

طراحی و بهینه سازی ساختار پوشش سد حرارتی ایجاد شده به روش پاشش پلاسمایی از طریق شبیه سازی المان محدود

نسیم نایب پاشایی، سید حسین سیدین، محمدرضا ابوطالبی و حسین سرپولکی

دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه علم و صنعت

سید محمد مهدی هادوی

دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه مالک اشتر

(دریافت مقاله : ۹۳/۰۹/۲۲ - پذیرش مقاله : ۹۴/۰۶/۲۱)

چکیده

پوشش های سد حرارتی با هدف عایق کردن اجزای موجود در بخش های داغ توربین های گازی در جهت افزایش دمای کاری و بازدهی این قطعات مورد استفاده قرار می گیرند. در این پژوهش، توزیع حرارت و تنش پسماند در پوشش سد حرارتی درجه بندی شده با فصل مشترک سینوسی به روش المان محدود در محیط نرم افزار آباکوس شبیه سازی شده است. خواص فیزیکی، حرارتی و مکانیکی ماده در مدل، وابسته به دما تعریف شد. نتایج نشان داد که بیشترین میزان بارحرارتی، تنش های پسماند و اعوجاج بصورت عمده در ناحیه پوشش سطحی سرامیکی متمرکز شده است. روند کیفی یا علامت جبری تنش در ناهمواری های سطحی نیز چه در حین بالارفتن دمای مجموعه تا دمای سرویس و چه در حین سردشدن تا دمای محیط دارای الگوی یکسانی است. درجه بندی شدن سیستم پوشش سد حرارتی، میزان تنش را تا حدود نصف نسبت به سیستم معمولی کاهش می دهد و به افزایش عمر سیستم سد حرارتی کمک می کند.

واژه های کلیدی: پوشش سد حرارتی درجه بندی شده، المان محدود، تنش پسماند، توزیع حرارت.

Design and optimization of plasma sprayed thermal barrier coating using finite element analysis

N. Nayeb pashae, S. H. Sayedayin, M. Aboutalebi and H. Sarpoulaki
Department of Materials Engineering, Iran University of Science and Technology

S. M. Hadavi

Metallic materials research center, Malek Ashtar University of Technology

(Received 13 December 2014, accepted 12 september 2015)

Abstract

Thermal barrier coatings are utilized in hot sections of gas turbines in order to isolate parts imposed to elevated working temperature and in consequent enhance efficiency. In the current research, ABAQUS commercial finite element package was used to analyze temperature distribution and imposed residual stress in thermal barrier coating with sinusoidal interfaces. All physical, thermal and mechanical properties need for simulation was introduced in temperature- dependency mode to the software. Results indicated that, significant thermal load, distortion and of course, induced stress were concentrated in the upper protective ceramic layer and functionally grading strategy cause to a 50% reduction in residual stress in the coating system. The sign of stress and also trends of stress variation in interface asperity posses a specific pattern both in heating and cooling to ambient temperature.

Keywords: Functionally graded thermal barrier coating, Finite element, residual stress, heat distribution.

E-mail of corresponding author: nayebpashae@iust.ac.ir.

مقدمه

امروزه مهندسیین و طراحان، توجه ویژه‌ای به مسایلی از قبیل خوردگی و سایش قطعات و اجزای مکانیکی ماشین‌آلات صنعتی و سازه‌ها دارند تا بتوانند عمر آنها را افزایش داده و نرخ تولید و کارایی این تجهیزات را بهبود بخشند. مواد در محیط توربین‌های دما بالا، به دلیل اکسیداسیون دما بالا و گازهای خورنده که حین سرویس و در نتیجه احتراق آزاد می‌شوند، در معرض شرایط کاری دشوار قرار دارند. ایجاد پوشش روی قطعات در صنایع کلیدی مانند نفت و گاز، پتروشیمی و هوافضا به منظور افزایش مقاومت به سایش و خوردگی ضروری است؛ زیرا این فرآیند باعث افزایش عمر قطعات و کاهش هزینه‌های نگهداری آنها می‌شود.

پوشش‌های سد حرارتی^۱ اغلب برای عایق کردن اجزای موجود در بخش‌های داغ توربین‌های گازی در جهت افزایش دمای کاری و بازدهی این قطعات مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱-۲]. در حقیقت پوشش‌های سد حرارتی باعث کاهش شدت انتقال حرارت و کاسته شدن از دمای زیرلایه می‌شوند [۳-۴] که بهبود مصرف سوخت، افزایش قدرت موتور و ماندگاری اجزای موتور را در پی خواهند داشت [۳، ۵-۶]. تحقیقات نشان داده است که پوشش‌های ایجاد شده با این روش‌ها توانسته‌اند مقاومت خوبی در برابر سایش و خوردگی ایجاد کنند. قابلیت عایق‌سازی حرارتی به عنوان یکی از مهمترین فاکتورها در ارزیابی عملکرد و توسعه کاربردی این پوشش‌ها به شمار می‌رود [۷-۸].

پوشش‌های سد حرارتی زیرکونیای به طور جزئی پایدار شده با ایتریا (YSZ) و پوشش میانی $(\text{M}=\text{Co}) \text{MCrAlY}$ و Ni و یا ترکیبی از این دو عنصر، به دلیل دارا بودن طیفی از خواص موردنیاز، بیشترین کاربرد را به عنوان پوشش‌های محافظ در دمای بالا دارند [۱، ۷ و ۹]. رفتار اکسیداسیون و عمر مفید این پوشش‌ها بیشتر تحت تاثیر

ترکیب شیمیایی لایه واسط، نوع اکسید محافظ، دما و تغییرات آن، روش اعمال پوشش، عوامل محیطی مانند ترکیب شیمیایی و سرعت گاز، نمک مذاب خورنده و فرسایش ناشی از گازهای داغ است [۷-۸].

پوشش‌های سد حرارتی متداول (مضاعف)^۲، دوام کم در طول چرخه‌های حرارتی را نشان می‌دهند [۱۰]. در پوشش‌های سد حرارتی معمولاً پوسته شدن، ورقه شدن و شکست زود هنگام تحت بارگذاری‌های حرارتی و مکانیکی رخ می‌دهد و این امر به استحکام ضعیف پیوند آنها، اختلاف بین ضریب انبساط حرارتی لایه سطحی با لایه واسط و تنش‌های باقیمانده بالا در آنها نسبت داده می‌شود [۱، ۹]. به منظور آزاد سازی تنش‌های باقیمانده و بهبود کارایی بلند مدت^۱ TBC، پوشش سد حرارتی درجه بندی شده (FG-TBC)^۳ با یک تغییر آهسته گرادیان ترکیب شیمیایی از سرامیک‌های مقاوم به حرارت تا فلزات مقاوم به شکست پیشنهاد شد که امکان کاهش اختلاف ضرایب انبساط حرارتی را فراهم می‌آورد [۱، ۹، ۱۱]. دلایل روی آوردن به پوشش‌های سد حرارتی درجه بندی شده کاهش تنش‌های حرارتی، افزایش عمر خستگی حرارتی-مکانیکی و قدرت چسبندگی است [۱۰ و ۱۲].

انتخاب و توسعه پوشش‌ها و یا ترکیب پوشش‌ها کاری پرهزینه، وقتگیر و پیچیده است. شبیه‌سازی عددی کمک بزرگی برای ارزیابی رفتار پوشش‌ها و لایه فصل مشترک تحت بارگذاری‌های حرارتی و مکانیکی از طریق محاسبه میدان‌های تنش و کرنشی است [۱۳]. استفاده از روش‌های عددی به ویژه روش‌های المان محدود در تحلیل و طراحی پوشش‌های سد حرارتی معمولی [۱۳] و درجه بندی شده تولید شده به روش پاشش حرارتی [۱۳] در تحقیقات بسیاری از محققان دیده شده است. در شبیه‌سازی پوشش‌های سد حرارتی به منظور درک توزیع تنش در فصل مشترک فلز-سرامیک و نیز مکانیزم گسترش تنش

^۲ duplex TBC^۳ Functionally Graded Thermal Barrier Coating^۱ Thermal Barrier Coating (TBC)

حرارتی در فصل مشترک این دسته از پوشش‌های سد حرارتی بهره بردند [۱۷] و همچنین در سالهای اخیر مباحث انتخاب مواد نوین برای پوشش‌های سد حرارتی مورد توجه و تمرکز قرار گرفته است [۱۸].

