

تحلیل ترمومکانیکی اثر افزودن آلومینا به سیستم پوشش سد حرارتی ایجاد شده به روش پاشش پلاسمایی از طریق شبیه‌سازی المان محدود

نسیم نایب پاشایی، نیما راسخ صالح

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شرق

امیر افکار، مجید نوری کمری

گروه پژوهشی خودرو و نیرو محرکه- پژوهشکده برق، مکانیک و ساختمان- پژوهشگاه استاندارد

سید محمد مهدی هادوی

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر تهران

(دریافت مقاله: ۹۶/۰۴/۲۵- پذیرش مقاله: ۹۶/۱۱/۱۸)

چکیده

در این مطالعه مجموعه‌ای از حالات محتمل افزودن آلومینا به سیستم پوشش سد حرارتی با در نظر گرفتن نتایج تجربی گزارش شده توسط سایر محققین از نقطه نظر حالات بهینه افزودن آلومینا به سیستم پوشش سد حرارتی از جنبه افزایش مقاومت به اکسیداسیون و خوردگی داغ در نظر گرفته شده و انتقال حرارت و توزیع تنش در آن‌ها بصورت مقایسه‌ای و مطلق مورد بحث و مطالعه قرار گرفته است. نتایج نشان داد که در نمونه‌های حاوی آلومینا منطقه بحرانی تمرکز تنش در فصل مشترک لایه حاوی آلومینا با لایه‌های مجاور رخ می‌دهد. همچنین همواره مقادیر تنش ماکزیمم در نمونه‌های حاوی آلومینا نسبت به نمونه‌های فاقد آلومینا بالاتر است. با توجه به ضریب هدایت حرارتی بالاتر آلومینا نسبت به YSZ، افزودن آلومینا به سیستم پوشش سد حرارتی خاصیت عایق سازی حرارتی را تضعیف می‌کند. واژه‌های کلیدی: پوشش سد حرارتی، آلومینا، المان محدود، تنش پسماند، توزیع حرارت.

Thermomechanical Analysis of the Effect of Adding Alumina to the Plasma Sprayed Thermal Barrier Coating Using Finite Element Analysis

Nasim Nayebpashae

Young Researchers and Elite Club-Tehran East Branch- Islamic Azad University, Tehran, Iran

Amir Afkar, Majid Nouri Kamari

Faculty of Electrical- Mechanical and Construction Engineering-Automotive Engineering - Standard Research Institute, Karaj, Iran

Nima Rasekh Saleh

School of Engineering- Tehran East Branch- Islamic Azad University, Tehran, Iran

Seyyed Mohammad Mehdi Hadavi

Department of Materials Engineering, Tarbiat Modares University

(Received 16 July 2017, accepted 7 February 2018)

Abstract

In this study, a set of possible conditions for the addition of alumina to the thermal barrier coating system was considered, taking into account the experimental results reported by other researchers, from the point of view of the optimal state of adding the alumina to the thermal barrier coating system, in terms of increasing oxidation resistance and hot corrosion. The heat transfer and distribution of stress have been discussed and studied in a comparative and absolute manner. The results showed that in alumina-containing samples, the critical area of concentration of stress is in the interface of the layers containing alumina. Also, the maximum stress values in alumina-containing samples are higher than those with no alumina. Due to the higher thermal conductivity of alumina than YSZ, the addition of alumina to the thermal barrier coating system weakens the thermal insulation property.

Keywords: Thermalbarrier Coating, Alumina, Finite Element, Residual Stress, Heat Distribution.

E-mail of corresponding author: nayebpashae@gmail.com.

مقدمه

قطعات بکاررفته در قسمت‌های داغ توربین، به دلیل شرایط شوک حرارتی، اکسیداسیون دما بالا و حضور گازهای خورنده که در شرایط کاری و در نتیجه احتراق آزاد می‌شوند، در معرض شرایط کاری دشوار قرار دارند. به این دلیل ایجاد پوشش روی قطعات در صنایع کلیدی مانند نفت و گاز و هوافضا بمنظور افزایش حفاظت محیطی، افزایش مقاومت به تنش‌های حرارتی و شکست خستگی ضروری است تا بتوان با افزایش عمر قطعات و کاهش هزینه‌های نگهداری، توان کاری و فواصل بین تعمیرات اساسی^۱ را افزایش داد. یکی از روش‌های افزایش کارایی اجزا در دمای بالا اعمال پوشش‌های سد حرارتی (TBC)^۲ برای عایق کردن اجزای موجود در بخش‌های داغ موتورهای توربوفن است که بصورت گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند. مکانیزم کاری این نوع پوشش بدین صورت است که با کاهش نرخ انتقال حرارت و پایین نگه‌داشتن دمای زیرلایه، امکان افزایش دمای گاز را فراهم نموده، از این‌رو سبب بهینه شدن مصرف سوخت، افزایش توان موتور و بهبود عمر مفید قطعات می‌گردند [۱-۲]. خواص منحصر بفرد پوشش‌های سد حرارتی بکار رفته در قسمت‌های داغ توربین‌های زمینی و هوایی باعث شده تا در سال‌های اخیر شاهد تحقیقات گسترده بر روی این گروه از پوشش‌های دما بالا باشیم [۳-۵].

پوشش‌های سد حرارتی اغلب از دو لایه تشکیل شده‌اند: لایه رویی - لایه رویی سرامیکی معمولاً از جنس اکسید زیرکونیم (ZrO₂) به همراه ۸-۶٪ اکسید ایتريم جهت پایدارسازی فاز تتراگونال زیرکونیا است. وظیفه اصلی آن کاهش دمای سطح قطعه است [۲, ۶]. 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. لایه واسط، علاوه بر کاهش عدم تطابق میان لایه رویی سرامیکی و زیرلایه سوپرآلیاژی، مقاومت به اکسیداسیون و خوردگی داغ را ایجاد می‌کند [۱, ۷]. 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 (TGO) گفته می‌شود [۸-۹].

پوشش‌های سد حرارتی دولایه (معمولی)^۳، دوام کم در طول چرخه‌های حرارتی را نشان می‌دهند [۱۰-۱۱]. در TBCها 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 ضرایب انبساط حرارتی لایه رویی با لایه واسط و تنش‌های بالا در آن‌ها نسبت داده می‌شود [۱۰-۱۳].

دو دلیل اصلی ایجاد تنش در پوشش‌های سد حرارتی عبارتند از:

۱. عدم تطابق ضرایب انبساط حرارتی بین لایه‌های فلزی و سرامیکی.

۲. اکسیداسیون لایه واسط و تشکیل و رشد لایه

TGO

در سال‌های گذشته مطالعات بسیاری در ارتباط با بهبود دوام و عملکرد پوشش‌های سد حرارتی انجام شده است. شناسایی علل تخریب پوشش‌ها منجر به دو گروه تلاش گردید که عمر کاری سیستم پوشش را ارتقا می‌دهد و عبارتند از: ممانعت در برابر اکسیداسیون بیشتر لایه

جدول ۱. خواص حرارتی و مکانیکی لایه‌های تشکیل دهنده پوشش سد حرارتی [۱۴-۱۶]

³ duplex TBC

¹ Overhaul

² Thermal barrier Coating

Al ₂ O ₃	YSZ	لایه واسط NiCrAlY	زیرلایه Hastelloy-X	دما (K)	خواص ماده
۳۸۰	۲۱۰	۲۲۵	۲۰۱	۲۷۶	مدول الاستیک (GPa)
۳۳۸	۲۰۵	۱۸۶	۱۸۰	۶۷۳	
-	۱۸۱	۱۴۷	۱۵۰	۱۰۷۳	
۳۱۲	۱۶۲	۱۳۴	۱۴۱	۱۴۷۳	
۳۹۷۸	۵۴۰۰	۷۳۲۰	۸۲۲۰	۲۷۶	دانسیته (kg/m ³)
				۶۷۳	
				۱۰۷۳	
				۱۴۷۳	
۰/۳۷	۰/۲	۰/۳	۰/۳۲	۲۷۶	ضریب پواسون
				۶۷۳	
				۱۰۷۳	
				۱۴۷۳	
۵/۱	۹/۱	۱۱/۶	۱۳/۴	۲۷۶	ضریب انبساط حرارتی (×10 ⁻⁶ .K ⁻¹)
				۶۷۳	
				۱۰۷۳	
				۱۴۷۳	
۸۵۷	۵۰۰	۵۰۱	۴۴۲	۲۷۶	گرمای ویژه (J.(kg.K) ⁻¹)
	۵۷۶	۵۹۲	۵۱۴	۶۷۳	
	۶۳۷	۷۸۱	۶۶۸	۱۰۷۳	
	۶۵۰	۷۶۴	۸۳۱	۱۴۷۳	
۲۵/۲	۱/۰۶	۴/۳	۱۰/۴	۲۷۶	هدایت حرارتی (W/m ^۲ .C)
	۰/۸	۶/۴	۱۸/۶	۶۷۳	
	۰/۶۵	۱۰/۲	۲۳/۸	۱۰۷۳	
	۰/۶۲	۱۱/۳	۲۷/۴	۱۴۷۳	

جدایش لایه رویی از لایه واسط است که به دلایلی همچون: اکسیداسیون لایه واسط و تشکیل اکسید رشد یافته حرارتی (TGO) و یا نفوذ عوامل مضر مانند عوامل خوردنده که منجر به استحاله فازی ترکیب لایه رویی و پوسته پوسته شدن حین سیکل حرارتی و اکسیداسیون دمای بالا می شود، رخ می دهد. در مطالعات انجام شده افزودن آلومینا (Al₂O₃) به پوشش های سد حرارتی به منظور بهبود عملکرد پوشش پیشنهاد شده است. در این پوشش ها، به علت وجود Al₂O₃، از نفوذ اکسیژن و یا سایر عوامل مضر جلوگیری می شود و تشکیل TGO و تحول فاز زیرکونیا به تاخیر می افتد.

واسط و کاهش تنش گرمایی فصل مشترک که بدلیل عدم تطابق ضرایب انبساط حرارتی رخ می دهد [۱۷-۱۸]. بمنظور جلوگیری از اکسیداسیون بیشتر لایه واسط، آلومینا بعنوان یک عامل محافظ که مانع نفوذ اکسیژن می شود انتخاب شده است. بمنظور آزاد سازی تنش های حرارتی و بهبود کارایی بلند مدت سیستم پوشش، پوشش سد حرارتی درجه بندی شده (FG-TBC^۴) با یک تغییر آهسته گرادیان ترکیب شیمیایی از سرامیک های مقاوم به حرارت تا فلزات مقاوم به شکست پیشنهاد شد که امکان کاهش اختلاف ضرایب انبساط حرارتی را فراهم می آورد [۱۳، ۱۹].

