریبی طول 100 mm، عرض 10 mm و ضخامت 6.2 mm می‌باشد (شکل ۱). فرآیند پوشش دهی به روش پاشش "هو-پلاسمای" انجام شده است. که در این فرآیند از پودر Ni22Cr10Al1Y برای پوشش پیوندی و از پودر ZrO₂-8wt% Y₂O₃ در پوشش فوقانی استفاده شده است. در شکل ۲ تصویر گرفته شده با میکروسکوپ الکترونی از سطح مقطع قطعه پوشش داده مورد آزمایش در این پژوهش، نشان داده که ضخامت‌های اندازه‌گیری شده هر یک از لایه‌ها را نشان می‌دهد. شکل ۳ به صورت شماتیک انجام فرآیند پاشش هو-پلاسمای باعث شده که ضخامت‌های اندازه‌گیری شده هر یک از لایه‌ها را نشان می‌دهد.

آزمایش‌ها در واقع به نحوی طراحی شده‌اند که مشابه شرایط کاری قطعات صنعتی باشند و با استفاده از یک دستگاه خستگی حرارتی، که توان



شکل ۱ نمایش پوشش و زیرلایه اصلی در نمونه با ابعاد مشخص شده



شکل ۲ ریزساختار و ضخامت لایه‌های پوشش سد حرارتی قبل از انجام آزمایش‌ها

جنس سوپرآلیاژ، استفاده شد و باعث افزایش عمر سوپرآلیاژها گردید. پس از آن در سال 1960 از پوشش‌های پاشش شده با شعله^۱ در کاربرد موشکی استفاده شد تا از واماندگی نایهنجام محفظه احتراق جلوگیری شود. علاوه بر این در اوخر همان دهه، از این پوشش‌ها برای محافظت از قطعات تحت حرارت بالا در نازل موشک‌ها استفاده شد. شروع استفاده از این پوشش‌ها در کاربردهای کم خطر هوایی در اوایل دهه ۷۰ میلادی به وقوع پیوست و توسعه‌ی پوشش‌های سد حرارتی نوین برای کاربرد در موتور هوایی‌ها و بر روی پرهی توربین‌های گاز هوایی و زمینی انجام شد. این فرآیندها به مرور منجر به استفاده‌ی تجاری از این پوشش‌ها در محافظه‌های احتراق حرارتی هم‌زمان تحقیقات بر روی مواد مختلف برای پوشش‌های پاشش شده‌ی حرارتی ادامه یافت و از موادی چون اکسید الومینیوم و زیرکونیا پایدارشده با ایتریا در این پوشش‌ها استفاده شد [۱].

پوشش‌های سد حرارتی به منظور تأمین سه کاربرد مهم عایق نمودن حرارتی، محافظت از زیرلایه اصلی در برابر اکسایش و داشتن خواص مکانیکی مناسب باید دارای لایه‌های پوشش فوقانی^۲ و پوشش پیوندی^۳ تأمین گردد. این پوشش شامل لایه‌های پوشش فوقانی^۲ و پوشش پیوندی^۳ است که بر روی زیرلایه اصلی^۴ یا همان قطعه‌ی مورد پوشش قرار گرفته‌اند. همچنین بر اثر حرارت اعمالی بالا بر این پوشش‌ها به مدت بسیار طولانی مدت، لایه اکسید الومینیوم به ضخامت تقریبی ۰.۵ μm بین پوشش فوقانی و پیوندی ایجاد می‌شود.

پوشش فوقانی سرامیکی بوده و دارای ضخامت تقریبی بین ۱۰۰ تا ۵۰۰ μm می‌باشد که معمولاً از جنس ZrO₂-8wt% Y₂O₃ بوده و با استفاده از روش پاشش هو-پلاسمای^۵ [۲] و یا با روش رسوب فیزیکی بخار با پرتو الکترونی^۶ [۳] ایجاد می‌گردد. این لایه مانند عایق حرارتی عمل کرده و دمای زیرلایه اصلی را کاهش می‌دهد.

لایه پوشش پیوندی از جنس MCrAlY یا MCrAlY (Pt,Ni)Al با ضخامت تقریبی بین ۱۰۰ تا ۲۰۰ μm بوده و فرمول متداول آن را می‌توان به صورت MCrAlY نشان داد، که در آن M مخفف نیکل یا کبات و یا ترکیبی از هر دو است. فرآیند تولید این پوشش شامل فرآیندهای رسوب فیزیکی بخار با پرتو الکترونی، پاشش خلا پلاسمای^۷ یا پاشش کم‌فشار پلاسمای^۸ و اکسی‌سوخت سرعت بالا^۹ است [۴]. این پوشش پیوندی در بالای زیرلایه اصلی ایجاد می‌شود تا یک پیوند شیمیایی بهتر بین پوشش فوقانی و زیرلایه اصلی ایجاد کند.

بزرگترین ضعف سیستم‌های پوشش سد حرارتی، سطح مشترک پوشش پیوندی و پوشش فوقانی است [۵-۷]. این ناچیه به دلیل اختلاف ضربی انبساط حرارتی پوشش پیوندی و پوشش فوقانی تحت تنش بالا قرار می‌گیرد، لذا آسیب‌های مشاهده شده در پوشش‌ها عموماً از این ناچیه آغاز می‌شود. پژوهش‌های زیادی در خصوص بررسی جدایش پوشش‌های سد حرارتی انجام شده است که در اغلب این پژوهش‌ها نمونه کوچک آزمایشگاهی بررسی شده و نتایج به مقیاسهای بزرگتر تعیین می‌یابد. لیکن منابع بسیار محدودی در خصوص تعیین خواص چسبندگی لایه وجود دارد [۱-۹].

¹ Flame Sprayed Coatings

² Top Coat (TC)

³ Bond Coat (BC)

⁴ Substrate

⁵ Air Plasma Spraying (APS)

⁶ Electron Beam Physical Vapour Deposition (EB-PVD)

⁷ Vacuum Plasma Spray (VPS)

⁸ Low-Pressure Plasma Spray (LPPS)

⁹ High Velocity Oxy-Fuel (HVOF)

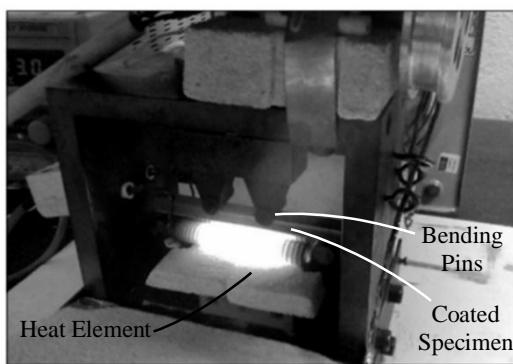


Fig. 4 Thermo-mechanical test setup

شکل ۴ دستگاه آزمایش حرارتی - مکانیکی

اصلی در دمای محیط براساس خواص ارائه شده در جداول ۴ و ۵ استفاده شده است. علت ارائه این شکل، نشان دادن میزان تنش طولی در نمونه و لایه های پوشش بر اثر بارگذاری خمس چهار نقطه ای می باشد.