با توجه به مطالب ذکر شده، تاکنون پژوهش‌های معدودی در ارتباط با پیش‌بینی رفتار حرارتی و توزیع تنش‌های پسماند در پوشش‌های سد حرارتی درجه‌بندی نشده به کمک روش عددی المان محدود انجام شده است. از این‌رو، در این تحقیق شبیه‌سازی عددی توزیع دما و تنش‌های پسماند در پوشش سد حرارتی درجه بندی شده کامپوزیتی (8YSZ/NiCrAlY) و یک سیستم پوشش سد حرارتی مضاعف (دو لایه) اعمال شده به روش پاشش پلاسمایی مورد استفاده در محفظه احتراق یک موتور توربوفن هوایی تحت یک چرخه حرارتی ترکیبی و واقعی، شامل گرمایش از دمای محیط تا دمای سرویس، نگاهداری در دمای سرویس و سپس سرمایش تا دمای محیط مورد بررسی قرار گرفته است.

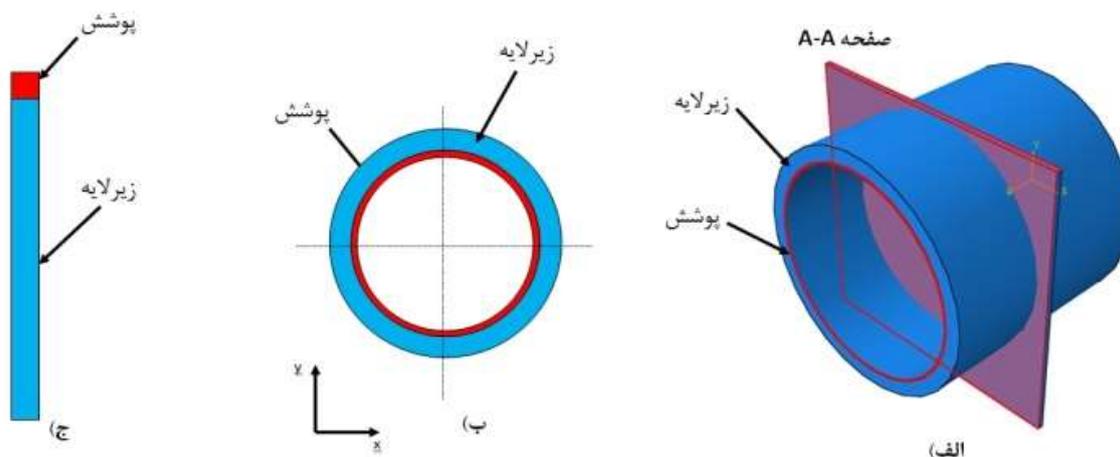
روش تحقیق

در این تحقیق، هدف بررسی و مقایسه توزیع حرارت و تنش پسماند در دو سیستم پوشش سد حرارتی متداول و درجه‌بندی شده است. در سیستم‌های پوشش سد حرارتی مورد مطالعه جنس زیرلایه، اینکونل ۷۳۸ است. در سیستم متداول مورد بررسی جنس لایه‌ها به ترتیب ترکیب NiCrAlY و ترکیب سرامیکی زیرکونیای تقویت شده با ایتریا (8YSZ) است که در آن ضخامت هر یک از لایه‌ها ۲۰۰ میکرومتر در نظر گرفته شده است. در سیستم پوشش درجه‌بندی شده جنس لایه‌ها به ترتیب ترکیب NiCrAlY ترکیب کامپوزیتی $50\% \text{NiCrAlY} + 50\% \text{8YSZ}$ و در نهایت ترکیب سرامیکی زیرکونیای تقویت شده با ایتریا (8YSZ) است. در این سیستم ضخامت لایه کامپوزیتی ۱۰۰ میکرومتر و ضخامت سایر لایه‌ها ۱۵۰ میکرومتر است. در این مطالعه شبیه‌سازی انتقال حرارت و توزیع

پسماند در لایه‌های مختلف و همچنین الگوی توسعه ترک و مود فرآیند شکست TBCها کاربرد فراوانی دارد. در بررسی‌های عددی و آزمایشگاهی که روی خوردگی داغ [۶] و رفتار حرارتی [۸] دمای بالای پوشش‌های سد حرارتی روی پره‌های قسمت داغ توربین صورت گرفت، نتایجی در مورد نحوه اعمال سیستم خنک کاری زیرلایه‌ها در کنار مکانهای حساس به تخریب‌های محیطی شناسایی شد. همچنین خدام و همکاران در تحقیق خود [۱۲]، مطالعه ریزساختاری جامعی روی تحولات فعال شونده با دما و توزیع فازی دما بالای پوشش‌های سد حرارتی انجام دادند و نیز تمرکز خود را روی عیوب بوجود آمده در فصل مشترک‌های بوجود آمده در پوشش‌های درجه‌بندی قرار دادند. واترمتز و همکارانش 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 [۱۳]. ژانگ از یک مدل نوین المان محدود با بهره بردن از روش کوپل حرارتی - مکانیکی برای بدست آوردن نقاط در معرض جوانه زنی ترک استفاده نمود و مد شکست هر یک از این نقاط را پیش‌بینی نمود [۱۴]. سعیدی و همکارانش هم 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 [۱۵]. 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 همکارانش مورد بررسی قرار گرفت [۱۶]. اکبرپور و همکارانش از یک مدل چند مقیاسی میکرومکانیکی برای شبیه‌سازی المان محدود توزیع تنش

جدول ۱. خواص فیزیکی و مکانیکی اجزای پوشش سد حرارتی.

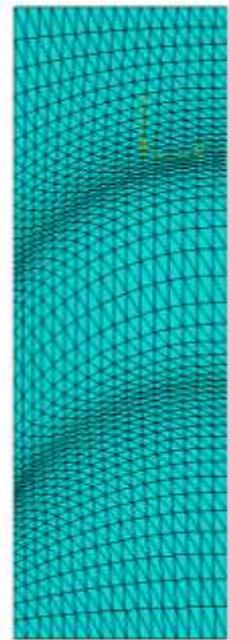
خواص ماده	دما (k)	مدول الاستیک (GPa)	دانستیتنه (kg/m ³)	ضریب پواسون	ضریب انبساط حرارتی (10 ⁻⁶ .k ⁻¹)	گرمای ویژه (J.(kg.k) ⁻¹)	هدایت حرارتی (W/m ² .C)
زیرلایه Inconel738	۲۷۶	۲۰۰	۸۲۰	۰/۳	۱۴/۴	۴۳۱	۱۱/۵
	۶۷۳	۱۷۹					۱۷/۵
	۱۰۷۳	۱۴۹					۲۳/۸
	۱۴۷۳	۱۴۰					۲۴/۴
لایه واسط NiCoCrAlY	۲۷۶	۲۲۵	۷۳۲۰	۰/۳	۱۱/۶	۵۰۱	۴/۳
	۶۷۳	۱۸۶					۶/۴
	۱۰۷۳	۱۴۷					۱۰/۲
	۱۴۷۳	۱۳۴					۱۱/۳
لایه سطحی (YSZ)	۲۷۶	۲۱۰	۵۴۰۰	۰/۲	۹/۱	۵۰۰	۱/۰۶
	۶۷۳	۲۰۵					۰/۱۸
	۱۰۷۳	۱۸۱					۰/۱۶۵
	۱۴۷۳	۱۶۲					۰/۱۶۲
لایه کامپوزیتی 50% NiCoCrAlY + 50% YSZ	۲۷۶	۲۱۷/۵	۶۳۶۰	۰/۲۵	۱۰/۳۵	۵۰۰/۵	۲/۶۸
	۶۷۳	۱۹۵/۵					۳/۶
	۱۰۷۳	۱۶۴					۵/۴۳
	۱۴۷۳	۱۴۸					۵/۹۶



شکل ۱. حوزه محاسبات انتخابی با توجه به هندسه واقعی جسم موردنظر: الف- هندسه واقعی محفظه احتراق موتور توربوفن، ب- مقطع دو بعدی در راستای صفحه AA، ج- میدان محاسباتی شبیه سازی.

مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است. شکل ساده شده این قسمت از موتور بصورت استوانه‌ای با قطر ۲۲۰

تنش پسماند در محفظه احتراق یک موتور توربوفن مدنظر بوده است. حوزه محاسباتی مورد نظر در این



شکل ۲. حوزه محاسباتی مش‌بندی شده شامل مجموعه زیرلایه و پوشش.

خواص حرارتی و مکانیکی لایه میانی کامپوزیتی تشکیل دهنده پوشش سد حرارتی مطابق با رابطه (۱) از قانون Vegard قابل تعیین است [۱۴]:

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

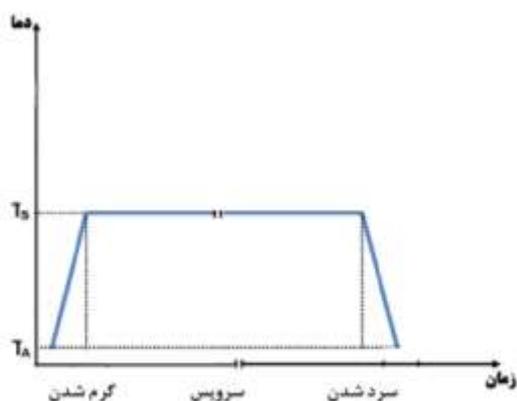
که در آن M_i خاصیت ماده در لایه i ام (به عنوان مثال لایه A $50\% \text{ NiCrAlY} + 50\% \text{ 8YSZ}$ ، M_A خاصیت ماده A (به عنوان مثال NiCrAlY)، $(V_A)_i$ کسر حجمی جز A در لایه i ام و M_B خاصیت ماده B (به عنوان مثال 8YSZ) است. جدول ۱ خواص مورد استفاده در تحلیل کوپل حرارتی و مکانیکی مورد استفاده را بصورت 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

میلیمتر و ارتفاع ۵۹۰ میلیمتر است که پوششی در حد چندصد میکرون روی آن داده شده است. در شکل ۱-الف هندسه واقعی سیستم مورد نظر نشان داده شده که متشکل از مجموعه زیرلایه و پوشش است. در شکل ۱-ب برشی دو بعدی از مجموعه با نمایی از آرایش مواد در راستای شعاعی دیده می‌شود. با توجه به تقارن و نسبت ابعادی قطر موتور به ضخامت میکرونی پوشش اعمالی، میدان شبیه‌سازی مطابق با شکل ۱-ج فرض شده است. به منظور شبیه‌سازی از نرم‌افزار آباکوس^۱ استفاده شد. تمامی اجزای سیستم اعم از زیرلایه و پوشش‌ها، دو بعدی، 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. شکل ۲ حوزه محاسبات را بصورت مش‌بندی شده نمایان 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 فرآیند پوشش‌دهی صرف‌نظر شده، 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 نمود و از خروجی آن در تحلیل پاسخ مکانیکی پوشش استفاده نمود.

^۱ Abaqus



شکل ۴. بارگذاری حرارتی اعمالی روی سیستم پوشش سد حرارتی.

در پوشش‌های سد حرارتی، فصل مشترک بین لایه‌ها سطحی زیر و ناصاف دارند که وابسته به نوع فرآیند و روش اعمال پوشش، دارای دامنه و طول موج‌های مختلفی است [۱۵-۱۶]. در پژوهش حاضر، هندسه فصل مشترک سینوسی در نظر گرفته شد و برای سادگی در محاسبات، کاهش زمان حل و توصیف فیزیکی نزدیک به واقعیت با احتساب نیم طول موج در نرم افزار ترسیم گردید. بدین منظور، با توجه به ضخامت پوشش، طول موج ۵۰ میکرون در اتصال بین لایه‌ها منظور گردید و از شرط مرزی تناوبی برای توصیف ادامه روند تغییرات این طول موج استفاده شد. به منظور کاهش خطای محاسبات، با انطباق گره‌ها در فصل مشترک از مقاومت حرارتی بین لایه‌ها صرف‌نظر شده است. شکل ۵ نحوه ترسیم فصل مشترک را در نرم‌افزار برای توصیف ناهمواری در فصل مشترک نشان می‌دهد.

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 متناسب محاسبه خواهد شد.

از حل معادلات دمای گره‌ها به صورت تابعی از زمان (t) به دست می‌آید. اختلاف دمای بین گرمترین و سردترین

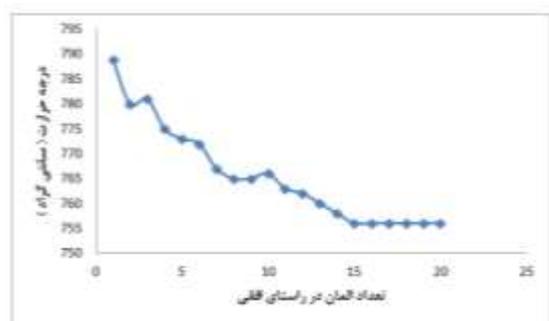
قطعه اعمال گردید. با اعمال قیود مناسب می‌توان از حرکت قطعه در جهات مقید شده جلوگیری نمود و نیز تفسیر صحیحی از تنش‌های پسماند درون ماده به دست آورد. از این‌رو، گوشه‌های افقی ساختار پوشش در جهت عمودی مقید شده و گوشه‌های عمودی از حرکت در جهت افقی بازداشته شده‌اند. شکل ۳ شرایط مرزی مکانیکی اعمال شده در این پژوهش را نشان می‌دهد. سیکل بارگذاری حرارتی بدین صورت است که مجموعه پوشش و زیرلایه، ابتدا در مرحله گرم شدن در محدوده زمانی صفر تا ۳۰۰ ثانیه تحت سیکل حرارت‌دهی است و طی این مدت زمان تا دمای مورد نظر سرویس گرم می‌شود و در مرحله سرویس در محدوده زمانی ۳۰۰ تا ۳۵۰ ثانیه تحت سرویس در دمای ثابت قرار می‌گیرد که سیستم پوشش سد حرارتی در این محدوده زمانی به پایداری دمایی می‌رسد. در آخرین مرحله، سیستم در محدوده زمانی ۳۵۰ تا ۶۵۰ ثانیه تحت سیکل سرمایش قرار گرفته است. نمودار شماتیک بارگذاری حرارتی در شکل ۴ نشان داده شده است [۱۳-۲۱-۲۲].



شکل ۳. اعمال شرایط مرزی مکانیکی به سیستم پوشش سد حرارتی.

جدول ۲. اعتبارسنجی مدل المان محدود مورد استفاده در این تحقیق.