یکی از دلایل اصلی شکست پوشش های سد حرارتی

⁴ Functionally Graded Thermal Barrier Coating (FG-TBC)

جدول ۲. خواص حرارتی و مکانیکی لایه‌های کامپوزیتی تشکیل دهنده پوشش سد حرارتی درجه بندی شده حاوی آلومینا

75% Al ₂ O ₃ + 25% YSZ	25% Al ₂ O ₃ + 75% YSZ	50% YSZ + 50% Al ₂ O ₃	50% NiCrAlY + 50% Al ₂ O ₃	دما (K)	خواص ماده
۳۴۶/۴۹	۲۶۲/۹۶	۳۰۷/۸۹	۳۲۵/۴۲	۲۷۶	مدول الاستیک (GPa)
۳۱۱/۷۸	۲۴۶/۴۳	۲۸۱/۵۸	۲۸۴/۴۸	۶۷۳	
۳۰۰/۷۰	۲۳۰/۴۱	۲۵۲/۴۲	۲۶۹/۰۳	۱۰۷۳	
۲۸۲/۴۳	۲۰۸/۷۳	۲۴۸/۳۷	۲۴۹/۳۳	۱۴۷۳	
۴۲۵۸/۳۴	۴۹۵۷/۰۱	۴۵۸۱/۱۹	۵۱۵۴/۷۱	۲۷۶	دانشسته (kg/m ³)
				۶۷۳	
				۱۰۷۳	
				۱۴۷۳	
۰/۲۶	۰/۲۲	۰/۲۳	۰/۲۹	۲۷۶	ضریب پواسون
				۶۷۳	
				۱۰۷۳	
				۱۴۷۳	
۵/۸۹	۷/۸۵	۶/۸	۷/۳۹	۲۷۶	ضریب انبساط حرارتی (×10 ⁻⁶ .K ⁻¹)
				۶۷۳	
				۱۰۷۳	
				۱۴۷۳	
۷۸۶/۶۲	۶۱۱/۲۵	۷۰۵/۵۷	۷۳۱/۶۵	۲۷۶	گرمای ویژه (J.(kg.K) ⁻¹)
				۶۷۳	
				۱۰۷۳	
				۱۴۷۳	
۲۰/۴۴	۸/۵۸	۱۴/۹۶	۱۷/۸۴	۲۷۶	هدایت حرارتی (W/m°C)
				۶۷۳	
				۱۰۷۳	
				۱۴۷۳	

واسط [۲۵-۲۷]،

ج- افزودن آلومینا به ترکیب پوشش سد حرارتی (اعمال لایه کامپوزیتی YSZ - Al₂O₃ و Al₂O₃ - NiCrAlY) [۸، ۱۷، ۲۰-۲۲، ۲۶-۲۸].
مطالعات تجربی نشان می‌دهد که اضافه نمودن آلومینا به سیستم پوشش سد حرارتی (چه به صورت لایه

بنابراین خواص مکانیکی و حرارتی پوشش‌های سد حرارتی بهبود می‌یابد که در نهایت باعث افزایش عمر مفید پوشش می‌شود [۱۷، ۲۰-۲۲].

در این دسته از تحقیقات سه گروه مطالعه انجام شده است:

الف- اعمال یک لایه رویی فشرده آلومینا روی سطح YSZ [۲۳-۲۴]،

ب- اعمال یک لایه Al₂O₃ بین لایه رویی و لایه

جدول ۳. الگوها و ضخامت لایه‌های طراحی شده در پوشش‌های سد حرارتی در نظر گرفته شده

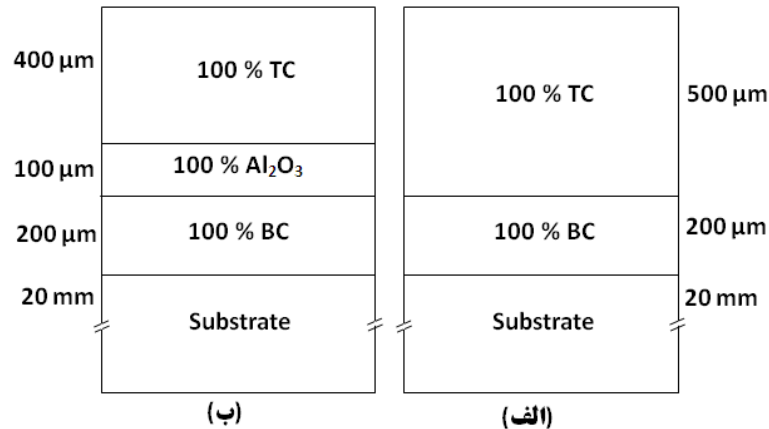
ضخامت لایه‌ها (میکرومتر)											
Al ₂ O ₃	50 % Al ₂ O ₃ + 50% YSZ	Al ₂ O ₃	YSZ	25 % Al ₂ O ₃ + 75% YSZ	50 % Al ₂ O ₃ + 50% YSZ	75 % Al ₂ O ₃ + 25% YSZ	Al ₂ O ₃	50% NiCrCoAlY+ 50% Al ₂ O ₃	NiCrAlY	نمونه	
-	-	-	۵۰۰	-	-	-	-	-	۲۰۰	Duplex	۱
-	-	-	۴۰۰	-	-	-	۱۰۰	-	۲۰۰	Al-1	۲
-	-	-	۳۰۰	-	-	-	۲۰۰	-	۲۰۰	Al-2	۳
-	-	۱۰۰	۳۰۰	-	-	-	-	-	۲۰۰	Al-3	۴
-	-	-	۴۰۰	-	۵۰	-	۵۰	-	۲۰۰	FG-1	۵
-	-	-	۳۰۰	-	۱۰۰	-	۱۰۰	-	۲۰۰	FG-2	۶
-	-	-	۲۰۰	-	۱۰۰	-	۲۰۰	-	۲۰۰	FG-3	۷
-	-	-	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	-	۲۰۰	FG-4	۸
-	-	-	۲۰۰	-	-	-	۲۰۰	۱۰۰	۲۰۰	FG-5	۹
-	-	-	۲۰۰	-	۱۰۰	-	-	۲۰۰	۲۰۰	FG-6	۱۰
-	۴۰۰	-	-	-	-	-	-	-	۲۰۰	FG-7	۱۱
۱۰۰	۱۰۰	-	۲۰۰	-	-	-	-	-	۲۰۰	FG-8	۱۲

فصل مشترک تحت بارگذاری‌های حرارتی و مکانیکی از طریق محاسبه میدان‌های تنش و توزیع حرارت مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مطالعه نیز از روش شبیه سازی المان محدود بمنظور مطالعه حالات مختلف افزودن آلومینا به سیستم پوشش سد حرارتی با هدف بررسی و طراحی حالت بهینه افزودن آلومینا به سیستم پوشش سد حرارتی استفاده شده است.

روش تحقیق

در این مطالعه هدف بررسی و مقایسه اثر افزودن آلومینا به سیستم پوشش سد حرارتی بر میزان خاصیت عایق‌سازی حرارتی سیستم پوشش و همچنین میزان تنش

آلومینا و چه به صورت لایه کامپوزیتی حاوی آلومینا می‌تواند تاثیر مثبتی بر خواص شیمیایی، خوردگی و اکسیداسیون پوشش بگذارد ولی تاثیر آن بر توزیع تنش و میزان عایق‌سازی حرارتی پوشش‌های سد حرارتی معین نشده است. از این رو، در این پژوهش مجموعه‌ای از حالات محتمل افزودن آلومینا به سیستم پوشش سد حرارتی با در نظر گرفتن نتایج تجربی گزارش شده توسط سایر محققین از نقطه نظر حالات بهینه افزودن آلومینا به سیستم پوشش سد حرارتی از جنبه افزایش مقاومت به اکسیداسیون و خوردگی داغ در نظر گرفته شده و انتقال حرارت و توزیع تنش در آن‌ها بصورت مقایسه‌ای و مطلق مورد بحث و مطالعه قرار گرفته است. انتخاب و توسعه پوشش‌های درجه‌بندی شده و یا تغییر ترکیب پوشش‌ها کاری پرهزینه، زمان‌بر و پیچیده است. شبیه‌سازی عددی بعنوان یک روش توانمند برای ارزیابی رفتار پوشش‌ها و



شکل ۱. تصویر شماتیک ترتیب لایه‌ها در مجموعه سیستم پوشش سد حرارتی شامل زیر لایه و لایه‌های تشکیل دهنده پوشش لایه رویی (TC) و لایه واسط (BC) و لایه آلومینایی (Al_2O_3) الف) Duplex (پوشش سد حرارتی دولایه) و ب) نمونه Al-1

لایه میانی کامپوزیتی تشکیل دهنده پوشش سد حرارتی مطابق با رابطه (۱) از قانون Vegard قابل تعیین است [۲۹]:

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

که در آن M_i خاصیت ماده در لایه i ام (بعنوان مثال لایه A) M_A خاصیت ماده A (بعنوان مثال NiCrAlY+50% 8YSZ)، $(V_A)_i$ کسر حجمی جز A در لایه i ام و M_B خاصیت ماده B (بعنوان مثال 8YSZ) است. جداول ۱ و ۲ خواص مورد استفاده در تحلیل کوپل حرارتی و مکانیکی مورد استفاده را بصورت تابعی از دما نشان می‌دهد.

بمنظور ایجاد هندسه مدل از ساختارهای چندلایه پوشش مطابق با الگوهای پیش بینی شده در جدول ۳ استفاده گردید. در طراحی‌های در نظر گرفته شده، در تمامی سیستم‌های پوشش سد حرارتی مورد مطالعه جنس زیرلایه سوپرآلیاژ Hastelloy-X است. ضخامت لایه NiCrAlY در تمامی نمونه‌ها ۲۰۰ میکرومتر در نظر گرفته شده است. شکل ۱، تصویر شماتیک مجموعه سیستم پوشش سد حرارتی شامل زیر لایه و لایه‌های تشکیل دهنده پوشش لایه رویی (TC°) و لایه واسط (BC°) و لایه آلومینایی (Al_2O_3) را در نمونه Duplex

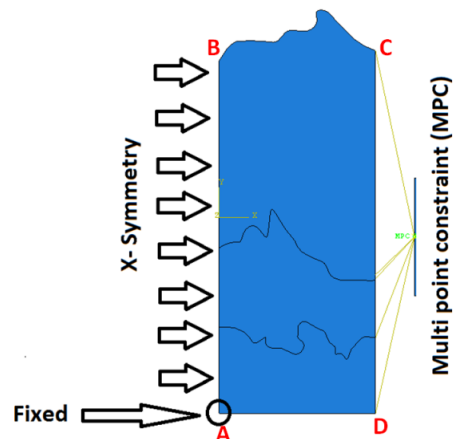
تحلیل شده به سیستم و در ادامه مقایسه و تحلیل توزیع تنش در حالات مختلف است. از این‌رو، حالات محتمل افزودن آلومینا به سیستم پوشش سد حرارتی در نظر گرفته شده و با در نظر گرفتن نتایج تجربی گزارش شده توسط سایر محققین از نقطه نظر حالات بهینه افزودن آلومینا به سیستم پوشش سد حرارتی از جنبه افزایش مقاومت به اکسیداسیون و خوردگی داغ، تلاش شده است تا اثر افزودن آلومینا به سیستم پوشش سد حرارتی بر انتقال حرارت و توزیع تنش سیستم بررسی شود. چند گروه نمونه حاوی آلومینا چه به صورت لایه مجزا و چه به صورت لایه کامپوزیتی (کامپوزیت آلومینا با اجزای تشکیل دهنده سیستم پوشش سد حرارتی (لایه رویی و یا لایه واسط)) طراحی شد و شبیه‌سازی انتقال حرارت و توزیع تنش بر روی این گروه از نمونه‌ها انجام شد. خروجی‌های مورد نظر همچون گرادیان دما، گرادیان تنش و مقادیر تنش در فصل مشترک‌ها از نرم‌افزار استخراج شد تا نقاط ضعف سیستم پوشش سد حرارتی حاوی آلومینا پیش‌بینی شود.