۱-۱- اندازه گیری های دما

چنانچه که در شکل ۷ نشان داده شده است، هفت نقطه ای A, B, C, D, E, F و G روی سطح پوشش با اندیس C و روی سطح بیرونی زیر لایه ای اصلی با اندیس S در نظر گرفته می شود به طوری که فاصله ای بین هر دو نقطه ای مجاور روی یک سطح ۱۵ mm باشد. اولین نقطه از هر دو سمت لبه نمونه، تقریباً در محل تکیه گاهها واقع است و از لبه نمونه تقریباً ۵ mm فاصله خواهد داشت. در آزمایش های انجام شده پس از گذشت ۳۶۰ ثانیه از روش شدن المنت ها و بسته شدن درب کوره، تغییرات دما تقریباً ناچیز شده و توزیع دمای ثابت شده و بیشینه ن نقاط، اندازه گیری شده که به صورت منحنی شکل ۸ رسم شده است. همان طور که در شکل ۸ مشاهده می شود، در راستای طول نمونه یک گرادیان حرارتی ایجاد شده است که وسط نمونه دارای بیشترین درجه حرارت و بیشترین گرادیان حرارتی در طول نمونه در دو انتهای نمونه بوده و به عنوان مثال در محدوده ای A_c, B_c, C_c, D_c, E_c, F_c و G_c می باشد.

دمای گذرا ن نقاط D_c و D_s که بیشترین دما را روی نمونه تجربه می کنند برای یک سیکل حرارتی، اندازه گیری و در منحنی شکل ۹ رسم شده است. با اندازه گیری دمای سایر نقاط موجود در شکل ۷ در طی سیکل حرارتی، منحنی هایی شبیه شکل ۹ بدست آمده است که دمای بیشینه این منحنی ها در نقاط روی سطح پوشش و سطح بیرونی زیر لایه ای اصلی، در منحنی شکل ۸ نشان داده شده است. شکل ۹ دمای گذرا در نقاط رو بروی المنت و پشت نمونه را در نقاط وسط نمونه نشان می دهد که حداقل دمای تجربه شده توسط نمونه می باشند. این نقاط همانطور که توضیح داده شده توسط ترموموکوپله ای نصب شده روی نمونه اندازه گیری شده است.

۲- نتایج آزمایش بارگذاری تناوبی حرارتی

بکی از روش های تشخیص جدایش پوشش ها، معیار تخریب بر اساس بازرسی چشمی سطح پوشش است به گونه ای که اگر طول ترکهای سطحی و یا ریزش پوشش از یک حد بحرانی تعريف شده بیشتر شود، تخریب نمونه گزارش می شود. در اکثر پژوهش های صورت گرفته این حد بحرانی ۱۰-۲۰% در نظر گرفته شده است [13]. به عبارت دیگر اگر ۱۰ تا ۲۰ درصد کل سطح پوشش تحت بارگذاری مشخص از زیر لایه جدا شده و یا ریزش کند، تخریب گزارش داده می شود [13]. در این پژوهش نیز از این معیار تخریب برای تشخیص تخریب ناشی از آزمایش، استفاده شده است.

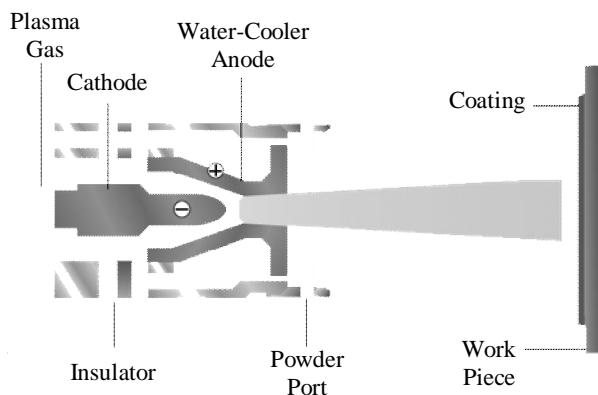


Fig. 3 Schematic figure of air plasma spraying process

شکل ۳ شکل شماتیک فرآیند پاشش هوای پلاسما

اعمال بار خمثی مکانیکی چهار نقطه ای را به طور همزمان دارد [12]، انجام شده است. این دستگاه از یک محفظه، فن و یک مدار کنترل تشکیل شده و محفظه دستگاه که نمونه در آن قرار می گیرد، هم نقش کوره و هم نقش محیط خنک کننده را دارد. محفظه دارای ابعاد داخلی ۱۲۰×۱۲۰ mm و دیواره هایی به ضخامت ۱۵ mm می باشد.

دستگاه تست برای حرارت دادن نمونه ها از المنت های حرارتی و برای سرد کردن نمونه از یک فن با دور موتور rpm 2800 استفاده می نماید. هنگام حرارت دهی، درب های دستگاه بسته، محفظه نسبتاً ایزوله شده و المنت ها به صورت خودکار روشن شده و شروع به گرم شدن می کنند. با افزایش درجه ای حرارت المنت ها، دمای نمونه نیز افزایش پیدا می کند. در هنگام سرد کردن نمونه، المنت های حرارتی خاموش شده، دو درب محفظه باز می گردد و نمونه به وسیله ای فن تعبیه شده جلوی محفظه، توسط هوا خنک کاری می شود.

میزان زمان حرارت دهی، زمان سرد کردن، باز و بسته شدن درب ها و خاموش و روشن شدن المنت و فن به وسیله ای مدار کنترل دستگاه قبل تنظیم است. جهت اندازه گیری دما در حین آزمایش، از چند ترموموکوپل نوع K با قابلیت اندازه گیری دما در بازه ۰°C تا 1370°C و یک مازول دیافت داده که مخصوص دریافت داده های انواع ترموموکوپل است، استفاده شده است. ابتدا نمونه همان طور که در شکل ۴ نشان داده شده، به نحوی که سطح پوشش داده شده آن روی پین های دستگاه و مقابله المنت حرارتی باشد، قرار داده شده و به وسیله المنت، حرارت داده می شود. به منظور متشابه ساختن با شرایط کاری قطعه در محیط واقعی، در آزمایش های انجام شده هنگام آزمایش تناوبی حرارتی، بارگذاری خمثی ثابت N 500 نیز همان گونه که در ادامه توضیح داده خواهد شد، بر نمونه ها اعمال گردیده است. هندسه ای بارگذاری مکانیکی چهار نقطه ای که در آزمایش های انجام شده هنگام آزمایش نشان داده شده است. فاصله هر دو تکیه گاه مجاور 30 mm می باشد. با نیروی اعمالی N 500 بر دو تکیه گاه وسط، طبق شکل ۵ (ب)، ممان خمثی ثابت M_B = 7500 Nmm بین دو تکیه گاه وسط، بر قطعه اعمال می شود.

با توجه به ابعاد تقریبی سطح مقطع نمونه (10×6.9 mm) و ضخامت لایه ها که در شکل ۲ نشان داده شده است، ممان خمثی ثابت در ناحیه ای بین دو تکیه گاه وسط، تنشی در راستای طول قطعه یا محور x ایجاد می کند که توزیع آن بین دو تکیه گاه وسط در راستای ضخامت قطعه با توجه به خمث در تیرهای مرکب، به صورت شکل ۶ محاسبه و ترسیم شده است. برای رسم این منحنی از خواص مدول الاستیسیته ای لایه های پوشش و زیر لایه ای