خطا (درصد)	حداکثر تنش (اعتبارسنجی)	حداکثر تنش Chen [۱۷]	لایه
۴	۵۱۲/۱	۴۹۱/۷	LZ / 80% LZ + 20% YSZ
۳/۶	۴۸۳	۴۶۵/۷	80% LZ + 20% YSZ/ 60% LZ + 40% YSZ
۳/۹	۴۷۴	۴۵۵/۶	60% LZ + 40% YSZ/ 40% LZ + 60% YSZ
۴/۳	۴۵۸/۲	۴۳۸/۷	40% LZ + 60% YSZ/ 20% LZ + 80% YSZ



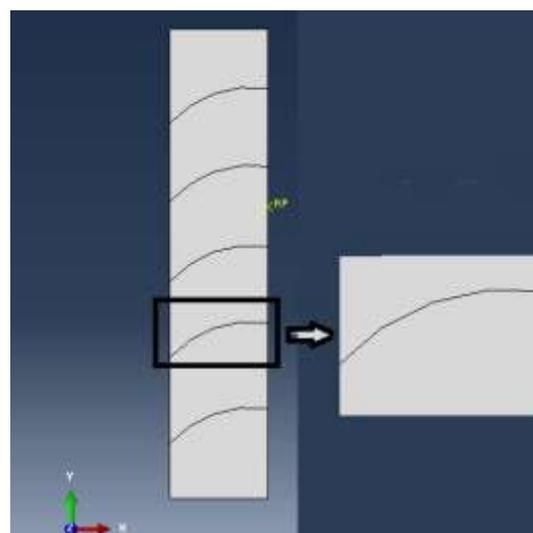
شکل ۶. آنالیز استقلال از مش برای پوشش مورد مطالعه در این تحقیق.

در نرم افزار اباکوس، یک حل اولیه از سرد شدن سیستم با حال همرفت در هوا انجام شد و بصورت یک job فایل ذخیره گردید و در مرحله بعدی این job در ماژول Load بارگذاری شد.

به منظور تایید مدل، محاسبات مربوطه به تنش برای پوشش سد حرارتی انجام و با مقایسه نتایج به دست آمده از محاسبات با نتایج موجود در منابع، صحت مدل مورد ارزیابی قرار گرفت. از پژوهش انجام شده توسط چن و همکارانش [۱۷] برای اعتبارسنجی این مدل استفاده گردید. مطابق با جدول ۲ نتایج حاصل از شبیه‌سازی تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی ارایه شده در پژوهش مورد استناد این تحقیق دارد.

نتایج و بحث

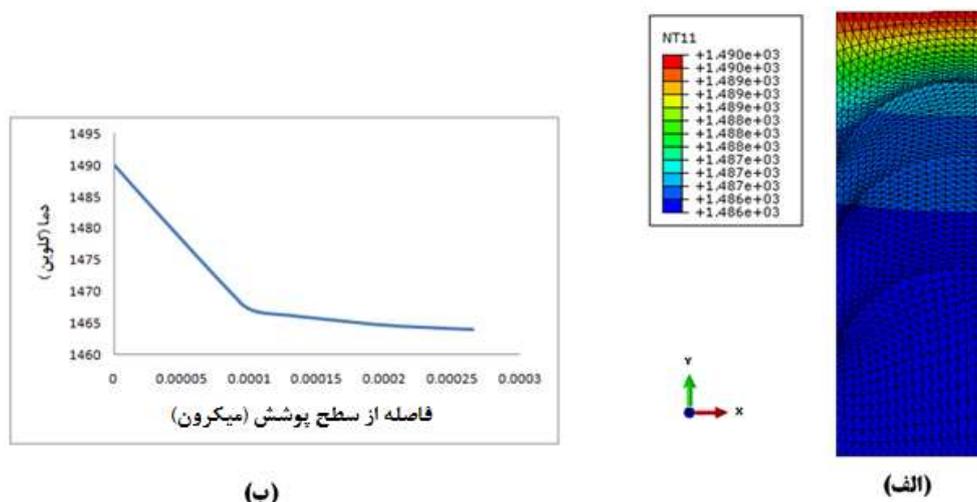
شکل ۶ آنالیز عدم وابستگی تحلیل المان محدود به اندازه مش برای شبیه‌سازی مورد مطالعه در این پوشش را نشان می‌دهد. منظور از راستای افقی در این شکل، مسیر روی



شکل ۵. نحوه ترسیم فصل مشترک را در نرم‌افزار.

گره‌ها (ΔT) (اختلاف دمای سطح TBC و زیرلایه) به عنوان فاکتور اصلی در عملکرد عایق حرارتی پوشش محاسبه می‌گردد. در میان بسیاری از عوامل موثر بر دوام و مکانیزم شکست پوشش پاشش حرارتی شده حین سرویس، تنش پسماند حاصل از فرآیند پوشش‌دهی و گرادیان دما نقش مهمی دارند.

به منظور اعمال تنشهای اولیه حاصل از فرآیند پاشش حرارتی پوشش، راهکار در نظر گرفته شده بدین صورت بود که در یک مطالعه شبیه‌سازی اولیه، کل پوشش ابتدا از دمای اسپری که حدود ۲۲۰۰ درجه سانتیگراد است تا دمای محیط سرد شد و طی آن توزیع تنش در کل سیستم شبیه‌سازی گردید. این توزیع تنش بصورت شرایط اولیه در مرحله دوم حل (اعمال شوک حرارتی) به سیستم اعمال گردید.



شکل ۷. توزیع دما در سیستم پوشش سد حرارتی درجه بندی شده: الف- کانتورهای توزیع دما در انتهای سیکل حرارتی گرمایش، ب- روند تغییرات دمایی در نمونه پوشش سد حرارتی درجه بندی شده.

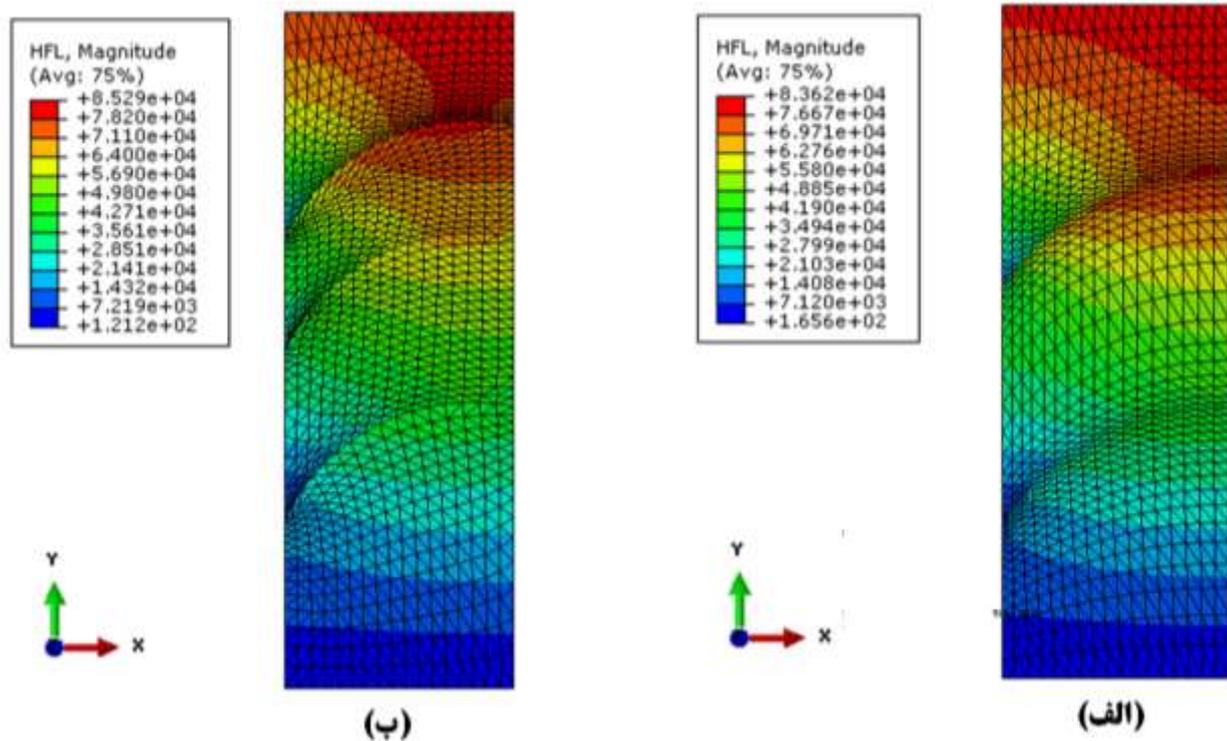
اعمال کرد و راندمان موتور را افزایش داد. این امر از طریق تامین حفاظت محیطی باعث افزایش عمر قطعات و کاهش هزینه‌های نگهداری آنها می‌شود [۳، ۵-۶].