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 بدرستی پیش‌بینی نمود و از خروجی آن در تحلیل پاسخ مکانیکی پوشش استفاده نمود. خواص حرارتی و مکانیکی

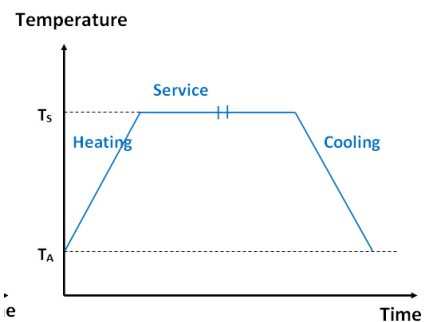
در تحلیل حاضر برای مش‌بندی مدل، از المان CPE6MT استفاده شده است که المان مثلثی درجه دوم با شش گره در رئوس و وسط اضلاع است. کاربرد این نوع المان، امکان بالاتر بردن صحت انتگرالگیری برای محاسبات جابجایی-های مربوط به کرنش و تنش پسماند را فراهم می‌سازد. بمنظور کاهش زمان حل از روش انتگرالگیری کاهشی از نوع کرنش صفحه‌ای بهره برده شده است. برای کاهش از بین بردن خطای محاسبات، با قرار دادن گره‌های واقع در فصل مشترک روی هم از مقاومت حرارتی بین لایه‌ها جلوگیری و به نوعی صرف‌نظر می‌شود.

در پژوهش حاضر به دلیل اهمیت فصل مشترک و تغییر خواص در این محدوده، بایستی توجه خاصی به المان‌بندی در این نواحی شود. لازمه این امر استفاده از مش‌بندی ریز در ناحیه فصل مشترک است. از طرفی به دلیل اهمیت زمان در شبیه‌سازی عددی، بکار بردن سیستم بهینه‌ای برای توزیع اندازه مش (مش ریز روی فصل مشترک و مش درشت در وسط لایه) بر روی کل حوزه محاسباتی امری قابل توجه و ضروری است. روش مورد استفاده در این تحقیق استفاده از مش‌بندی جهت‌دار یا بایاس 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.

بمنظور انجام تحلیل با شرایط حداکثری نزدیک به حالت واقعی باید شرایط مرزی هوشمندان‌های بگونه‌ای 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



شکل ۲. شرط مرزی مکانیکی اعمال شده در سیستم پوشش سد حرارتی



شکل ۳. سیکل دم-زمان اعمالی بر روی پوشش سد حرارتی (پوشش سد حرارتی دولایه) و نمونه Al-1 (منطبق با جدول ۳) نشان می‌دهد. در سیستم دولایه، پوشش متشکل از لایه واسط NiCrAlY و لایه رویی سرامیکی زیرکونیای تقویت شده با ایتریا (8YSZ^Y) است.

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 دیگر، سوپراآلیاژ زیرلایه نیز با هوای سرد بصورت جابجایی خنک می‌گردد. بمنظور شبیه‌سازی از نرم‌افزار آباکوس^۸ استفاده شد. تمامی اجزای سیستم اعم از 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.

جدول ۴. مقایسه نتایج آزمون شبیه سازی و اعتبارسنجی نتایج آن

لایه	حداکثر تنش (Chen) [۱۴] (MPas)	حداکثر تنش (پیش بینی شده بوسیله مدل حاضر) (MPas)	خطا (درصد)
YSZ / BC	۲۳۶	۲۵۰	۶
LZ / 80% LZ + 20% YSZ	۱۶۸	۱۸۵	۱۰
80% LZ + 20% YSZ / 60% LZ + 40% YSZ	۱۷۵	۱۹۴	۱۰
60% LZ + 40% YSZ / 60% YSZ + 40% LZ	۱۶۲	۱۵۵	۴

به مجموعه وارد نمود. این دما در حل‌های بعدی با توجه به شرایط حرارت‌دهی و قیود مکانیکی تغییر می‌کند. در مرحله اول بمنظور در نظر 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. بمنظور محاسبه تنش‌های ایجاد شده حین فرآیند سرمایش، لایه رویی در دمای ذوب ماده پاشش ۲۶۸۰ 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 است. سیکل حرارتی شامل گرمایش از دمای ۲۵ درجه سانتیگراد تا ۱۱۵۰ درجه سانتیگراد (دمای کاری اجزای داغ موتور هواپیما [۳۰]) در ۳۰۰ ثانیه، نگهداری در دمای ۱۱۵۰ درجه سانتیگراد و در نهایت مرحله سرمایش از ۱۱۵۰ درجه سانتیگراد تا ۲۵ درجه سانتیگراد طی ۳۰۰ ثانیه

مکانیکی متناسب با شرایط واقعی به طرفین 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 بدست آورد. از این‌رو، گوشه‌های افقی ساختار پوشش در جهت عمودی مقید شده و گوشه‌های عمودی از حرکت در جهت افقی بازداشته شده‌اند. بمنظور نمایش تکرار هندسه فصل مشترک در امتداد پوشش بایستی از قید دیگری استفاده شود که به نوعی حرکت گره‌ها را در جهت افقی با هم هماهنگ سازد. بعبارت دیگر، این قید که در اصطلاح حالت قیدگذاری چند نقطه‌ای^۹ 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

⁹ Multi point constraint (MPC)

بمنظور تایید مدل، محاسبات مربوطه به تنش برای پوشش سد حرارتی انجام و با مقایسه نتایج بدست آمده از محاسبات با نتایج موجود در منابع، صحت مدل مورد ارزیابی قرار گرفت. از پژوهش انجام شده توسط چن و همکارانش [۱۴] برای اعتبار سنجی این مدل استفاده گردید. مطابق با جدول ۴ نتایج حاصل از شبیه سازی تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی ارایه شده در پژوهش مورد استناد این تحقیق دارد.

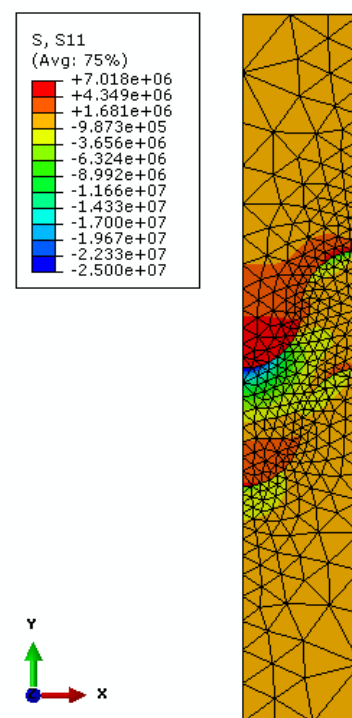
نتایج

شکل ۴ کانتورهای توزیع تنش S_{11} را در نمونه Duplex نشان می دهد. همان گونه که در این شکل مشاهده می شود، در فصل مشترک لایه واسط/ لایه رویی تنش ها به علت عدم تطابق ضرایب انبساط حرارتی و همچنین تشکیل رشد لایه TGO ایجاد می شود. گزارش شده است که با رشد و افزایش ضخامت لایه TGO، مقادیر تنش افزایش می یابد [۱۷، ۲۶، ۳۳-۳۴]. افزایش ضخامت لایه اکسیدی احتمال جدایش در پوشش سد حرارتی را پس از چرخه های حرارتی دما بالا افزایش می دهد. بنابراین وجود یک سد مقاوم در برابر نفوذ اکسیژن و جلوگیری از اکسیداسیون بیشتر لایه واسط ضروری است. همان گونه که پیش تر اشاره گردید Al_2O_3 بعنوان ماده مقاوم در برابر نفوذ اکسیژن و با هدف جلوگیری از رشد لایه اکسیدی انتخاب شده است.

در شکل ۵ کانتورهای توزیع تنش S_{22} در سه حالت نمونه پوشش سد حرارتی دولایه Duplex، نمونه Al-1 حاوی لایه آلومینایی به ضخامت ۱۰۰ میکرومتر و نمونه Al-2 حاوی لایه آلومینایی به ضخامت ۲۰۰ میکرومتر ملاحظه می گردد. با مقایسه تنش در حالت فاقد لایه آلومینایی و در نمونه سیستم پوشش سد حرارتی حاوی لایه آلومینایی با ضخامت ۱۰۰ میکرومتر (نمونه Duplex در شکل ۵-۰) الف و نمونه Al-1 (در شکل ۵-۱) مشاهده می گردد که در نمونه حاوی آلومینا مقادیر ماکزیم تنش افزایش یافته

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 پوشش های سد حرارتی، فصل مشترک بین لایه های سطحی زبر و ناصاف دارند که وابسته به نوع فرآیند و روش اعمال پوشش، دارای دامنه و طول موج های مختلفی است [۳۱-۳۲]. در پژوهش حاضر، هندسه فصل مشترک، سینوسی 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 زمان های مختلف حل شده و در هر مقطع زمانی اطلاعات دمایی بعنوان ورودی در معادله مکانیکی مورد استفاده قرار گرفته و توزیع تنش متناسب محاسبه خواهد شد.