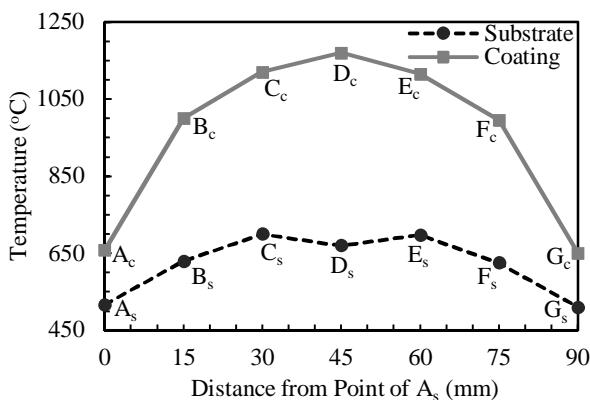


Fig. 8 دمای بیشینه نقاط روی پوشش و سطح بیرونی زیرلایه در طول قطعه

شکل 8 دمای بیشینه نقاط روی پوشش و سطح بیرونی زیرلایه در طول قطعه

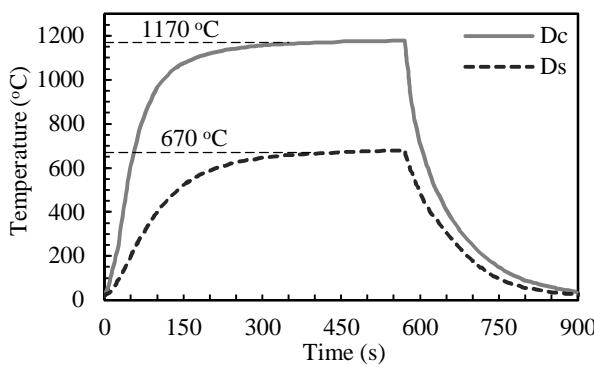


Fig. 9 تغییرات دما در یک سیکل حرارتی در نقاط D_c و D_s

شکل 9 تغییرات دما در یک سیکل حرارتی در نقاط D_c و D_s

تیره شده است. در حین آزمایش‌ها مشاهده گردید که هرچه زمان حرارت‌دهی افزایش پیدا کند، میزان این تیرگی افزایش می‌یابد. آثار تیرگی نزدیک به دو سر نمونه، مربوط به محل قرارگیری نمونه‌ها در دستگاه روی تکیه‌گاه است. با توجه به اینکه تغییرشکل نمونه‌ها بعد از انجام آزمایش‌های می‌شد، نمونه‌ها قبل از آغاز آزمایش‌ها و همچنین پس از انجام آزمایش‌های حرارتی، به طور دقیق اندازه‌گیری ابعادی شدند. اندازه‌گیری‌ها مشخص نمود که نمونه پس از انجام آزمایش بارگذاری تناوبی حرارتی، دچار تغییرشکل دائمی شده است. بنابراین این تغییرشکل با استفاده از سایه‌نگار¹ با بزرگنمایی 20 برابر و دقت تا 0.01 mm اندازه‌گیری شد. اینجا را با روش‌های تماسی و غیرتماسی می‌توان اندازه‌گیری کرد. در عمل انحنای تا 0.1 m⁻¹ (شعاع 10) را راحت می‌توان اندازه‌گیری کرد، اما مقادیر پایین‌تر نیاز به دقت و ابزار آلات بالاتری دارند.

نتایج اندازه‌گیری‌ها نشان داد که قبل از آغاز آزمایش، نمونه‌ها صاف و با دقت 0.01 mm بدون احتراز می‌باشند. پس از انجام آزمایش، اندازه‌گیری‌ها نشان داد که قوس ایجاد شده در نمونه از رابطه⁽¹⁾ $y = R \sin(\theta/2)$ می‌کند که در این رابطه، y نشان‌دهنده خیز تیر است. این رابطه از برآش یک منحنی درجه 6 بر تغییرشکل بوجود آمده در نمونه آزمایشگاهی با ضریب همبستگی $R = 0.997$ بدست آمده است. البته باید توجه داشت که با توجه به اینکه تغییر شکل در انتهای آزمایش اندازه‌گیری شده نمی‌توان اطمینان حاصل

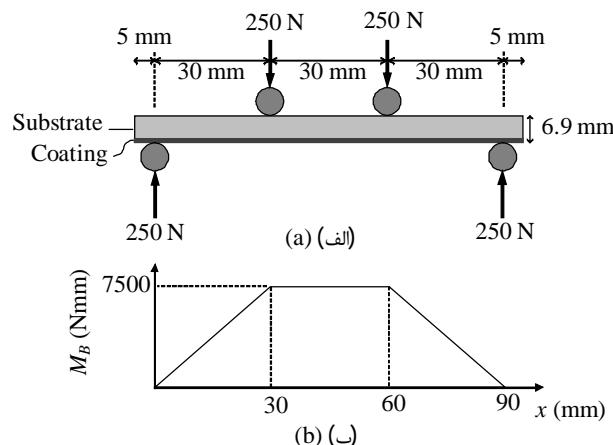


Fig. 5 (الف) هندسه‌ی بارگذاری مکانیکی خمی چهار نقطه‌ای، (ب) منحنی ممان

خمی در طول قطعه برای بار اعمالی

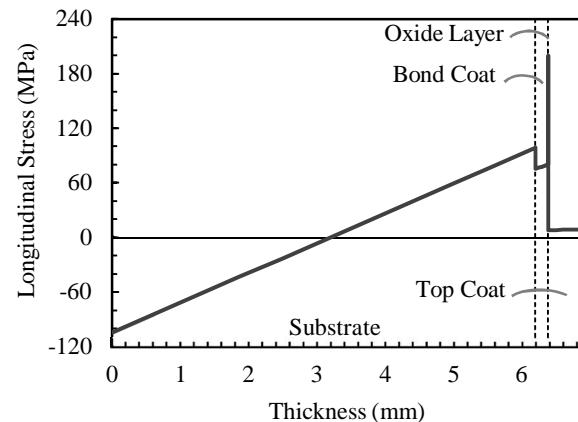


Fig. 6 منحنی تنش طولی بین دو تکیه‌گاه وسط دراستی ضخامت با بار 500 N

شکل 6 منحنی تنش طولی بین دو تکیه‌گاه وسط دراستی ضخامت با بار 500 N

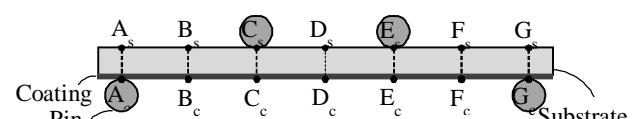


Fig. 7 نقاط اندازه‌گیری دما روی نمونه با توجه به قرارگیری روی تکیه‌گاهها

شکل 7 نقاط اندازه‌گیری دما روی نمونه با توجه به قرارگیری روی تکیه‌گاهها

طبق توضیحات بیان شده در بخش‌های قبل، آزمایش بارگذاری تناوبی حرارتی به همراه بار خمی ثابت بر روی نمونه‌های پوشش‌داده شده انجام شد. پوشش در نمونه‌های مورد آزمایش تحت بار خمی 7500 Nmm و پس از 10 سیکل حرارتی (مطابق نمودار شکل 9) دچار جدایش گردید. در شکل 10 نمونه در انتهای آزمایش نشان داده است.