در شکل ۸ توزیع شار حرارتی در امتداد سیستم‌های سد حرارتی معمولی و درجه‌بندی شده حین حرارت‌دهی نشان داده شده است. مطابق با این شکل همانگونه که در نحوه توزیع شار حرارتی نمایان است، در هر دو نوع سیستم به دلیل وجود مجموعه سیستم سد حرارتی سرامیکی، بخش عمده بار حرارتی در ناحیه بالایی پوشش متمرکز شده است و زیرلایه سوپر آلیاژی در دمای پایین‌تری نگاه داشته شده است. این مانا شدن و تعادل نسبی حرارتی بین لایه‌های بالایی و هوای داغ بالای سیستم باعث می‌شود نرخ انتقال حرارت از لایه‌های بالایی سرامیکی به سمت لایه‌های پایینی و در نهایت زیرلایه بسیار افت کند و تقریباً تمامی تبادل حرارت و انرژی در نیمه بالایی پوشش صورت پذیرد. نتیجه این امر، پایین ماندن دمای زیرلایه خواهد بود که امکان افزایش دمای کاری و راندمان موتور را فراهم می‌سازد.

در پژوهش حاضر، با هدف فراهم شدن امکان مقایسه یکسان اثرات بار حرارتی، ضخامت کلی پوشش در سیستم‌های پوشش سد حرارتی متداول و پوشش سد

فصل مشترک است. مطابق با این نمودار به ازای تعداد المان بزرگتر از ۱۵ در راستای افقی، وابستگی جواب انتگرالگیری عددی به اندازه و تعداد المان‌ها از بین می‌رود و صحت محاسبات عددی قابل اتکا می‌باشد.

شکل ۷ کانتورهای توزیع دما و روند تغییرات دمایی در نمونه پوشش سد حرارتی درجه بندی شده را حین قرارگیری در معرض بار حرارتی نشان می‌دهد. با توجه به آنکه وظیفه اصلی پوشش‌های سد حرارتی جلوگیری از انتقال جریان گرمایی به زیرلایه است، بنابراین قابلیت عایق‌سازی حرارتی و هدایت حرارتی پایین از مهمترین فاکتورها در ارزیابی عملکرد و توسعه کاربرد این پوشش‌ها به شمار می‌رود [۸، ۲۴]. همانگونه که در شکل ۶ مشاهده می‌شود در تمامی مراحل و زمان‌های اعمال انرژی حرارتی به سیستم پوشش سد حرارتی درجه‌بندی شده (FG-TBC)، تمرکز حرارت در لایه‌ها و نواحی بالایی پوشش است. این امر به معنای عایق کردن زیرلایه فلزی در برابر درجه حرارت‌های بالا است. بعبارت دیگر، با استفاده از این پوشش، از انتقال حرارت به سمت زیرلایه کاسته شده و سطح فلز در دمای پایین‌تری نگه داشته می‌شود. بنابراین می‌توان دماهای کاری بالاتری را در شرایط کاری توربین بخصوص در موتورهای هوایی

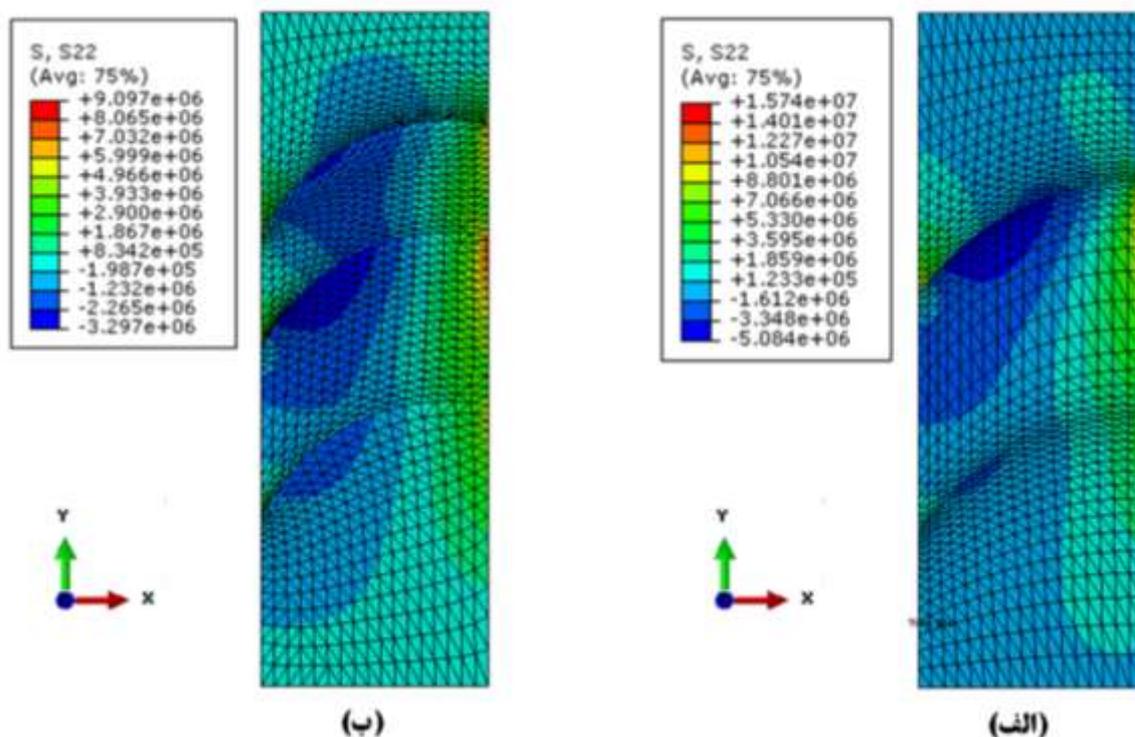


شکل ۸. کانتورهای توزیع شار حرارتی در انتهای سیکل حرارتی سرمایش در سیستم پوشش سد حرارتی الف - معمولی، ب - درجه بندی شده.

بسیار کاهش می‌یابد. در این حالت دمای زیرلایه بسیار کم افزایش می‌یابد و در نتیجه صدمه کمتری به نواحی زیرلایه‌ای می‌رسد. در برخی از مراجع گزارش شده است که مقاومت شوک حرارتی پوشش‌های سد حرارتی درجه بندی شده تا پنج مرتبه بهتر از پوشش‌های سد حرارتی معمولی (با ضخامت مشابه) است [۱، ۲۰-۲۱].