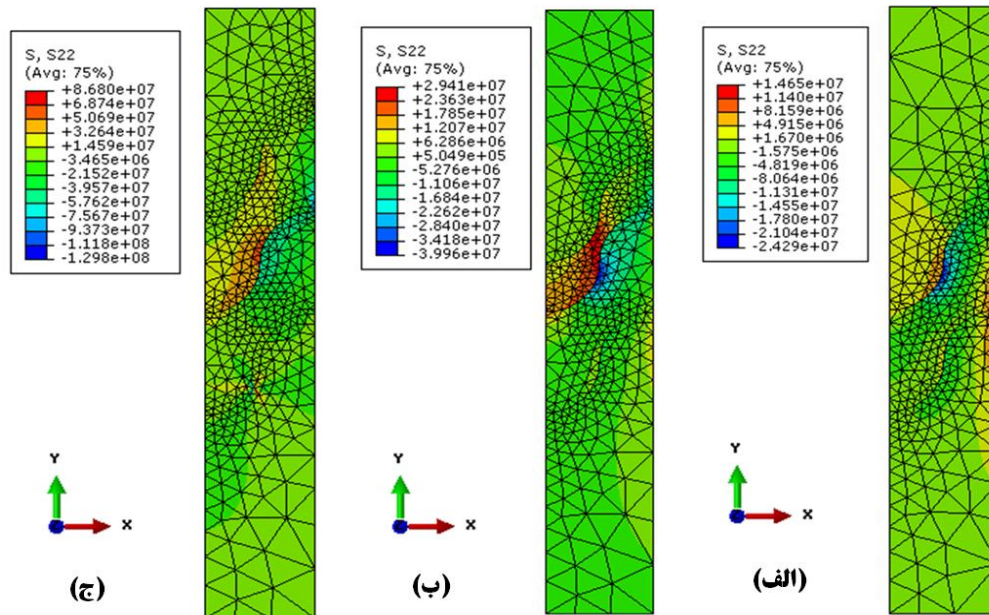


شکل ۴. کانتورهای توزیع تنش S_{11} بر حسب پاسکال در پوشش سد حرارتی Duplex پس از پایان چرخه حرارتی تشکیل TGO

است و تنش ماکزیمم داخل لایه آلومینایی متمرکز شده است. در نمونه AI-2 که نسبت به نمونه AI-1 ضخامت لایه آلومینایی بالاتری دارد مقادیر ماکزیمم تنش افزایش یافته است و تنش ماکزیمم در لایه آلومینایی در دو فصل مشترک لایه رویی/ لایه آلومینا و لایه واسط/ لایه آلومینا

متمرکز شده است.

نکته قابل ملاحظه دیگر با توجه به شکل ۴ آن است که در نمونه AI-2 نسبت به نمونه AI-1 گرادیان تغییرات تنش ملایمتر است. بگونه‌ای که مناطق تمرکز تنش که بیشتر در ناحیه دره فصل مشترک‌های لایه رویی/ لایه



شکل ۵. کانتورهای توزیع تنش S22 بر حسب پاسکال در نمونه‌های الف) Duplex، ب) AI-1 و ج) AI-2

آلومینا و لایه واسط/ لایه آلومینا متمرکز شده‌اند از یکدیگر دور شده‌اند و همانند نمونه AI-1 جمع اثر این دو منطقه تمرکز تنش بر روی یکدیگر واقع نشده است.

از منظر مسیر رشد ترک هم می‌توان ادعا نمود که در نمونه دارای لایه آلومینای میانی، با افزایش ضخامت آلومینا، حالت رشد ترک عرضی در بدنه لایه آلومینا به حالت طولی در راستای ضخامت تبدیل می‌شود.

شکل ۶ کانتورهای توزیع دما را در سه نمونه پوشش سد حرارتی دولایه Duplex، نمونه AI-1 حاوی لایه آلومینایی به ضخامت ۱۰۰ میکرومتر و نمونه AI-2 حاوی لایه آلومینایی به ضخامت ۲۰۰ میکرومتر نشان می‌دهد. با مقایسه شکل ۶-الف و شکل ۶-ب ملاحظه می‌گردد که در نمونه Duplex عملکرد حرارتی بهتری از جنبه پیشروی جبهه دمایی نسبت به نمونه AI-1 که حاوی لایه

آلومینایی به ضخامت ۱۰۰ میکرومتر است، مشاهده می‌شود. در سیستم پوشش سد حرارتی وظیفه اصلی عایق‌سازی حرارتی به عهده لایه رویی سرامیکی YSZ است. به نظر می‌رسد که در هر سه حالت فوق ضخامت لایه عایق رویی کافی بوده است و با توجه به کفایت ضخامت لایه عایق رویی، عایق‌سازی حرارتی و حفاظت زیرلایه مرتفع می‌گردد. بعبارت دیگر با توجه به آن‌که در نمونه Duplex ضخامت لایه رویی ۵۰۰ میکرومتر و در نمونه AI-1 ضخامت لایه رویی ۴۰۰ میکرومتر است، عایق‌سازی کافی و تقریباً یکسانی در دو نمونه قابل پیش‌بینی است.

منطقه بحرانی تنش ماکزیمم در فصل مشترک لایه رویی و لایه واسط حذف شده است.

بنابراین از نقطه نظر مقاومت به خوردگی داغ و اکسیداسیون، این نمونه می‌تواند بعنوان الگوی نسبتاً مناسبی برای افزودن آلومینا به سیستم پوشش سد حرارتی در نظر گرفته شود. البته مکانیزم جدایش، ترک خوردن و شکست لایه آلومینایی بایستی در نظر گرفته شود. در مطالعه انجام شده توسط صارمی و همکاران [۲۸] خواص حرارتی و مکانیکی پوشش نانو آلومینا - YSZ مورد مطالعه قرار گرفته شده است و گزارش شده که استحکام کششی این پوشش به دلیل اختلاف در ضرایب انبساط حرارتی آلومینا و YSZ پایین بوده و شکست در فصل مشترک لایه آلومینا / YSZ اتفاق می‌افتد. عامل بعدی که در انتخاب الگوی مناسب افزودن آلومینا به سیستم پوشش سد حرارتی موثر است توزیع دما و میزان عایق سازی حرارتی پوشش است.

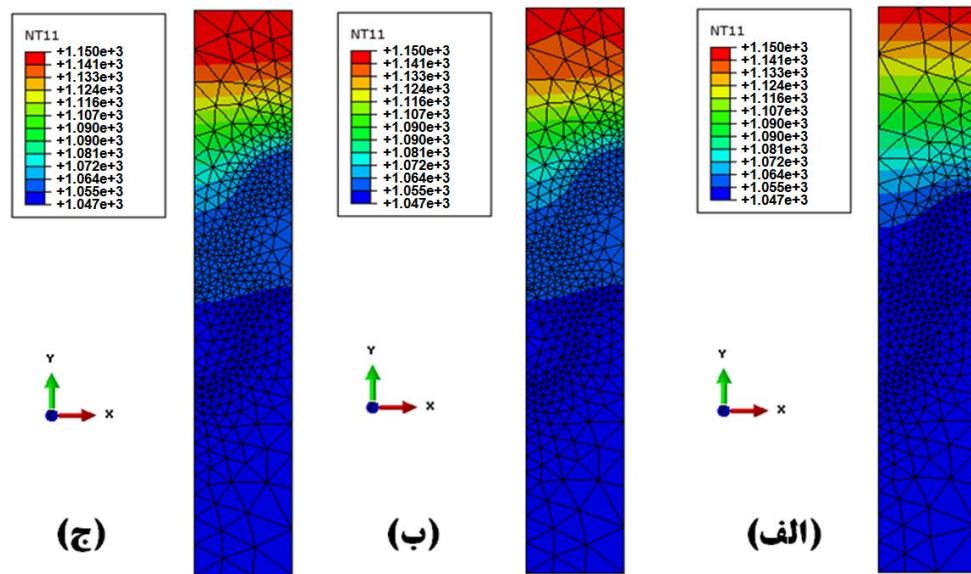
شکل ۸ کانتورهای توزیع دمایی نمونه Al-3 را نشان می‌دهد. ضریب هدایت حرارتی آلومینا تقریباً برابر با $25/2 \text{ W/m.k}$ [۳۵] و ضریب هدایت حرارتی YSZ تقریباً برابر با $1/05 \text{ W/m.k}$ [۳۵] (در حدود ۲۵ مرتبه کوچک‌تر از ضریب هدایت حرارتی آلومینا) است. مطابق با شکل ۸ به علت وجود لایه آلومینا در سطح پوشش سد حرارتی و با توجه به ضریب هدایت حرارتی بالای آلومینا، دمای ماکزیمم گازهای داغ در سطح پوشش به سهولت از لایه آلومینایی عبور کرده و به لایه YSZ رسیده است.

ژانگ^{۱۰} و همکاران [۲۵] با در نظر گرفتن یک مدل دایره‌ای چند لایه متحدالمرکز، اثر افزودن لایه میانی Al_2O_3 به سیستم پوشش سد حرارتی و در موقعیت میان لایه رویی و لایه واسط را بر روی تنش مورد مطالعه قرار داده‌اند و گزارش نموده‌اند که با افزایش ضخامت لایه میانی Al_2O_3 تنش در فصل مشترک‌های لایه رویی / لایه آلومینا و لایه واسط / لایه آلومینا افزایش می‌یابد. به عقیده این محققین ضخامت لایه رویی بر میزان تنش در تمامی لایه‌ها موثر است. نتایج مشابهی در تحقیق انجام شده توسط لیمارگا^{۱۱} و همکاران [۳۳] گزارش شده است. بنا بر گزارش این محققین ضخامت لایه میانی آلومینایی پاشش پلاسمایی شده بایستی بسیار نازک باشد تا از ایجاد تنش‌های بزرگ در سیستم جلوگیری شود [۳۳].

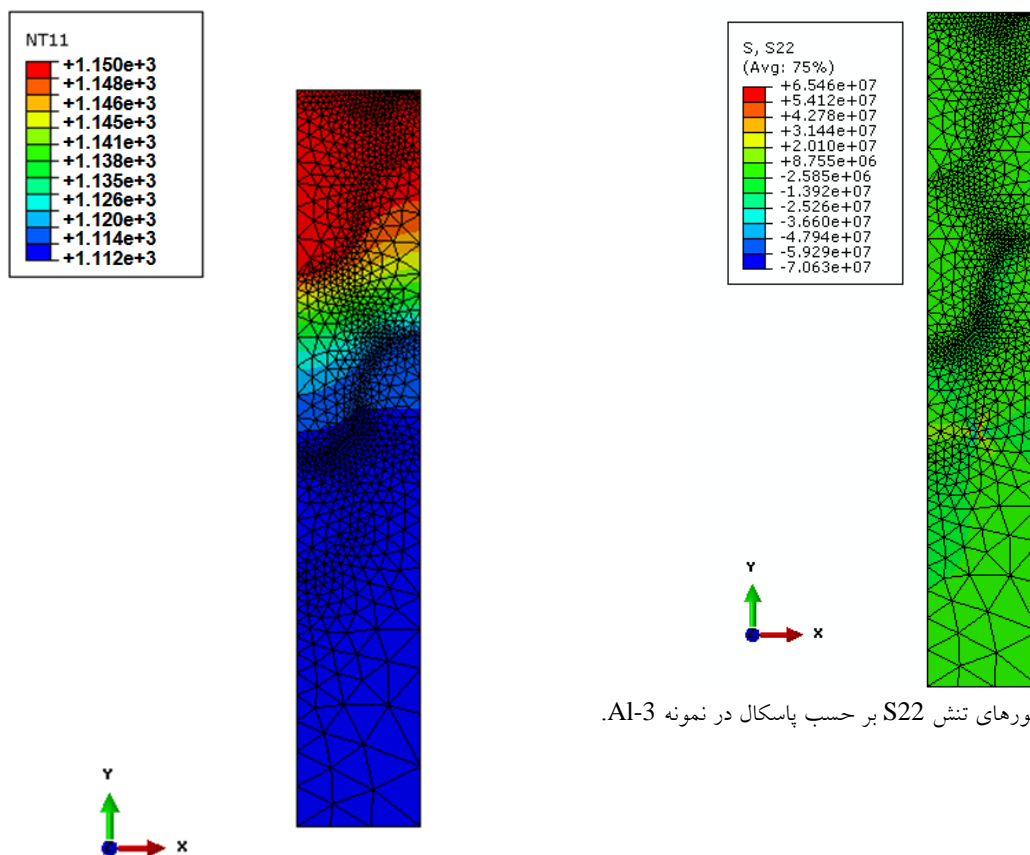
یکی از حالت‌های افزودن آلومینا به سیستم پوشش سد حرارتی که در مطالعات تجربی از سوی محققین بعنوان حالت بهینه افزودن آلومینا به سیستم پوشش سد حرارتی از نقطه نظر بهبود مقاومت به خوردگی داغ مطرح شده است [۲۰, ۲۳] نمونه Al-3 است. این نمونه شامل لایه واسط NiCrAlY به ضخامت ۲۰۰ میکرومتر لایه رویی YSZ به ضخامت ۳۰۰ میکرومتر و یک لایه آلومینا به ضخامت ۱۰۰ میکرومتر است که در بالاترین سطح پوشش و بر روی لایه رویی اعمال شده است. شکل ۴ کانتورهای توزیع تنش S_{22} را در این نمونه نشان می‌دهد. توزیع تنش در این نمونه یکنواخت است. همچنین نسبت به نمونه Duplex به علت کاهش احتمال تشکیل TGO به دلیل حضور لایه آلومینای سطحی بعنوان سد نفوذی اکسیژن،