همان‌طور که در شکل 10 مشاهده می‌شود، بخش‌هایی از پوشش فوقانی از لبه‌های نمونه دچار ریزش شده که براساس معیار تخریب و جدایش، نمونه وامانده محاسبه می‌شود. علاوه بر این همان‌طور که مشخص است به علت حرارت اعمالی، بخش‌هایی از پوشش فوقانی سرامیکی بر اثر اکسایش موضعی

¹ Shadow Projection Profilometry

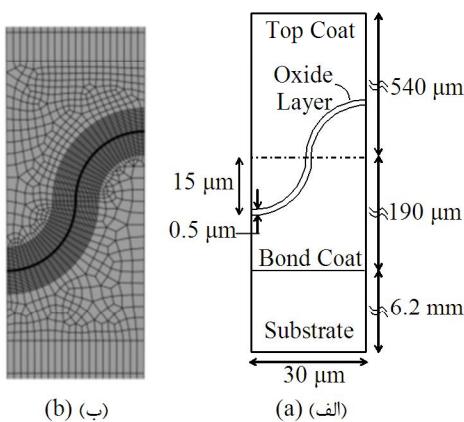


Fig. 11 (a) Schematic figure of different layer with dimensions, (b) Section of created model and mesh in ABAQUS

شکل 11 (الف) شکل نمادین لایه‌های مختلف و ابعاد مربوطه، (ب) بخشی از مدل و شبکه‌بندی ایجادشده در آباکوس

ترتیب در جدول 1 تا جدول 5 ارائه شده است.

در مدل اجزا محدود خواص بیان شده برای چهار لایه‌ی نام برده شده در مazzoیل خواص نرم افزار آباکوس بر روی هندسه یا بخش تعیین شده برای هر لایه مطابق شکل 11، اعمال می‌شود و بدین وسیله هر کدام از این بخش‌ها، مدل آن لایه از ماده خواهند بود.

3-2- بارگذاری و شرایط مرزی

دمای جسم و لایه‌های پوشش در شروع تحلیل مطابق شرایط آزمایش و برابر با دمای محیط (20°C) بوده و به مرزهای بیرونی مدل اجزاء انبساط و جابجایی آزادانه در راستای سه‌محور داده می‌شود. برای ایجاد بارگذاری حرارتی سیکلی، شرایط مرزی حرارتی براساس اندازه‌گیری حرارتی انجام شده در آزمایش که در شکل 9 نشان داده شده است، برای دیوارهای بالا و پایین مدل اعمال شده است.

سپس تک سیکل نشان داده شده در شکل 9، مطابق شکل 12 در مدل اجزا محدود تکرار شده تا مدل‌سازی تناوبی حرارتی تکمیل گردد. مطابق شکل 12، T بازه‌ی زمانی⁴ هر سیکل و در هر سیکل حرارتی t مدت فرآیند گرمایش از دمای اولیه محیط T_L تا دمای بالای سیکل T_H $- t_s - t_f$ مدت فرآیند سکون حرارتی در دمای بالای سیکل T_H $- t_f$ مدت فرآیند سرمایش از دمای بالای سیکل T_H تا دمای اولیه محیط T_L است. البته باید توجه داشت که با توجه به اینکه از مدل سلول واحد استفاده شده است، از گرادیان دمایی در راستای طول نمونه صرف نظر شده است.

برای در نظر گرفتن بار مکانیکی خمشی اعمال شده در آزمایش مانند شکل 5 (الف)، نقطه‌ی مرجعی روی تار خنثی خمشی مدل اجزا محدود در نرم‌افزار آباکوس بر دیوارهای جانبی قرار داده و با قید کوپل این نقطه‌ی مرجع به گرههای روی دیواره مرتبط می‌شود. سپس ممان خمشی بر این نقطه‌ی مرجع اعمال می‌شود. لذا با توجه به کوپل بودن، در واقع بر تمام نقاط دیواره مدل ممان اعمال می‌گردد.

3-3- مدل ناحیه‌ی چسبنده و تعیین خواص آن به روش ترکیبی⁵

مدل‌های آسیب¹ متداول را می‌توان به دو دسته کلی مدل‌های بر پایه‌ی فرآیندهای میکرومکانیکی² آسیب و مدل‌های پدیده‌شناسنخی³ تقسیم کرد

⁴ Time period
⁵ Hybrid Method

نمود که مکانیزم خرس و یا بلاستیسته در دمای بالا فعال بوده است.

$$y = -4 \times 10^{-11}x^6 + 8 \times 10^{-11}x^5 + 2 \times 10^{-7}x^4 - 8 \times 10^{-7}x^3 - 7 \times 10^{-4}x^2 + 0.0017x + 0.793 \quad (1)$$

3- مدلسازی اجزا محدود

حل اجزا محدود از نوع کوپل حرارت- جابجایی¹ در حالت گذرا² انجام شده که مدل‌سازی و تحلیل آن توسط نرم‌افزار تجاری آباکوس انجام شده است. از آنجایی که در هر سیکل دما از 20°C تا 1170°C تغییر می‌کند و همچنین مدت هر سیکل ۹۱۰ s است، در بخش تحلیل نرم‌افزار آباکوس پارامترهای بیشینه‌ی گام زمانی و حداقل تغییرات مجاز دما در هر گام زمانی را برابر عدد ۱۰ که نسبت به اعداد بیان شده بسیار کوچک محسوب می‌شود، قرارداده در این بخش از نرم‌افزار خروجی‌های مدنظر چون تنش، کرنش، دماهای گره‌ها، انرژی داخلی سیستم، معیار واماندگی مدل چسبنده در سطح مشترک لایه‌ی اکسید و پوشش پیوندی و... برای هر گام زمانی تعیین می‌شوند.

3-1- هندسه و خواص مواد

هندسه‌ی مدل شامل نصف سلول واحد از ماده و پوشش می‌باشد و مطابق شکل 11 (الف) از قسمت‌های زیرلایه‌ی اصلی، پوشش پیوندی، لایه‌ی اکسید و پوشش فوقانی تشکیل شده و ضخامت لایه‌ها مطابق ابعاد نمونه‌ی مورد آزمایش در نظر گرفته شده است. اتصال پوشش پیوندی به لایه‌ی اکسید از طریق مدل‌سازی ناحیه‌ای با خواص چسبنده صورت گرفته است که این ناحیه مشترک اتصال لایه‌ها با توجه به ریزساختار موجود در این ناحیه عمدتاً به صورت موجی نیم‌دایره‌ای یا سینوسی تقریب زده می‌شود [14، 15]. در نمونه‌های تست شده در این پژوهش نیز ناحیه سطح مشترک به صورت موجی نیم‌دایره‌ای در نظر گرفته شده‌اند.

شکل 11 (ب) مدل ایجادشده در نرم‌افزار به همراه شکل نمادین لایه‌های مختلف و ابعاد آن‌ها را نشان می‌دهد. از آنجایی که این مدل تناوبی و دارای تقارن سیکلی³ است، می‌توان برای این تحلیل تنها نیم‌دامنه از حالت موجی لایه‌ی اکسید را مدل کرد. در شبکه‌بندی مدل از المان مربعی با ۸ گره و در حالت کرنش صفحه‌ای به همراه معادلات کوپل جابجایی مرتبه دو و معادلات حرارت خطی استفاده شده است (CPE8T).