شکل ۹ توزیع تنش را در امتداد مقطع فصل مشترک زبر و با پستی و بلندی لایه واسط / لایه سرامیکی به ترتیب در پوشش سد حرارتی درجه‌بندی شده و پوشش سد حرارتی معمولی نشان می‌دهد. در سیستم پوشش سد حرارتی، ماده سرامیکی به علت ضریب انتقال حرارت کم و مقاومت زیاد در مقابل دما، درجات حرارت بسیار بالا را تحمل نموده و زیرلایه سوپرآلیاژی را در برابر تخریب‌های محیطی حفاظت می‌کند [۱۲، ۲۱-۲۴]. در عین حال، در پوشش‌های سد حرارتی، عدم تطابق ضرایب انبساط حرارتی مابین لایه سطحی سرامیکی و لایه واسط منجر به ایجاد تنش‌های بالا بویژه حین سیکل سرمایش

حرارتی درجه‌بندی شده یکسان در نظر گرفته شده است. ضعیف‌ترین ناحیه از لحاظ استحکام پیوندی، فصل مشترک لایه سطحی سرامیکی / لایه واسط فلزی است و در آزمون کشش نیز شکست در این ناحیه رخ می‌دهد [۱۸-۱۹]. همانگونه که از میزان پیشرفت جبهه دمایی (رنگ‌های مختلف در کانتورها) نمایان است، مقایسه توزیع شار حرارتی در دو سیستم سد حرارتی معمولی و درجه‌بندی شده مطابق با شکل ۸- الف و ۸- ب نشان می‌دهد که در پوشش سد حرارتی درجه بندی شده در یک زمان معین سپری شده از اعمال بار حرارتی، میزان نفوذ حرارت نسبت به پوشش سد حرارتی معمولی کمتر است. بعبارت دیگر، در سیستم سد حرارتی درجه بندی شده تعادل نسبی حرارتی مجموعه با هوای داغ بالای پوشش در زمان کوتاهتری حاصل شده است. بنابراین در سیستم پوشش سد حرارتی درجه بندی شده نسبت به حالت معمولی نقش عایق‌سازی حرارتی موثرتر بوده و میزان حرارت هدایت شده به زیرلایه سوپر آلیاژی



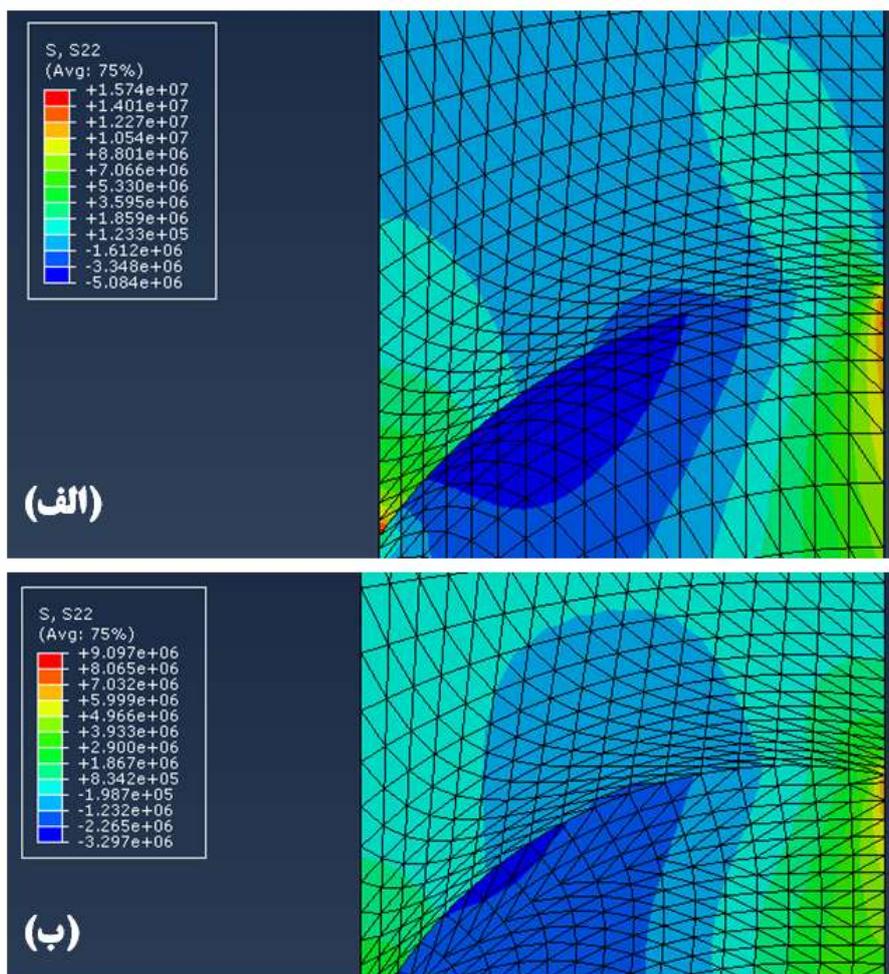
شکل ۹. توزیع تنش در سیستم پوشش سد حرارتی الف- معمولی ب- درجه بندی شده.

انبساط حرارتی مابین لایه‌های متوالی در نتیجه استفاده از لایه کامپوزیتی فلز-سرامیک مابین لایه سطحی و لایه واسط است.

مطابق با شکل ۱۰ به دلیل عدم تطابق ضرایب انبساط حرارتی میان 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 این دو لایه ایجاد می‌گردد. این مناطق بعنوان نواحی تمرکز تنش درون سیستم در نظر گرفته می‌شوند و حساس به جوامه‌زنی ترک خواهند بود. مطابق با شکل‌های ۱۰-الف و ۱۰-ب این الگوی توزیع تنش در هر دو حالت در پوشش‌های سد حرارتی درجه‌بندی شده و معمولی به صورت مشابه دیده می‌شود؛ لیکن در پوشش درجه‌بندی شده، حضور لایه کامپوزیتی لایه سرامیکی-لایه واسط و کاهش اختلاف ضرایب انبساط حرارتی مابین لایه‌ها، منشا کاهش اختلاف خواص وابسته به استحکام پیوند نظیر تنش می‌گردد.

می‌گردد که نتیجه آن دوام کم این پوشش‌ها در طول چرخه‌های حرارتی خواهد بود [۱۰]. در این پوشش‌ها معمولاً پوسته شدن، ورقه شدن و شکست زودهنگام تحت بارگذاری‌های حرارتی و مکانیکی رخ می‌دهد [۱۱]. گزارش شده است که در سیستم سد حرارتی شامل لایه سطحی عایق سرامیکی، لایه واسط فلزی و زیرلایه سوپرآلیاژی (با ترکیب شیمیایی مشابه پوشش لایه واسط) ضعیف‌ترین ناحیه از لحاظ استحکام پیوندی، فصل مشترک لایه سطحی سرامیکی / لایه واسط فلزی است و در آزمون کشش نیز شکست در این ناحیه رخ می‌دهد [۱۸-۱۹].

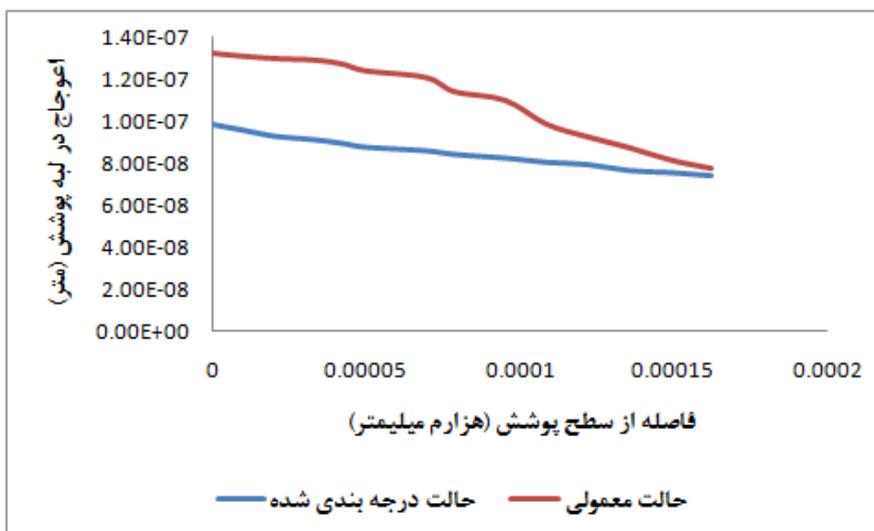
مقایسه سیستم سد حرارتی معمولی و درجه بندی شده مطابق با شکل‌های ۹-الف و ۹-ب نشان می‌دهد که شیب تغییرات تنش در سیستم سد حرارتی درجه بندی شده ملایم تر است که علت این امر تغییرات پیوسته ماده فلزی به ماده سرامیکی و در نتیجه کاهش اختلاف ضرایب



شکل ۱۰. توزیع تنش در سیستم پوشش سد حرارتی الف - متداول، ب - درجه بندی شده.