¹¹ Limarga

¹⁰ Zhang



شکل ۶. کانتورهای توزیع دما در نمونه‌های الف (Duplex)، ب (Al-1) و ج (Al-2).



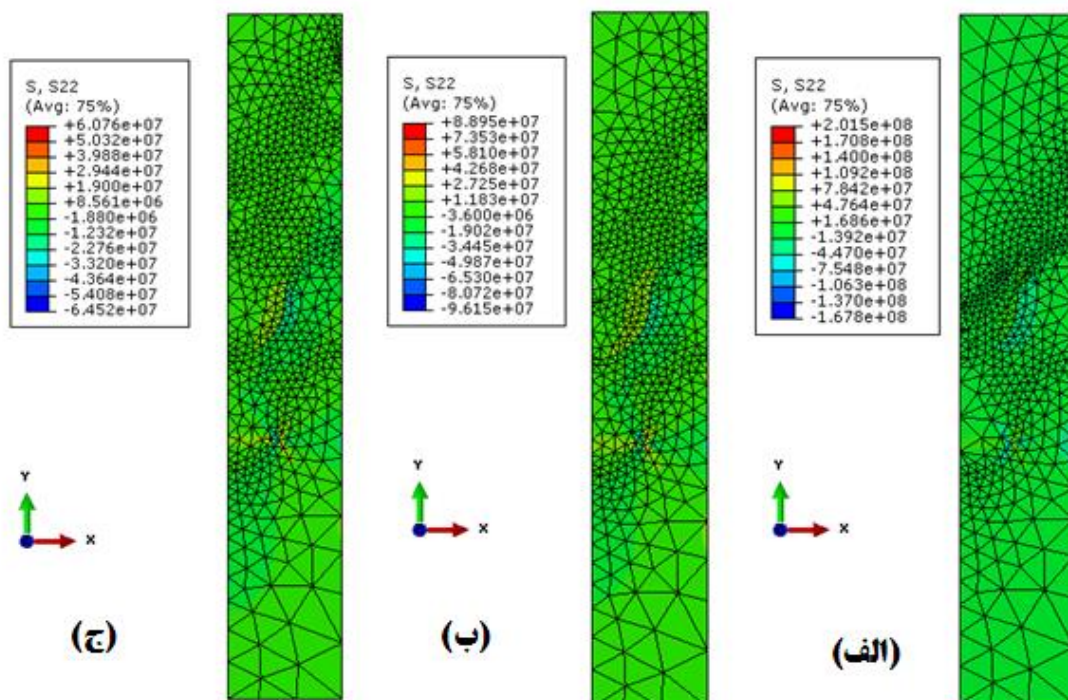
شکل ۷. کانتورهای تنش S₂₂ بر حسب پاسکال در نمونه Al-3.

شکل ۸. کانتورهای توزیع دما در نمونه Al-3

لایه YSZ بصورت نسبی اجازه عبور انرژی حرارتی به سمت لایه زیرین را نمی‌دهد و لایه واسط و زیرلایه در

با جمع بندی نتایج مطالعات انجام شده بر روی چهار الگوی فوق می توان اظهار نمود که افزودن یک لایه آلومینایی به سیستم پوشش سد حرارتی در عین حال که نقش سد نفوذی مناسبی در مقابل اکسیژن ایفا می کند و موجب عدم تشکیل لایه TGO و یا تشکیل لایه TGO با ضخامت کمتر، بهبود مقاومت به اکسیداسیون و خوردگی داغ می شود، از سوی دیگر تنش بالاتری نسبت به حالت معمولی به سیستم تحمیل می کند. این توزیع تنش وابسته به ضخامت لایه آلومینایی بیشتر در داخل لایه آلومینائی و یا فصل مشترک لایه آلومینایی با لایه های مجاور (فصل مشترک های لایه رویی / لایه آلومینا و لایه واسط / لایه آلومینا) متمرکز می شود.

شرایط ایمن قرار دارند. نکته قابل توجه در این مساله، جایگزینی مجاورت لایه YSZ با هوای داغ با مجاورت لایه YSZ با لایه سرامیکی حجیم آلومینایی با ظرفیت گرمایی بالا است که اثر تخریبی بر عملکرد لایه رویی دارد. وجود لایه آلومینایی با ضریب هدایت بالا باعث داغ شدن سریع این لایه می شود و از آنجایی که ظرفیت حرارتی این لایه تقریباً ۸۰۰ برابر هوای داغ است بعنوان منبع حرارت بصورت موثرتر و دنباله دارتری حرارت را به لایه رویی منتقل می کند. این مساله باعث پیشروی بیشتر جبهه حداکثر دما در امتداد لایه رویی می شود. این امر در بیان کمی بدین صورت قابل توصیف است که پیشروی ۱۰ تا ۱۵ درصدی جبهه مذکور حین گرمایش با هوای داغ به حدود ۳۰ درصد حین گرمایش با لایه آلومینای رویی داغ خواهد رسید.



شکل ۹. کانتورهای توزیع تنش S22 بر حسب پاسکال در نمونه الف - FG-1، ب - FG-2 و ج - FG-3

در کاهش عمر مفید سیستم پوشش سد حرارتی علاوه بر اختلاف ضرایب انبساط حرارتی محسوب می شود. در پوشش سد حرارتی پاشش پلاسمایی شده اتصال مکانیکی بین لایه ها بیشتر از طریق قفل شدن

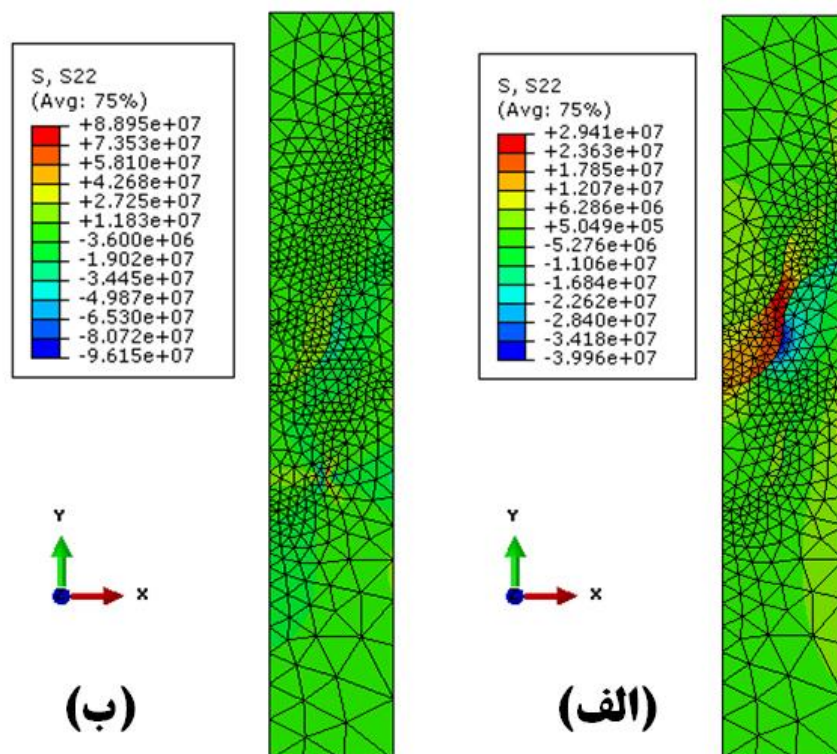
در ارتباط با ضخامت لایه آلومینایی گزارش شده است که هنگامی که ذرات آلومینای ریزدانه برای پاشش پلاسمایی استفاده می شوند هر چه ضخامت لایه آلومینایی بیشتر باشد زبری سطحی کاهش می یابد که عامل مخرب دیگری

مطالعه قرار گرفتند

شکل ۹ توزیع تنش در نمونه‌های FG-1، FG-2 و FG-3 را نشان می‌دهد. هر سه گروه نمونه حاوی لایه واسط، لایه آلومینا، لایه کامپوزیتی $50\% \text{ Al}_2\text{O}_3 + 50\% \text{ YSZ}$ اعمال شده میان لایه ریئی و لایه آلومینا و لایه رویی هستند. مطابق با جدول ۳ تفاوت این نمونه‌ها در ضخامت لایه آلومینایی، لایه رویی و لایه کامپوزیتی اعمال شده است. مطابق با شکل ۹ در نمونه FG-1 (شکل ۹-الف) که ضخامت لایه آلومینایی و لایه کامپوزیتی کمترین است، کمترین میزان تنش در فصل مشترک‌ها و توزیع یکنواخت‌تری از تنش مشاهده می‌گردد. به ازای ثابت ماندن ضخامت لایه کامپوزیتی و افزایش ضخامت لایه آلومینایی (شکل ۹-ب و شکل ۹-ج) روند افزایش ملایم‌تری در

مکانیکی لایه‌ها است. از این رو در پوشش سد حرارتی حاوی لایه آلومینایی با ضخامت بیشتر، پیوند بین لایه آلومینا با لایه‌های مجاور ضعیف‌تر خواهد بود [۱۷]. در مطالعه دیگری نیز گزارش شده است که به ازای ثابت ماندن ضخامت تمامی لایه‌ها با افزایش ضخامت لایه آلومینایی استحکام چسبندگی در فصل مشترک لایه آلومینا با لایه‌های مجاور کاهش می‌یابد [۲۷].