شبکه‌بندی باید به نحوی باشد که ابعاد شبکه‌ها بر مقدار نتایج تاثیری نداشته باشد بنابراین با شبکه‌بندی‌های متفاوت نتایج بررسی شده و شبکه‌ای انتخاب شود که نتایج مستقل از آن باشد. شکل 10 (ب)، شبکه‌ی نهایی است که پس از بررسی‌های استقلال از شبکه بدست آمد است. خواص مکانیکی و حرارتی تابع دما برای زیرلایه‌ی اصلی، پوشش پیوندی، لایه‌ی اکسید آلومینیوم و پوشش فوقانی که برای مدل اجزا محدود در نظر گرفته شده، به



Fig. 10 Tested specimen after 64th cycle

شکل 10 نمونه‌ی مورد آزمایش بعد از سیکل ۶۴ ام

¹ Coupled Temperature-Displacement

² Transient

³ Cyclic Symmetry

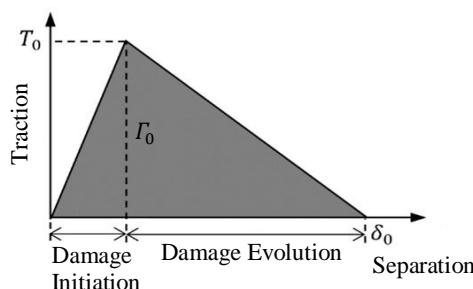


Fig. 13 Traction-separation curve in general form

شکل 13 منحنی تنش-جدایی در حالت کلی

$$\left(\frac{t_n}{T_{0n}}\right)^2 + \left(\frac{t_s}{T_{0s}}\right)^2 = 1 \quad (3)$$

در مرحله‌ی تکامل آسیب، انرژی چسبندگی برای دو مود شکست باید

جدول 1 ظرفیت حرارتی ویژه، رسانش و چگالی پوشش پیوندی (NiCoCrAlY) [17]

Table. 1 Specific heat capacity, conductance and density of bond coat (NiCoCrAlY) [17]

ρ چگالی (kg/m ³)	T دما (°C)	k رسانش (W/mK)	T دما (°C)	ظرفیت حرارتی ویژه C_p (J/kgK)	T دما (°C)
6189	24.9	4.3042	28.1	542.9	21.3
5664	300.3	5.9646	299.5	659.2	251.7
5844	500.3	6.9534	500.4	712.1	499.6
6423	710.9	9.7197	700.5	738.5	698.6
6479	900.5	10.6836	899.9	757.5	901.1
6521	1100.9	13.1745	1100.0	746.9	1000.8
6590	1200.3	16.1223	1200.7	772.0	1198.8

جدول 2 ظرفیت حرارتی ویژه، رسانش و چگالی پوشش فوقانی [18] (ZrO₂-8wt% Y₂O₃ (YSZ))

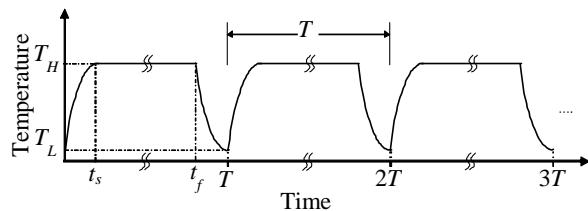
Table. 2 Specific heat capacity, conductance and density of top coat (ZrO₂-8wt% Y₂O₃ (YSZ)) [18]

ρ چگالی (kg/m ³)	k رسانش (W/mK)	ظرفیت حرارتی ویژه C_p (J/kgK)	T دما (°C)
4820	1.4998	455.60	25.00
4820	1.4998	516.14	126.85
4820	1.4998	568.08	326.85
4820	1.4998	595.67	526.85
4820	1.4998	616.77	726.85
4820	1.4998	635.44	926.85
4820	1.4998	652.48	1126.85
4820	1.4998	655.73	1156.85
4820	1.4998	719.84	1176.85

جدول 3 ظرفیت حرارتی ویژه، رسانش و چگالی لایه‌ی اکسید (α -Al₂O₃) [19]

Table. 3 Specific heat capacity, conductance and density of oxide layer (α -Al₂O₃) [19]

ρ چگالی (kg/m ³)	k رسانش (W/mK)	ظرفیت حرارتی ویژه C_p (J/kgK)	T دما (°C)
3984	33.00	755	20
3943	11.40	1165	500
3891	7.22	1255	1000
3863	6.67	1285	1200



شکل 12 شکلواره‌ی سیکل‌های حرارتی اعمالی برای دیواره‌های بالا و پایین مدل

[16]. دسته‌ی اول برای فلزات نرم و براساس پلاستیسیته‌ی متخلخل، شروع رشد و بهم‌آمیختگی حفره‌هاست. این نوع مدل‌ها برای مواد ترد، تنها یک احتمال واماندگی را بدست می‌دهد. دسته‌ی دوم که مدل‌های پدیده‌شناختی هستند، وابسته به واماندگی خاصی نبوده اما قوانین تکامل⁴ آن‌ها می‌تواند تنها برای دسته‌ی خاصی از مواد کاربرد داشته باشند. مدل ناحیه‌ی چسبنده، یکی از مدل‌های آسیب پدیده‌شناختی است که قانون تنش-جدایی را برای توصیف جدایش در مواد بدون توجه به جزئیات فیزیکی آسیب در مواد واقعی، بکار می‌برد. این مدل را می‌توان برای مواد نرم، ترد یا به عبارت دیگر محدوده‌ی وسیعی از مواد شامل فلزات، پلیمرها، سرامیک‌ها، بتون، کامپوزیت‌ها، مواد تقویت‌شده با فیبر، سنگ و ... می‌شود، استفاده نمود [16]. رفتار ناحیه‌ی چسبنده با قانون تنش-جدایی⁵ که ارتباط دهنده‌ی تنش با جدایش دو لبه‌ی ترک است، مدل می‌شود. شکل 13 نشان‌دهنده‌ی منحنی تنش-جدایی موردن استفاده برای جدایش بین لایه‌های پوشش‌های سد حرارتی در حالت کلی است. یک المان چسبنده زمانی واماندگی می‌شود که این قانون برای آن المان ارضاء شود، به عبارت دیگر جدایش دو لبه‌ی المان به حد بحرانی δ_0 که تنش در آن جدایش صفر است، برسد. تنش بیشینه‌ی منحنی تنش-جدایی، استحکام چسبندگی T_0 و یکی از خواص مواد است. در پیامتر دوم قانون تنش-جدایی استفاده شده که به صورت زیر تعریف شده و نشان‌دهنده‌ی مساحت زیر منحنی تنش جدایی است.

$$\Gamma_0 = \int_0^{\delta_0} T(\delta) d\delta \quad (2)$$

خواص قانون تنش-جدایی برای مودهای سه‌گانه‌ی شکست برقرار می‌باشد. در این پژوهش با توجه به دوبعدی بودن مدل و شرایط فیزیکی حاکم بر مسئله، تنها دو مود اول شکست مورد نیاز است. منحنی تنش-جدایی دارای دو مرحله‌ی شروع آسیب⁶ و تکامل آسیب⁷ است.

در شروع آسیب، استحکام چسبندگی برای دو مود شکست تعیین شده و با یکی از چهار معیار تنش بیشینه⁸، تنش درجه‌ی دوم⁹، جدایی بیشینه¹⁰ و جدایی درجه‌ی دوم¹¹ روابط بین منحنی دو مود شکست برای واماندگی برقرار می‌شود. در این پژوهش طبق رابطه‌ی (3) از معیار تنش درجه‌ی دوم استفاده شده که در آن t_0 به ترتیب تنش و استحکام چسبندگی بوده و اندیس‌های n و S به ترتیب نشان‌دهنده‌ی مود اول و مود دوم جدایش می‌باشد.