زمینه را برای کاهش اختلاف ضرایب انبساط حرارتی فراهم کرده و منجر به کاهش تنش گرمایی فصل مشترک که بدلیل عدم تطابق انبساط حرارتی رخ می‌دهد، دیگر، روند و شیب کندتر تغییرات تنش کششی دره به تنش فشاری قله در سیستم‌های پوشش سد حرارتی درجه بندی شده نسبت به سیستم پوشش سد حرارتی معمولی است که ناشی از همان اختلاف کمتر ضریب انبساط حرارتی در فصل مشترک لایه‌های واسط / سرامیکی است. این مساله به نوبه خود باعث کاهش پتانسیل فصل مشترک برای رشد ترک و گسستگی خستگی ناشی از بارگذاری سیکلی می‌گردد و باعث افزایش استحکام فصل مشترک و افزایش عمر سیستم می‌گردد [۲۴].

گزارش شده است که در پوشش سد حرارتی درجه‌بندی شده یک تغییر آهسته‌گردان ترکیب شیمیایی از سرامیک‌های مقاوم به حرارت تا فلزات مقاوم به شکست 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 [۲۲-۲۳]. روند کیفی و جبری تغییرات تنش‌ها حین گرمایش در هر دو سیستم پوشش سد حرارتی درجه بندی شده و معمولی نیز از همان الگوی قبلی تبعیت می‌کند. در سیستم پوشش سد حرارتی درجه‌بندی شده تنها به میزان کمی ارقام کوچکتر است. احتمال رشد ترک حین گرمایش کمتر از حالت سرامایش است. نکته قابل ملاحظه



شکل ۱۱. توزیع اعوجاج در سیستم پوشش سد حرارتی متداول و درجه بندی شده.

کردن، پوشش بسیار سریع سرد می شود. در نتیجه هدایت حرارتی پایین لایه عایق سرامیکی و اختلاف در ضریب انبساط حرارت زیرلایه و پوشش، تنش های بزرگی در پوشش ایجاد می شود که باعث ایجاد ترک و جدایش در فصل مشترک می شود [۲۵].

مزیت استفاده از پوشش های درجه بندی شده آن است که این مواد قادر به تحمل درجات حرارت بسیار بالا و اختلاف درجه حرارت قابل توجه و مقاوم در مقابل خوردگی و سایندگی بوده و مقاومت بالایی در مقابل شکست دارند [۱۱، ۲۰]. در نتیجه انتظار می رود که عمر مفید پوشش های سد حرارتی درجه بندی شده بیشتر از پوشش های سد حرارتی معمولی باشد. گزارش شده است که استحکام چسبندگی پوشش های سد حرارتی درجه بندی شده به طور قابل توجهی بیشتر از پوشش های سد حرارتی مضاعف است [۲۳].

همانگونه که در شکل ۱۱ مشاهده می شود، در پوشش های درجه بندی شده، از یک سو، میزان اعوجاج کمتری مشاهده شده و از سوی دیگر، حداکثر میزان اعوجاج در لایه های بالایی سیستم سد حرارتی متمرکز شده است و نسبت به پوشش های سد حرارتی معمولی نیز میزان بیشتری از تغییر شکل را در خود جای داده است. دلیل

همانگونه که در شکل ۱۰ مشاهده می شود در مجموعه سیستم پوشش سد حرارتی، تنش در حالت درجه بندی شده تقریباً نصف حالت معمولی است. نکته قابل ملاحظه این است که این کاهش تنش که عامل بسیار موثر و قابل توجهی در طراحی مهندسی و افزایش عمر پره های توربو فن است، بدون انجام تغییرات اساسی و گرانتیمنت در سیستم و فقط با اعمال درجه بندی بین لایه ها بدست آمده است. همانگونه که پیش تر اشاره شد، دلیل این بهبود کارایی را می توان در کاهش اختلاف ضرایب انبساط حرارتی بین لایه های مختلف و بدنبال آن کاهش اختلاف تنش در سیستم در اثر کامپوزیت سازی لایه ها دنبال نمود. بر اساس قانون اختلاط، با کاربرد پوشش درجه بندی شده اختلاف ضریب انبساط حرارتی بین لایه درجه بندی میانی و لایه های اولیه تعدیل می گردد و این تعدیل اختلاف ضریب انبساط حرارتی تاثیر خود را روی اختلاف تنش در فصل مشترک و توزیع تنش نشان می دهد.

گزارش شده است که در موتور توربو فن، شوک حرارتی در نتیجه تغییر سریع درجه حرارت در توربین گازی اتفاق می افتد. هنگامی که توربین روشن می شود، پوشش در مدت زمان بسیار کوتاهی از درجه حرارت محیط تا $1100-1600^{\circ}\text{C}$ گرم می شود. بالعکس در حالت خاموش

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، روند انتقال حرارت و نحوه توزیع تنش با توسعه یک مدل دو بعدی حرارتی-مکانیکی در پوشش سد حرارتی درجه‌بندی شده پاشش پلاسمایی شده مورد استفاده در ساخت موتور توربوفن شبیه‌سازی شده است و از این طریق امکان سنجی در انتخاب مواد و روش ساخت در پوشش سد حرارتی درجه بندی شده مورد مطالعه قرار گرفته است. برای دستیابی به این هدف، از نرم‌افزار آباکوس به عنوان محیط شبیه‌سازی، استفاده شده است. نتایج حاصل از این مطالعه به صورت زیر ارائه می‌شود:

۱- در پوشش‌های درجه بندی شده، لایه سطحی سرامیکی با کامپوزیت شدن با لایه واسط خاصیت عایق-کاری بهتری پیدا می‌کنند و از نفوذ حرارت بصورت موثرتری جلوگیری می‌کنند.

۲- بدلیل اختلاف ضریب انبساط حرارتی بین لایه واسط و لایه سطحی سرامیکی (چه در سیستم پوشش سد حرارتی معمولی و چه در سیستم پوشش سد حرارتی درجه‌بندی شده) در دره‌های سطح مشترک شاهد توزیع تنش کششی و در قله شاهد توزیع تنش فشاری هستیم. این الگوی توزیع در سرمایش و در گرمایش به صورت مشابه است.

۳- در سیستم پوشش سد حرارتی درجه‌بندی شده به دلیل حضور لایه کامپوزیتی بین لایه‌های واسط-ایتریایی، اختلاف بین ضرایب انبساط حرارتی در فصل مشترک‌ها کاهش می‌یابد و این مساله تاثیر خود را روی توزیع میدان‌های تنش در کل پوشش بصورت کاهش تنش تا حدود نصف میزان در پوشش معمولی می‌گذارد.

۴- استفاده از شبیه‌سازی کامپیوتری در تحلیل تنش و توزیع حرارت باعث کاهش هزینه‌های مصرف ماده، تولید، فرآیند و نیروی انسانی می‌گردد و در حصول یک پوشش سد حرارتی بهینه با حداکثر خواص و حداقل هزینه کمک شایان و قابل توجهی می‌کند.

این پدیده همانند توزیع تنش در جبران اختلاف ضرایب انبساط حرارتی بین لایه‌ها است که با افزودن لایه‌های کامپوزیتی محقق شده است. در لایه کامپوزیتی بکار رفته بین لایه ایتريایی و لایه واسط، ترکیب ایتريایی از یک سو باعث بهبود خواص عایق‌سازی حرارتی می‌گردد و از سوی دیگر، فصل مشترکی با حداکثر میزان سازگاری از نقطه نظر تغییر شکل بین لایه‌های مختلف بوجود می‌آورد. به عبارت دیگر این لایه، ترکیب بهبود یافته‌ای از دو لایه اطراف خود است که با کاهش اختلاف ضرایب انبساط حرارتی در فصل مشترک با لایه‌های مجاور، شرایط اتصال و توزیع تنش را بهبود می‌دهد. این بهبود عملکرد، حضور پرننگ‌تری در لایه کامپوزیتی بین لایه واسط و لایه ایتريایی دارد و لایه درجه‌بندی شده سازگاری تنشی و کرنشی موثرتری با لایه‌های سرامیکی و واسط ایجاد می‌کند. لازم به ذکر است که حضور لایه سرامیکی و لایه کامپوزیتی درجه‌بندی در سطوح بالاتر، میزان بار حرارتی ورودی به سمت لایه واسط را کاهش می‌دهد و باعث می‌شود که این لایه و زیرلایه متحمل تنش کمتری شوند. لازم به ذکر است که در حضور لایه کامپوزیتی درجه‌بندی شده شرایط توزیع تنش در سیستم پوشش سد حرارتی بهبود قابل ملاحظه‌ای یافته است.