دو روش پیشنهادی برای متوقف نمودن جدایش لایه‌ها و افزایش استحکام چسبندگی، کاهش ضخامت لایه آلومینا و یا کاربرد ساختار پوشش سد حرارتی درجه‌بندی از طریق اعمال یک لایه کامپوزیتی میان لایه واسط و لایه آلومینایی و همچنین لایه آلومینایی و لایه رویی و در نتیجه کاهش تنش ایجاد شده درون پوشش است [۱۷، ۲۶، ۲۸]. بنابراین چند گروه نمونه پوشش سد حرارتی درجه‌بندی شده مطابق با جدول ۳ طراحی شده و مورد



شکل ۱۰. کانتورهای توزیع تنش S22 بر حسب پاسکال در نمونه الف - Al-1 و ب - FG-2

پوشش سد حرارتی درجه‌بندی شده شامل $\text{Al}_2\text{O}_3/(50\% \text{ Al}_2\text{O}_3 + 50\% \text{ ZrO}_2)/\text{ZrO}_2$ کمترین میزان تنش را

توزیع تنش نسبت به حالت بدون لایه کامپوزیتی ملاحظه می‌گردد. در مراجع متعددی بیان شده است که سیستم

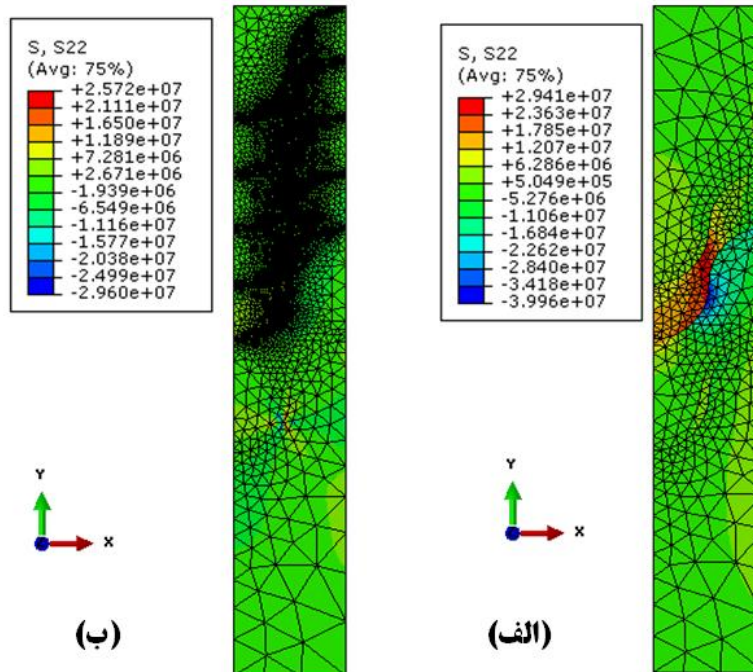
و لایه آلومینا است، نشان می‌دهد. در نمونه AI-1 تمرکز تنش بالا (در حدود ۳۰ مگاپاسکال) درون لایه آلومینایی و بویژه در فصل مشترک لایه آلومینا/ لایه رویی و لایه آلومینا/ لایه واسط مشاهده می‌شود که بیشتر ناشی از عدم تطابق ضرایب انبساط حرارتی لایه‌های مجاور است. در نمونه FG-2 توزیع تنش نسبتاً یکنواختی در امتداد پوشش مشاهده می‌گردد. در این

نمونه ماکزیمم مقدار تنش در ناحیه دره فصل مشترک آلومینا/ لایه واسط و در حدود ۱۲-۱۱ مگاپاسکال است. بنابراین افزودن لایه کامپوزیتی میانی $50\% \text{ Al}_2\text{O}_3 + 50\% \text{ YSZ}$ تا حدود زیادی موجب تعدیل توزیع تنش و کاهش میزان تنش ماکزیمم در منطقه بحرانی شده است.

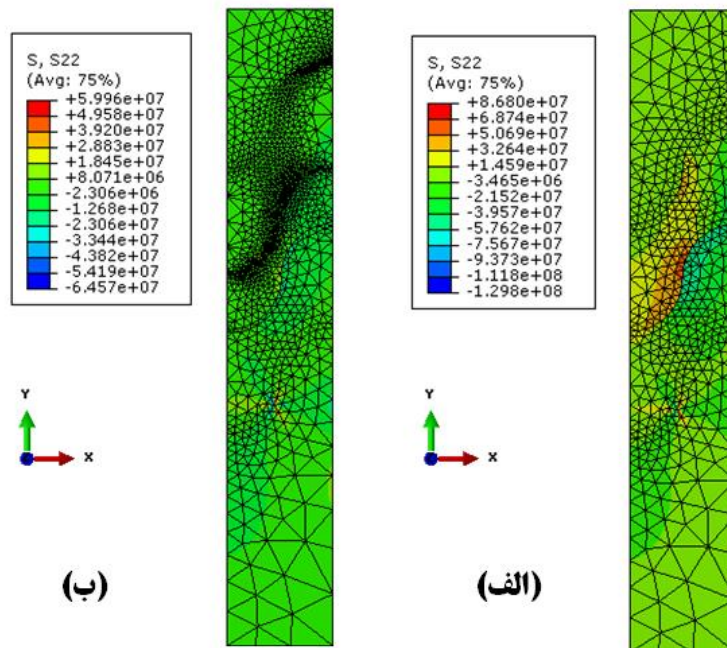
در بین سایر ترکیبات کامپوزیتی آلومینا/ زیرکونیا دارد [۱۷، ۲۶، ۳۴].

شکل ۱۰ کانتورهای توزیع تنش S22 را در نمونه AI-1 حاوی لایه آلومینایی به ضخامت ۱۰۰ میکرومتر و نمونه FG-2 که پوشش سد حرارتی درجه‌بندی شده شامل لایه آلومینایی به ضخامت ۱۰۰ میکرومتر و لایه کامپوزیتی $50\% \text{ Al}_2\text{O}_3 + 50\% \text{ YSZ}$ به ضخامت ۱۰۰ میکرومتر میان لایه رویی نمونه ماکزیمم مقدار تنش در ناحیه دره فصل مشترک آلومینا/ لایه واسط و در حدود ۱۲-۱۱ مگاپاسکال است. بنابراین افزودن لایه کامپوزیتی میانی $50\% \text{ Al}_2\text{O}_3 + 50\% \text{ YSZ}$ تا حدود زیادی موجب تعدیل توزیع تنش و کاهش میزان تنش ماکزیمم در منطقه بحرانی شده است.

شکل ۱۱ کانتورهای توزیع تنش S22 را در نمونه AI-1 حاوی لایه آلومینایی به ضخامت ۱۰۰ میکرومتر و نمونه FG-4 که پوشش سد حرارتی درجه‌بندی شده شامل لایه آلومینایی به ضخامت ۱۰۰ میکرومتر و لایه‌های کامپوزیتی



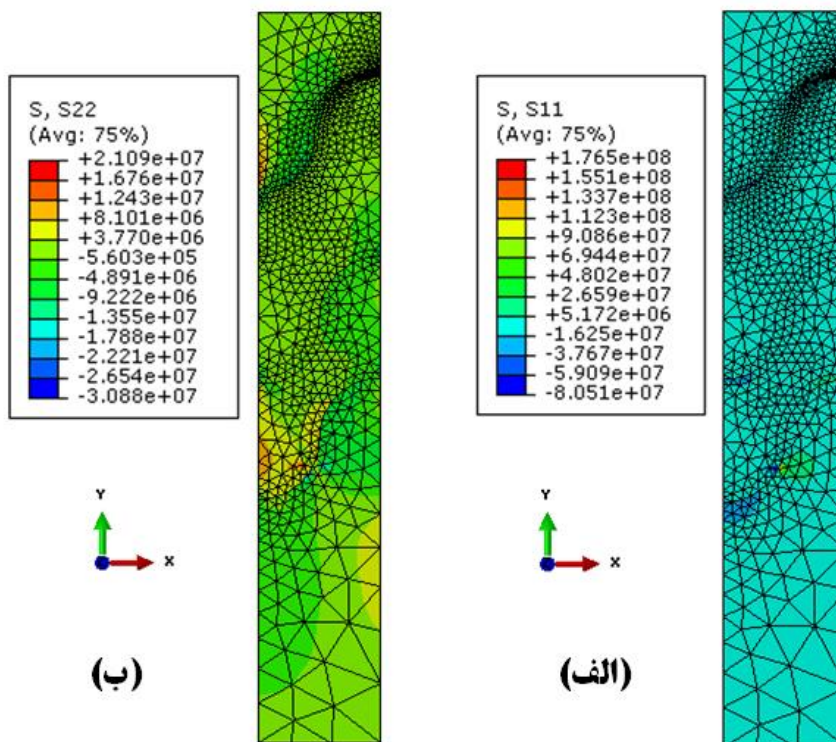
شکل ۱۱. کانتورهای توزیع تنش S22 بر حسب پاسکال در نمونه الف - AI-1 و ب - FG-4



شکل ۱۲. کانتورهای توزیع تنش S22 بر حسب پاسکال در نمونه الف- Al-2 و ب- FG-5

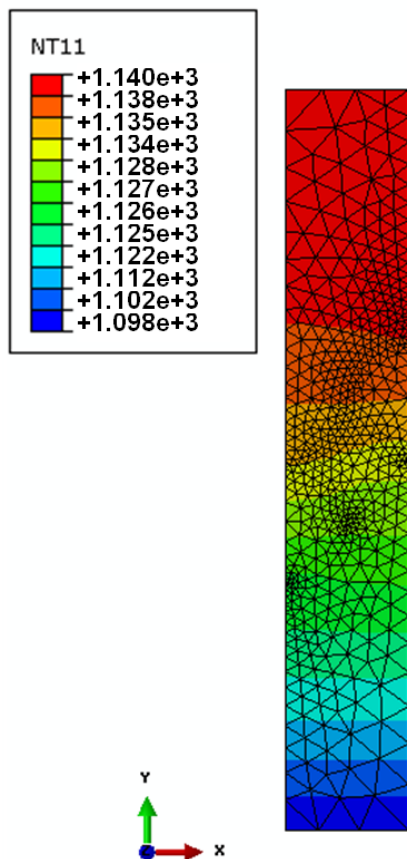
که پوشش سد حرارتی درجه بندی شده شامل لایه آلومینایی به ضخامت ۲۰۰ میکرومتر و لایه کامپوزیتی 50% Al₂O₃ + 50% NiCrAlY مابین لایه واسط و لایه آلومینایی به ضخامت ۲۰۰ میکرومتر است، نشان می دهد.