¹ Damage

² Micromechanical Processes

³ Phenomenological

⁴ Evolution Law

⁵ Traction-Separation Law (TSL)

⁶ Damage Initiation

⁷ Damage Evolution

⁸ Maximum Stress (MAXS)

⁹ Quadratic Stress (QUADS)

¹⁰ Maximum Separation (MAXU)

¹¹ Quadratic Separation (QUADU)

جدول ۴ مدول الاستیسیتی، ضریب پواسون و ضریب انبساط حرارتی لایه‌های پوشش [11]

(ZrO ₂ -8wt% Y ₂ O ₃) (YSZ) پوشش فوقانی			(α-Al ₂ O ₃) لایه‌ی اکسید			(NiCoCrAlY) پوشش پیوندی			T دما (°C)
ضریب انبساط α (1/°C)	ضریب پواسون ν	مدول یانگ E (MPa)	ضریب α (1/°C)	ضریب پواسون ν	مدول یانگ E (MPa)	ضریب α (1/°C)	ضریب پواسون ν	مدول یانگ E (MPa)	
9.6800×10 ⁻⁶	0.2	17500.0	5.0794×10 ⁻⁶	0.27	380365	1.2358×10 ⁻⁵	0.3189	151857	20
9.6748×10 ⁻⁶	0.2	16340.9	5.9040×10 ⁻⁶	0.27	369060	1.3041×10 ⁻⁵	0.3271	150746	220
9.7058×10 ⁻⁶	0.2	15181.8	6.7285×10 ⁻⁶	0.27	361225	1.3912×10 ⁻⁵	0.3343	145253	420
9.8098×10 ⁻⁶	0.2	14022.7	7.5531×10 ⁻⁶	0.27	351876	1.4970×10 ⁻⁵	0.3409	132337	620
1.0024×10 ⁻⁵	0.2	12863.6	8.3776×10 ⁻⁶	0.27	336032	1.6217×10 ⁻⁵	0.3466	108921	820
1.0384×10 ⁻⁵	0.2	11704.5	9.2022×10 ⁻⁶	0.27	308708	1.7652×10 ⁻⁵	0.3515	71890	1020

جدول ۵ خواص مکانیکی و حرارتی زیرلایه‌ی اصلی اینکونل 617 [20]

Table. 5 Mechanical and thermal properties of substrate Inconel 617 [20]

چگالی ρ (kg/m ³)	رسانش حرارتی k (W/mK)	ظرفیت حرارتی ویژه C _p (J/kgK)	ضریب انبساط α (1/°C)	ضریب پواسون ν	مدول یانگ E (MPa)	T دما (°C)
8360	13.5	420	-	0.30	211000	25
8360	14.7	440	1.16×10 ⁻⁵	0.30	206000	100
8360	17.7	490	1.31×10 ⁻⁵	0.30	194000	300
8360	20.9	536	1.39×10 ⁻⁵	0.30	181000	500
8360	23.9	586	1.48×10 ⁻⁵	0.30	166000	700
8360	27.1	636	1.58×10 ⁻⁵	0.30	149000	900
8360	28.7	662	1.63×10 ⁻⁵	0.31	139000	1000
8360	-	-	-	0.32	129000	1100

را برای T_n و T_s که از روش ترکیبی بدست آمد است، نشان می‌دهد. از آنجایی معیار بررسی شروع جدایش بود، ایجاد تغییر در انرژی چسبندگی دو مود که کنترل کننده‌ی تکامل آسیب است، تاثیری نخواهد داشت. این خواص تخمینی در مازول برهم کنش موجود در نرمافزار آباکوس به صورت خواص تماس بین سطحی چسبندگی، بین سطح زیرین لایه‌ی اکسید و سطح بالای پوشش پیوندی برای مدلسازی جدایش ناشی از بارگذاری‌های حرارتی و خمی اعمال می‌شوند.

4- بررسی تاثیر بارگذاری مکانیکی

به کمک مدل اجزا محدود توسعه داده شده در این پژوهش، تاثیر بارگذاری مکانیکی خمی بر بارگذاری حرارتی پوشش‌ها بررسی خواهد شد. به طور خلاصه می‌توان گفت دو حالت مدلسازی با شرایط بارگذاری متفاوت به شرح

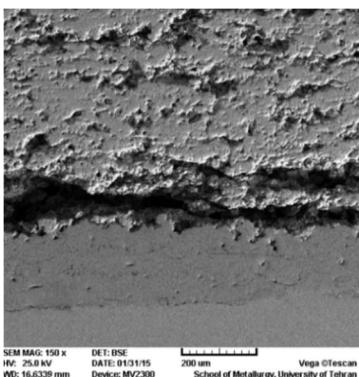


Fig. 14 Picture provided by the Scanning Electron Microscope from layers interface, without oxide layer formation

شکل ۱۴ تصویر میکروسکوپ الکترونی از سطح مقطع مشترک لایه‌ها و عدم تشکیل لایه اکسید

تعیین شده و با یکی از دو معیار قانون توانی^۱ و معیار بنزگا-کنانه^۲ روابط بین منحنی انرژی چسبندگی دو مود شکست برای واماندگی برقرار شود. در این پژوهش طبق رابطه (4) از معیار قانون توانی استفاده شده است که در آن G و Γ_0 به ترتیب انرژی کرنشی و انرژی چسبندگی بوده و اندیس‌های n و s به ترتیب نشان‌دهنده‌ی مود اول و مود دوم جدایش می‌باشد.

$$\left(\frac{G_n}{\Gamma_{0n}}\right)^2 + \left(\frac{G_s}{\Gamma_{0s}}\right)^2 = 1 \quad (4)$$

برای تخمین خواص ناحیه چسبندگی از روش ترکیبی استفاده هم‌زمان از نتایج تجربی و نتایج حل عددی استفاده می‌شود. بررسی ریزساختار و سطح مقطع مشترک بین پوشش و فلز پایه نشان می‌دهد که در شرایط این آزمایش زمان کافی برای رشد لایه اکسید وجود ندارد و لذا عامل اصلی تخریب تغییر شکل نمونه می‌باشد. شکل ۱۴ ریزساختار سطح مقطع مشترک را نشان می‌دهد که نشان دهنده عدم تشکیل لایه اکسید می‌باشد. توضیحات جامع تر در [12] ارائه شده است. بنابراین در حل اجزاء محدود، جابجایی بدست آمده از آزمایش به صورت شرایط مرزی به نمونه‌ها وارد شده و خواص چسبندگی با سعی و خطا طوری بدست آمده‌اند که تعداد سیکل تا جدایش برابر با تعداد سیکل تا جدایش نمونه آزمایش شده گردید.

4- بحث و بررسی

همان‌طور که در بخش ۳-۳ بیان شد، بر اساس استفاده هم‌زمان از نتایج تجربی و عددی خواص ناحیه چسبندگی تخمین زده می‌شوند. به عبارت دیگر نتایج حاصل از میزان خمی نمونه که در آزمایش بدست آمد به عنوان شرایط مرزی در مدلسازی اعمال شد. در واقع شبیه‌سازی جدایش و خواص ناحیه چسبندگی براساس آزمایش، کالیبره شده است. جدول ۶ خلاصه‌ی نتایج

¹ Power Law

² Benzeggagh-Kenane (BK)

برابر نشان داده شده‌اند. در شکل 17 برای بهتر مشخص شدن بازشدگی ترک ایجاد شده در قله مرز مشترک، کانتور تنش در نواحی نزدیک به ترک با بزرگنمایی بیشتر و ضریب تغییر شکل 50 برابر نشان داده شده است. با مقایسه مدل اول و دوم می‌توان نتیجه گرفت که بارگذاری مکانیکی می‌تواند تاثیر بسیار بیشتری نسبت به بارگذاری سیکلی حرارتی داشته باشد.

شایان ذکر است که در شکل 15 تا شکل 17، هدف اصلی نمایش ایجاد جدایش بر اثر بارگذاری‌ها و نحوه شروع و گسترش این جدایش بین پوشش فوقانی و پوشش پیوندی است که در دو مدل بیان شده به علت تفاوت در بارگذاری‌ها روند شروع و گسترش جدایش متفاوت بوده است.