در مجموع می‌توان اشاره نمود که در این مطالعه، اگر چه هدف اصلی در استفاده از پوشش‌های سد حرارتی درجه بندی شده، بهبود عمر کاری سیستم پوشش سد حرارتی از طریق کاهش اختلاف ضرایب انبساط حرارتی لایه‌های سرامیکی و فلزی بوده است؛ لیکن استفاده از سیستم درجه بندی شده و تغییر آهسته‌گردان ترکیب شیمیایی از سرامیک‌های مقاوم به حرارت تا فلزات مقاوم به شکست، نقش قابل توجهی در بهبود نقشه پیشرفت جبهه حرارتی به سمت زیرلایه داشته است. بعبارت دیگر، کاربرد ایده درجه بندی و استفاده از لایه‌های کامپوزیتی میان لایه‌های اصلی در پوشش سد حرارتی در تحقیق حاضر، علاوه بر بهبود اثرات مضر تنش، باعث بهبود خواص عایق‌سازی حرارتی نیز شده است.

مراجع

- اعمال، فصلنامه سرامیک ایران، ۶-۵ (۱۳۸۵) ۵۹-۴۵.
- O. Sarikayaa, E. Celik, *Effects of residual stress on thickness and interlayer of thermal barrier ceramic MgO-ZrO₂ coatings on Ni and AlSi substrates using finite element method*, Materials and Design, 23 (2002) 645-650.
 - R. M. Mahamood, E. T. Akinlabi Member, Iaeng, M. Shukla and S. Pityana, *Functionally Graded Material: An Overview*, Proceedings of the World Congress on Engineering, London, U.K., 2012.
 - A. M. Khoddami, A. Sabour, S. M. M. Hadavi, *Microstructure formation in thermally-sprayed duplex and functionally graded NiCrAlY/Yttria-Stabilized Zirconia coatings*, Surface & Coatings Technology, 201 (2007) 6019-6024.
 - B. Watremetz, M. C. Baietto-Dubourg, A. A. Lubrecht, *2D thermo-mechanical contact simulations in a functionally graded material: A multigrid-based approach*, Tribology International, 40 (2007) 754-762.
 - X. C. Zhang, B. S. Xu, H. D. Wang, Y. X. Wu, *Modeling of the residual stresses in plasma-spraying functionally graded ZrO₂/NiCoCrAlY coatings using finite element method*, Materials and Design, 27 (2006) 308-315.
 - B. Saeedi, A. Sabour, A. Ebadi and A. M. Khoddami, *Influence of the Thermal Barrier Coatings Design on the Oxidation Behavior*, J. Mater. Sci. Technol., 25 (4)(2009).
 - M. Baker, *Finite element simulation of interface cracks in thermal barrier coatings*, Computational Materials Science, 64(2012) 79-83.
 - Zheng Chen, N. Q. Wu, J. Singh, S. X. Mao, *Effect of Al₂O₃ overlay on hot corrosion behavior of Yttria stabilized coating in molten sulfate-vanadate salt*. The Solid Films, 443 (2003) 46-52.
 - S. Akbarpour, H. R. Motamedian, A. Abedian, *Micromechanical FEM modeling of thermal stresses in functionally graded materials*, 26th International Congress Of The Aeronautical Sciences, Anchorage, Alaska, USA(2008).
 - K. A. Khor, Y. W. G., *Thermal properties of plasma-sprayed functionally graded thermal barrier coatings*. Thin Solid Films, 372 (2000)104-113.
 - G. Di Girolamo, C. Blasi, A. Brentari, M. Schioppa, *Microstructure and thermal properties of plasma-sprayed ceramic thermal barrier coatings*, Studi & ricerche, research papers, 1-2 (2013) 69-76.
 - C. R. C. Lima, N. Cinca, J.M. Guilemany, *Study of the high temperature oxidation performance of Thermal Barrier Coatings with HVOF sprayed bond coat and incorporating a PVD ceramic interlayer*, Ceramics International, 38(2012) 6423-6429.
 - L. Jin, L. Ni, Q. Yu, A. Rauf, Ch. Zhou, *Thermal cyclic life and failure mechanism of nanostructured 13 wt%Al₂O₃ doped YSZ coating prepared by atmospheric plasma spraying*, Ceramics International, 38 (2012) 2983-2989.
۵. م. رحیمی پور و م. مهدی پور، لایه نشانی پلاسمایی *MCrAlY/YSZ* بر روی سوپر آلیاژ *Inconel 738* و بررسی رفتار خوردگی داغ آن، نشریه علمی پژوهشی علوم و مهندسی سطح، ۱۴ (۱۳۹۱) ۷۵-۷۷.
- R. Vaßen, M. Ophelia Jarligo, T. Steinke, D. Emil Mack, D. Stöver, *Overview on advanced thermal barrier coatings*, Surface & Coatings Technology, 205 (2010) 938-942.
 - L. Wang, Y. Wang, X. G. Sun, J.Q. He, Z.Y. Pan, C.H. Wang, *A novel structure design towards extremely low thermal conductivity for thermal barrier coatings – Experimental and mathematical study*, Materials and design, 35(2012)505-517.
۸. ح. جمالی، ر. مظفری نیا، ر. شجاع رضوی و ر. احمدی پیدانی، ارزیابی ظرفیت عایق سازی حرارتی پوشش های سد حرارتی پایه زیرکنیایی پاشش پلاسمایی شده، مجله علمی پژوهشی مهندسی سطح، ۱۴ (۱۳۹۱) ۸۷-۷۷.
- ح. زرگر، ح. سرپولکی و ح. رضایی، آشنایی با پوشش های سرامیکی محافظ حرارت و روشهای

19. X. Q. Cao, R. Vassen, D. Stoeber, *Ceramic materials for thermal barrier coatings*, Journal of the European Ceramic Society, 24 (2004) 1–10.
20. S. Zhang, D. Zhao, *Aerospace Materials Handbook*, CRC Press, 1 (2012).
21. M. N. Baig, F. A. Khalid, F. N. Khan, K. Rehman, *Properties and residual stress distribution of plasma sprayed magnesia stabilized zirconia thermal barrier coatings*, Ceramics International, 40(3) (2014) 4853-4868.
22. K. Sfar, J. Aktaa, D. Munz, *Numerical investigation of residual stress fields and crack behavior in TBC systems*, Mat. Science and Engineering A, 333 (2002) 351-360.
23. M. Białas, P. Majerus, R. Herzog, Z. Mróz, *Numerical simulation of segmentation cracking in thermal barrier coatings by means of cohesive zone elements*, Materials Science and Engineering A, 412 (2005), 241-251.
24. J. J. Sobczak, L. Drenchev, *Metallic Functionally Graded Materials: A Specific Class of Advanced Composites*, J. Mater. Sci. Technol., 29(4) (2013) 297-316.
25. Z. Han, B. Xu, H. Wang, S. Zhou, *A comparison of thermal shock behavior between currently plasma spray and supersonic plasma spray CeO_2 - Y_2O_3 - ZrO_2 graded thermal barrier coatings*, Surface & Coatings Technology, 201 (2007) 5253–5256.