می رسد که با افزودن لایه کامپوزیتی مابین لایه آلومینا و لایه واسط تمرکز تنش در این منطقه حذف گردد. ۱۲۰ کانتورهای توزیع تنش S22 را در نمونه Al-2 حاوی لایه آلومینایی به ضخامت ۲۰۰ میکرومتر و نمونه FG-5



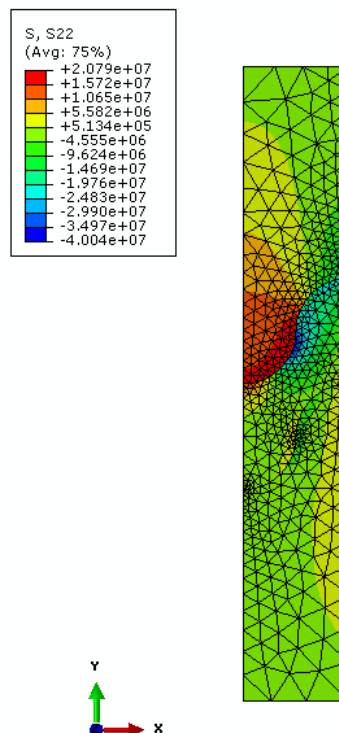
شکل ۱۳. توزیع تنش الف - S11 و ب- S22 بر حسب پاسکال در نمونه FG-6

عایق‌سازی حرارتی مطلوب می‌تواند بعنوان گزینه مناسبی از الگوی افزودن آلومینا به سیستم پوشش سد حرارتی در نظر گرفته شود.



شکل ۱۵. کانتورهای توزیع دما در نمونه FG-7

نمونه FG-7 از دیگر نمونه‌های بررسی شده در مطالعات تجربی مربوط به بهبود مقاومت به اکسیداسیون و خوردگی داغ در مطالعات تجربی بوده است [۲۱]. نمونه FG-7 متشکل از لایه واسط به ضخامت ۲۰۰ میکرومتر و لایه کامپوزیتی ۵۰٪ Al_2O_3 + ۵۰٪ YSZ با ضخامت ۴۰۰ میکرومتر است. شکل ۱۴ کانتورهای توزیع تنش این نمونه را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل ملاحظه می‌گردد در فصل مشترک لایه واسط و لایه کامپوزیتی منطقه تمرکز تنش وجود دارد. اختلاف ضریب انبساط حرارتی میان NiCrAlY و ۵۰٪ Al_2O_3 + ۵۰٪ YSZ دلیل اصلی ایجاد منطقه بحرانی با



شکل ۱۴. کانتورهای توزیع تنش S11 بر حسب پاسکال در نمونه FG-7

مطابق با این شکل در نمونه Al-2 نقطه بحرانی تمرکز تنش فصل مشترک لایه آلومینا/ لایه واسط است که به دلیل عدم تطابق ضرایب انبساط حرارتی میان NiCrAlY و Al_2O_3 ایجاد شده است. در نمونه FG-5 اعمال لایه کامپوزیتی ۵۰٪ Al_2O_3 + ۵۰٪ NiCrAlY مابین لایه واسط و لایه آلومینا موجب حذف تمرکز تنش در این فصل مشترک شده است. همچنین مقادیر تنش کاهش یافته است.

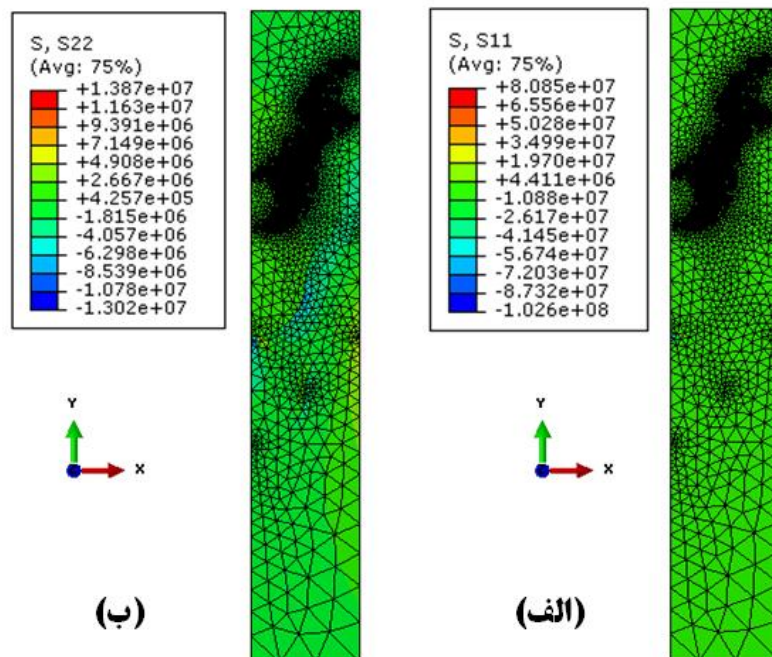
شکل ۱۳ توزیع تنش در نمونه FG-6 را که نمونه پوشش سد حرارتی درجه بندی شده شامل دو لایه کامپوزیتی ۵۰٪ Al_2O_3 + ۵۰٪ YSZ و ۵۰٪ Al_2O_3 + ۵۰٪ NiCrAlY است، نشان می‌دهد. انتظار می‌رود که با افزودن لایه‌های کامپوزیتی، عدم تطابق ضرایب انبساط حرارتی در فصل مشترک‌ها به حداقل رسیده و تمرکز تنش در این نواحی از بین برود. مطابق با شکل ۱۳ توزیع تنش در این وضعیت روند مطلوبی دارد و این نمونه به شرط مناسب بودن شرایط مقاومت به اکسیداسیون و خوردگی داغ و

تنش ماکزیمم در ناحیه دره فصل مشترک لایه واسط و لایه کامپوزیتی است. بنابراین از نقطه نظر تنش در این نمونه مناطق بحرانی وجود دارد که عمر مفید پوشش حین شرایط واقعی عملیات را به خطر می‌اندازد. تنش پسماند کششی در فصل مشترک عامل باز کردن ترک‌های موازی فصل مشترک است که منجر به توسعه ترک و جدایش کامل لایه-ها می‌شود [۲۶].

• کانتورهای توزیع دمای نمونه FG-7 در شکل ۱۵ نشان داده شده است. در لایه کامپوزیتی $50\% \text{ Al}_2\text{O}_3 + 50\% \text{ YSZ}$ با توجه به حضور آلومینا با ضریب هدایت حرارتی بالا و در مقابل عدم حضور لایه رویی خالص بعنوان رکن اصلی و اساسی عایق‌سازی، خاصیت عایق‌سازی حرارتی پوشش سد حرارتی بشدت تخریب شده است و مطابق با شکل ۱۵ دمای گازهای داغ تا اعماق زیادی از نمونه نفوذ کرده و عمر مفید زیرلایه را به خطر انداخته است. آخرین نمونه مورد مطالعه در این بخش نمونه پوشش سد حرارتی درجه بندی شده FG-8 متشکل از به ترتیب: لایه واسط با ضخامت ۲۰۰ میکرومتر، لایه رویی YSZ با ضخامت ۲۰۰ میکرومتر، لایه کامپوزیتی $50\% \text{ Al}_2\text{O}_3 +$ رخ می‌دهد [۲۸].

تنش ماکزیمم در ناحیه دره فصل مشترک لایه واسط و لایه کامپوزیتی است. بنابراین از نقطه نظر تنش در این نمونه مناطق بحرانی وجود دارد که عمر مفید پوشش حین شرایط واقعی عملیات را به خطر می‌اندازد. تنش پسماند کششی در فصل مشترک عامل باز کردن ترک‌های موازی فصل مشترک است که منجر به توسعه ترک و جدایش کامل لایه-ها می‌شود [۲۶].

• کانتورهای توزیع دمای نمونه FG-7 در شکل ۱۵ نشان داده شده است. در لایه کامپوزیتی $50\% \text{ Al}_2\text{O}_3 + 50\% \text{ YSZ}$ با توجه به حضور آلومینا با ضریب هدایت حرارتی بالا و در مقابل عدم حضور لایه رویی خالص بعنوان رکن اصلی و اساسی عایق‌سازی، خاصیت عایق‌سازی حرارتی پوشش سد حرارتی بشدت تخریب شده است و مطابق با شکل ۱۵ دمای گازهای داغ تا اعماق زیادی از نمونه نفوذ کرده و عمر مفید زیرلایه را به خطر انداخته است. آخرین نمونه مورد مطالعه در این بخش نمونه پوشش سد حرارتی درجه بندی شده FG-8 متشکل از به ترتیب: لایه واسط با ضخامت ۲۰۰ میکرومتر، لایه رویی YSZ با ضخامت ۲۰۰ میکرومتر، لایه کامپوزیتی $50\% \text{ Al}_2\text{O}_3 +$



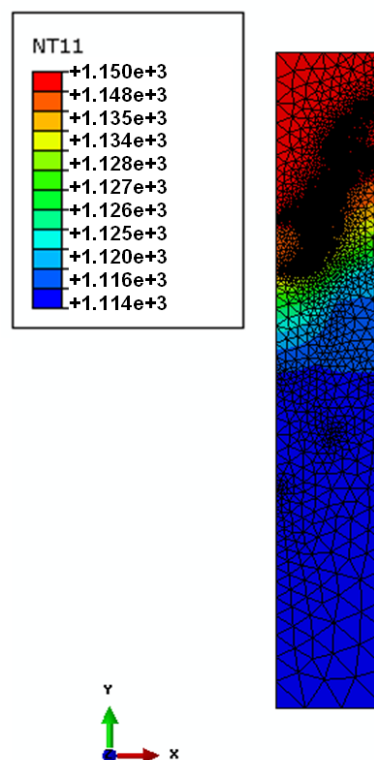
شکل ۱۶. کانتورهای توزیع تنش الف-S11 و ب-S22 بر حسب پاسکال در نمونه FG-8

معرفی می‌نماید. مطابق با شکل ۱۸ حداکثر مقادیر تنش در نمونه‌های AL-1، AL-2 و FG-2 مشاهده می‌شود. نمونه AL-1 حاوی یک لایه آلومینا به ضخامت ۱۰۰ میکرومتر میان لایه رویی و لایه واسط، نمونه AL-2 حاوی یک لایه آلومینا به ضخامت ۲۰۰ میکرومتر میان لایه رویی و لایه واسط و نمونه FG-2 حاوی یک لایه آلومینا و یک لایه کامپوزیتی 50% Al₂O₃ + 50% YSZ میان لایه رویی و لایه واسط است.

بررسی اجمالی مناطق دارای تنش بحرانی مطابق با جدول ۵ نشان می‌دهد که در نمونه‌های حاوی آلومینا(چه به صورت لایه مستقل و چه به صورت لایه کامپوزیتی حاوی آلومینا) منطقه بحرانی تمرکز تنش در فصل مشترک لایه حاوی آلومینا با لایه‌های مجاور رخ می‌دهد. به بیان کلی می‌توان گفت همواره: $\alpha_{NiCrAlY} < \alpha_{YSZ} < \alpha_{Al_2O_3}$ بنابراین اختلاف ضریب انبساط حرارتی میان آلومینا و NiCrAlY بیشتر از اختلاف ضریب انبساط حرارتی میان YSZ و NiCrAlY است. بعبارت دیگر انتظار می‌رود که با افزودن لایه آلومینایی به سیستم پوشش سد حرارتی تنش در فصل مشترک لایه آلومینا/ لایه واسط نسبت به سایر فصل مشترک‌ها حداکثر باشد که نتایج شبیه‌سازی نیز موید این امر است.