5- نتیجه‌گیری

در این پژوهش اثر بار خمی مکانیکی ثابت 7500 Nmm بر جدایش پوشش سد حرارتی روی نمونه‌ای از جنس اینکونول 617 که تحت بار حرارتی سیکلی بین دمای بیشینه 1170°C و دمای کمینه 20°C قرار دارد، آزمایش شد که نمونه تحت این بارگذاری پس از 64 سیکل دچار جدایش شد. با اندازه‌گیری دمای نقاط مختلف روی سطح پوشش و زیرلایه‌ی اصلی در طی یک سیکل حرارتی، سرایط بارگذاری حرارتی بدست آمده و در مدلسازی استفاده شد و خواص مربوط به این مدل، از انتظامی بین نتایج حاصل از

جدول 6 نتایج تخمین خواص ناحیه‌ی چسبنده

Table. 6 Results of estimation of cohesive zone properties

T_n (MPa)	T_s (MPa)
56.5	28.25

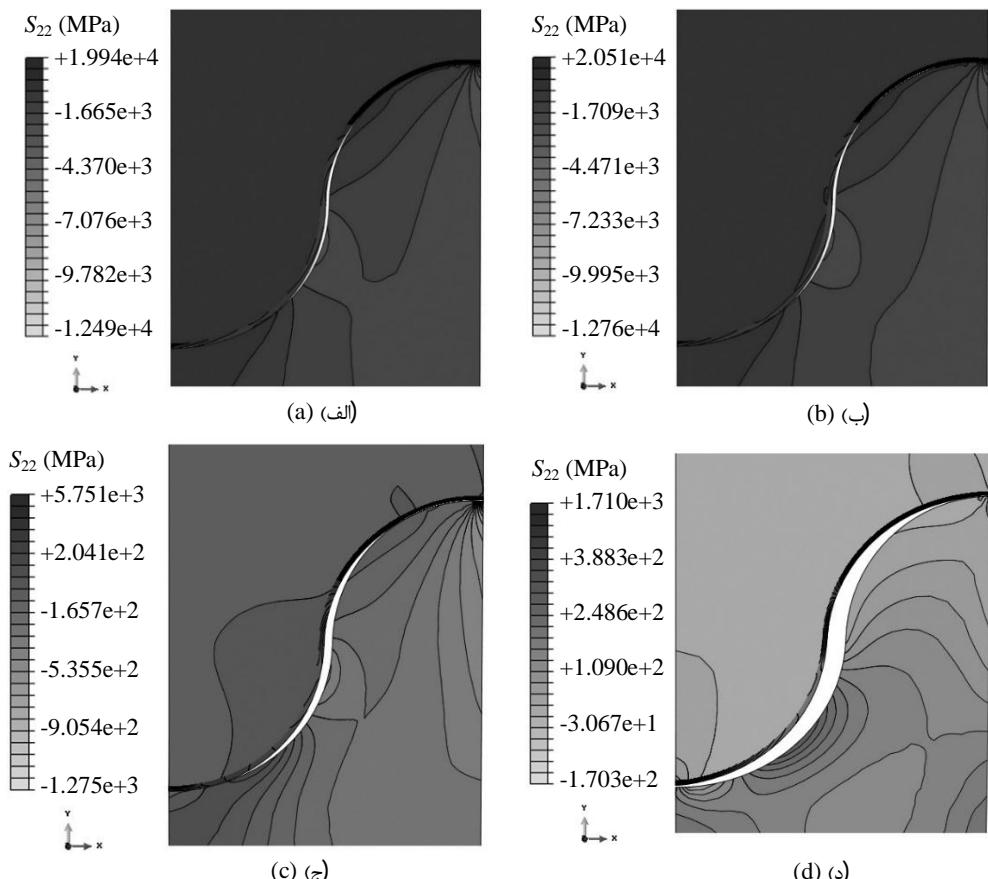
زیر در نظر گرفته شده است.

1- بارگذاری حرارتی سیکلی به همراه بارگذاری مکانیکی خمی ثابت

2- بارگذاری حرارتی سیکلی بدون بارگذاری مکانیکی

در مدل حالت اول که شرایط بارگذاری آن شبیه آزمایش انجام شده بود، پس از طی 64 سیکل حرارتی، کل سطح پوشش فوقانی از لایه‌های دیگر پوشش جداده شده و پوشش دچار جدایش می‌شود. در شکل 15 کانتور تنش (S_{22} در راستای عمودی) مدل اول پس از سیکل حرارتی 20، 35، 50 و 64 ام نشان داده شده است. این رفتار مشاهده شده در نتیجه مدلسازی تا حدود خوبی بر رفتار مشاهده شده در آزمایش منطبق است، زیرا که پوشش فوقانی در نمونه در انتهای سیکل 64 ام دچار جدایش شده است. در کانتورهای شکل 15 برای بهتر مشخص شدن ترک و جدایش، تغییر شکل‌ها با ضریب 20 برابر نشان داده شده‌اند.

در مدل دوم که در واقع همان مدل اول با حذف بار خمی است، در انتهای سیکل 64 ام در قله مرز مشترک، ترک ایجاد شده ولی کل پوشش فوقانی از پوشش پیوندی جدا نشده است. شکل 16 کانتور تنش S_{22} در این مدل را پس از 64 سیکل 910 ثانیه‌ای نشان می‌دهد که در آن برای بهتر مشخص شدن ترک ایجاد شده در قله مرز مشترک، تغییر شکل‌ها با ضریب 20

شکل 15 کانتور تنش S_{22} در مدل اول در:

(الف) سیکل 20 ام، (ب) سیکل 50 ام، (ج) سیکل 35 ام، (د) سیکل 64 ام

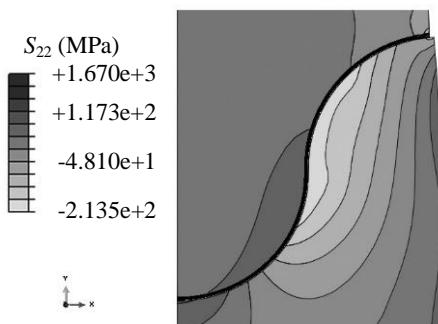
در اختیار گذاشتن نمونه های آزمایشگاهی کمال تشکر و قدردانی را دارند.

7- فهرست علائم

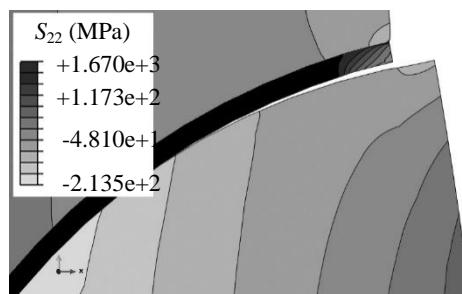
ظرفیت حرارتی و بیله (J/kgK)	C_p
شبکه مربعی با 8 گره، در حالت کرنش صفحه‌ای با معادلات کوپل جابجایی مرتبه دو و حرارت خطی	CPE8T
مدول یانگ (MPa)	E
انرژی کرنشی	G
رسانش (W/mK)	k
تنش در راستای محور عمودی (MPa)	S_{22}
تنش (در روابط مدل ناحیه چسبنده)	t
مدت فرآیند گرمایش	t_s
مدت فرآیند سکون حرارتی	$t_f - t_s$
استحکام چسبنده (در روابط مدل ناحیه چسبنده)	T
بازه‌ی زمانی هر سیکل	T
دما (°C یا K)	T
دمای بالای سیکل (K یا °C)	T_H
دمای پایین سیکل (K یا °C)	T_L
علائم یونانی	
ضریب انبساط (1/°C)	α
انرژی چسبنده‌ی گی	Γ_0
جدایش	δ
جدایش بحرانی	δ_0
تفییرات مجاز زمان در هر گام زمانی (s)	Δt
تفییرات مجاز دما در هر گام زمانی (K)	ΔT
انحنای بدست‌آمده از آزمایش (mm ⁻¹)	$K_{\text{experiment}}$
انحنای بدست‌آمده از مدل‌سازی (mm ⁻¹)	K_{model}
چکالی (kg/m ³)	ρ
ضریب پواسون	ν
زیرنویس‌ها	
پوشش	c
مود اول	n
زیرلايه‌ی اصلی	s
مود دوم	s

8- مراجع

- R. A. Miller, *History of Thermal Barrier Coatings for Gas Turbine Engines - Emphasizing NASA's Role From 1942 to 1990*, NASA/TM—215459-2009, Cleveland, Ohio, 2009.
- Herman H, Berndt CC. Plasma spray processing of TBCs. National Aeronautics and Space Administration, Cleveland, United States, Lewis Research Center; 1995.
- C. Leyens, U. Schulz, M. Bartsch, M. Peters, R&D status and needs for improved EB-PVD thermal barrier coating performance, in *Materials Research Society Symposium Proceedings*, Vol. 645, pp. M10-1, Cambridge University Press, 2000.
- J. Stringer, Coatings in the electricity supply industry: past, present and opportunities for the future, *Surface and Coatings Technology*, Vol. 108-109, pp. 1-9, 1998.
- D.J. Kim, I.H. Shin, J.M. Koo, C.S. Seok, et al., Failure mechanisms of coin-type plasma-sprayed thermal barrier coatings with thermal fatigue, *Surface and Coatings Technology*, Vol. 205, pp. S451-S458, 2010.
- Z. Lu, S.W. Myoung, Y.G. Jung, G. Balakrishnan, et al., Thermal fatigue behavior of air-plasma sprayed thermal barrier coating with bond coat species in cyclic thermal exposure, *Materials*, Vol. 6, No. 8, pp. 3387-3403, 2013.



شکل ۱۶ کانتور تنش S_{22} در مدل دوم پس از 64 سیکل



شکل ۱۷ کانتور تنش S_{22} در مدل دوم پس از 64 سیکل در اطراف جدایش

آزمایش و مدل‌سازی، که به آن روش ترکیبی گفته می‌شود، به دست آمد، تا بتوان با استفاده از خواص تخمینی رفتار مدل‌سازی را به رفتار مشاهده شده در آزمایش نزدیک نمود. در انتهای مدل‌سازی شرایط بارگذاری تناوبی حرارتی بدون بارگذاری خمی و با بارگذاری خمی انجام شد و این نتیجه حاصل شد که علت اصلی واماندگی در پوشش‌های سد حرارتی، اعمال بار خمی ثابت بر روی نمونه پوشش‌داده شده است. می‌توان موارد زیر را به عنوان نتایج این پژوهش بر شمرد:

- پوشش در نمونه‌ی مورد آزمایش تحت بار خمی 7500 Nmm و سیکل‌های حرارتی نشان‌داده شده در شکل 9 پس از طی 64 سیکل دچار جدایش گردید.
- نمونه تحت شرایط آزمایش دچار تغییرشکل دائمی می‌شود که این تغییرشکل و انحنای ایجادی که عامل اصلی آن بارگذاری خمی است، تاثیر تخریبی بیشتری بر روی پوشش نسبت به بارگذاری تناوبی حرارتی داشته و عامل اصلی جدایش است.
- در مدل اجزا محدود اول پوشش فوقانی و لایه‌ی اکسید به طور کلی از پوشش پیوندی جدا شده است. در حالی که در مدل دوم که بارگذاری خمی حذف شده است جدایش نسبتاً کوچکی تنها در قله سطح مشترک لایه‌ی اکسید و پوشش پیوندی ایجاد شده است. این نتیجه، تاکید دیگری بر این است که وجود بارگذاری خمی مشخص شده در این پژوهش عامل اصلی تخریب است.
- با کاهش بارگذاری مکانیکی بر روی قطعات پوشش داده شده در شرایط کاری، می‌توان عمر پوشش این قطعات را به طور موثری افزایش داد.

6- تشرک و قدردانی

نویسنده‌گان این مقاله از شرکت مهندسی و ساخت توربین مینا (توگا) به دلیل

- Turbine Performance, NITECH*, pp. 237-261, 2013.
- [14] A.G. Evan, D.R. Mumm, J.W. Hutchinson, G.H. Meier, et al., Mechanisms controlling the durability of thermal barrier coatings, *Progress in Material Science*, Vol. 46, No.5, pp. 505-553, 2001.
- [15] K. Sfar, J. Aktaa, D. Munz, Numerical investigation of residual stress fields and crack behavior in TBC systems, *Materials Science and Engineering*, Vol. 333, No. 1, pp. 351-360, 2002.
- [16] K.H. Schwalbe, I. Scheider, A. Corne, *Guidelines for Applying Cohesive Models to the Damage Behaviour of Engineering Materials and Structures*, New York, Springer Science & Business Media, 2012.
- [17] K.A. Khor, Y.W. Gu, Thermal properties of plasma-sprayed functionally graded thermal barrier coatings, *Thin Solid Films*, Vol. 372, No. 1, pp. 104-113, 2000.
- [18] U. Hermosilla, *Mechanical modeling of thermal barrier coatings at high temperatures*, PhD thesis, University of Nottingham, 2008.
- [19] M. Munro, Evaluated material properties for a sintered α -Al₂O₃, *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 80, No. 8, pp. 1919-1928, 1997.
- [20] Special Metals Corporation Catalog, Inconel 617, Accessed 05 Mar 2005; <http://www.specialmetals.com/documents/Inconel%20alloy%20617.pdf>.
- [7] K. Slámečka, L. Čelko, P. Skalka, J. Pokluda, et al., Bending fatigue failure of atmospheric-plasma-sprayed CoNiCrAlY+ YSZ thermal barrier coatings, *International Journal of Fatigue*, Vol. 70, pp. 186-195, 2015.
- [8] Moridi, M. Azadi, G.H. Farrahi, Thermo-mechanical stress analysis of thermal barrier coating system considering thickness and roughness effects, *Surface and Coatings Technology*, Vol. 243, pp. 91-99, 2014.
- [9] W. Zhu, L. Yang, L.W. Guo, Y.C. Zhou, et al., Determination of interfacial adhesion energies of thermal barrier coatings by compression test combined with a cohesive zone finite element model, *International Journal of Plasticity*, Vol. 64, pp. 76-87, 2015.
- [10] P. Bednarz, *Finite element simulation of stress evolution in thermal barrier coating systems*, PhD Thesis, Fakultät für Maschinenwesen, 2006.
- [11] M. Bialas, Finite element analysis of stress distribution in thermal barrier coatings, *Surface and Coatings Technology*, Vol. 202, No. 24, pp. 6002-6010, 2008.
- [12] H. Ebrahimi, *A Failure Investigation in Thermal Barrier Coatings (TBCs)*, M. Sc. Thesis, Faculty of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, 2015, (In Persian) (فارسی).
- [13] A.C. Karaoglanli, K. Ogawa, Thermal Shock and Cycling Behavior of Thermal Barrier Coatings (TBCs) Used in Gas Turbines, in *Progress in Gas*