این امر در ارتباط با فصل مشترک لایه کامپوزیتی YSZ + Al₂O₃ / لایه NiCrAlY نیز صادق است.

با جمع بندی مطالب ارایه شده در این بخش می‌توان اظهار نمود که مطابق با مطالعات تجربی انجام شده، در تمامی حالات در نظر گرفته شده در این بخش، افزودن آلومینا به سیستم پوشش سد حرارتی موجب بهبود خواص مقاومت به اکسیداسیون و خوردگی داغ می‌گردد. لیکن، هنگام افزودن آلومینا به سیستم پوشش سد حرارتی توجه به تاثیر حضور آلومینا بر نقش عایق سازی حرارتی و توزیع تنش در سیستم پوشش سد حرارتی ضروری



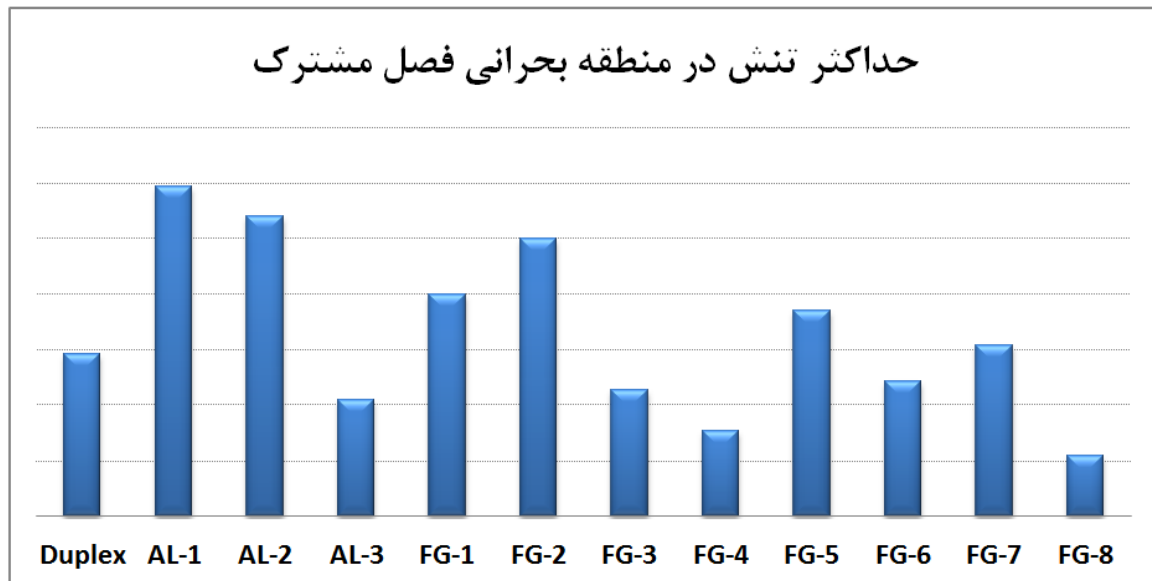
شکل ۱۷. کانتورهای توزیع دما در نمونه FG-8

در مطالعه انجام شده توسط ویدجاجا^{۱۲} و همکاران [۳۴] تنش‌های ایجاد شده حین اعمال پوشش سد حرارتی درجه بندی شده حاوی لایه آلومینا بررسی شده است و گزارش شده است که افزودن آلومینا به سیستم پوشش سد حرارتی منجر به ایجاد تنش‌ها در محدوده قابل قبول می‌شود. گزارش شده است که سیستم پوشش سد حرارتی شامل $ZrO_2 / 50\% ZrO_2 + 50\% Al_2O_3 / Al_2O_3$ کمترین میزان تنش را نسبت به سیستم پوشش سد حرارتی Duplex و سایر حالت‌های محتمل پوشش سد حرارتی درجه بندی شده حاوی آلومینا دارد [۳۴].

شکل ۱۸ بطور خلاصه مقادیر حداکثر تنش در مناطق بحرانی فصل مشترک نمونه Duplex و نمونه‌های حاوی لایه آلومینا و نمونه‌های پوشش سد حرارتی درجه بندی شده حاوی آلومینا را نشان می‌دهد. جدول ۵ مناطق دارای تنش بحرانی را در هر یک از نمونه‌های مورد مطالعه

^{۱۲}Widjaja

است. با توجه به اختلاف ضریب انبساط حرارتی آلومینا



شکل ۱۸. مقایسه حداکثر تنش در منطقه بحرانی فصل مشترک در نمونه Duplex و نمونه‌های حاوی آلومینا و نمونه‌های درجه بندی شده حاوی آلومینا

مقادیر افزودن آلومینا به سیستم پوشش از نقطه نظر میزان جزیی در ترکیب کامپوزیتی و ضخامت لایه آلومینایی افزوده شده، بیشتر باشد، مقادیر تنش القاء شده به سیستم پوشش سد حرارتی بیشتر خواهد بود.

با YSZ و NiCrAlY در لایه‌های رویی و واسط، استفاده از ایده مواد درجه بندی شده هنگام افزودن آلومینا به سیستم پوشش سد حرارتی مفید خواهد بود. همچنین با توجه به ضریب هدایت حرارتی بالای آلومینا و نقش مخرب آن بر خاصیت عایق‌سازی حرارتی پوشش سد حرارتی هر چه

جدول ۵. مناطق بحرانی تمرکز تنش در نمونه‌های پوشش سد حرارتی Duplex و نمونه‌های حاوی آلومینا

نمونه	فصل مشترک بحرانی تمرکز تنش
Duplex	لایه واسط / لایه سطحی
AL-1	داخل لایه آلومینایی
AL-2	لایه واسط / لایه آلومینا
AL-3	لایه واسط / لایه آلومینا
FG-1	لایه واسط / لایه آلومینا
FG-2	لایه واسط / لایه آلومینا
FG-3	لایه واسط / لایه آلومینا
FG-4	لایه واسط / لایه آلومینا
FG-5	لایه آلومینا / لایه کامپوزیتی حاوی آلومینا
FG-6	لایه آلومینا / لایه کامپوزیتی حاوی آلومینا
FG-7	لایه واسط / لایه آلومینا
FG-8	لایه واسط / لایه سطحی

3. Baig, M. N., Khalid, F. A., Khan, F. N., & Rehman, K. Properties and residual stress distribution of plasma sprayed magnesia stabilized zirconia thermal barrier coatings. *Ceramics International*, 40(3) (2014) 4853-4868.
4. Guo, L., Li, M., He, S., Zhang, C., Wang, Q., & Ye, F. Preparation and hot corrosion behavior of plasma sprayed nanostructured Gd₂Zr₂O₇-LaPO₄ thermal barrier coatings. *Journal of Alloys and Compounds*, 698 (2017) 13-19.
5. Wang, L., Li, D. C., Yang, J. S., Shao, F., Zhong, X. H., Zhao, H. Y., ... & Wang, Y. Modeling of thermal properties and failure of thermal barrier coatings with the use of finite element methods: A review. *Journal of the European Ceramic Society*, 36(6) (2016) 1313-1331.
6. Goswami, B., Ray, A. K., & Sahay, S. K. Thermal barrier coating system for gas turbine application-A review. *High Temperature materials and processes*, 23(2) (2004) 73-92.
7. Clarke, D. R., & Phillpot, S. R. Thermal barrier coating materials. *Materials Today*, 8(6) (2005) 22-29.
8. Karaoglanli, A. C., Altuncu, E., Ozdemir, I., Turk, A., & Ustel, F. Structure and durability evaluation of YSZ+ Al₂O₃ composite TBCs with APS and HVOF bond coats under thermal cycling conditions. *Surface and Coatings Technology*, 205 (2011) S369-S373.
9. Chen, W. R., Archer, R., Huang, X., & Marple, B. R. TGO growth and crack propagation in a thermal barrier coating. *Journal of Thermal Spray Technology*, 17(5-6) (2008) 858-864.
10. 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.

۱۱. زرگر حمیدرضا، سرپولکی حسین و ح. رضایی حمیدرضا، آشنایی با پوشش‌های سرامیکی محافظ حرارت و روش‌های اعمال، فصلنامه سرامیک ایران، ۶-۵ (۱۳۸۵) ۵۹-۴۵.
۱۲. ح. جمالی، ر. مظفری نیا، ر. شجاع رضوی و ر. احمدی پیدانی، ارزیابی ظرفیت عایق سازی حرارتی پوشش‌های سد

نتیجه‌گیری

در این پژوهش از طریق توسعه یک روش عددی مبتنی بر المان محدود اعتبار سنجی شده مجموعه‌ای از حالات محتمل افزودن آلومینا به سیستم پوشش سد حرارتی با در نظر گرفتن نتایج تجربی گزارش شده توسط سایر محققین از نقطه نظر حالات بهینه افزودن آلومینا به سیستم پوشش سد حرارتی از جنبه افزایش مقاومت به اکسیداسیون و خوردگی داغ در نظر گرفته شده و انتقال حرارت و توزیع تنش در آنها بصورت مقایسه‌ای و مطلق مورد بحث و مطالعه قرار گرفته است. از مجموع نتایج حاصل از این تحقیق موارد زیر بعنوان نتیجه‌گیری کلی قابل ارایه است:

۱. نتایج مطالعه عددی تاثیر افزودن آلومینا به سیستم پوشش سد حرارتی بر مقدار و توزیع تنش در پوشش نشان داد که در نمونه‌های حاوی آلومینا (چه به صورت لایه مستقل و چه به صورت لایه کامپوزیتی حاوی آلومینا) منطقه بحرانی تمرکز تنش در فصل مشترک لایه حاوی آلومینا با لایه‌های مجاور رخ می‌دهد. همچنین همواره مقادیر تنش ماکزیمم در نمونه‌های حاوی آلومینا نسبت به نمونه‌های فاقد آلومینا بالاتر است.

۲. نتایج مطالعه عددی افزودن آلومینا به سیستم پوشش سد حرارتی نشان داد که با توجه به ضریب هدایت حرارتی بالاتر آلومینا نسبت به YSZ و نقش مخرب آن بر خاصیت عایق‌سازی حرارتی سیستم پوشش، افزودن آلومینا به سیستم پوشش سد حرارتی خاصیت عایق‌سازی حرارتی را تضعیف می‌کند.

مراجع

1. Hetmańczyk, M., Swadźba, L., & Mendala, B., *Advanced materials and protective coatings in aero-engines application.*, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 24(1) (2007) 372-381.
2. Tamarin, Y., *Protective coatings for turbine blades.* ASM international, (2002).

molten sulfate-vanadate salt., Thin solid films, 443(1) (2003) 46-52.

24. Daroonparvar, M., Yajid, M. A. M., Yusof, N. M., Hussain, M. S., & Bakhsheshi-Rad, H. R., *Formation of a dense and continuous Al₂O₃ layer in nano thermal barrier coating systems for the suppression of spinel growth on the Al₂O₃ oxide scale during oxidation.*, Journal of Alloys and Compounds, 571 (2013) 205-220.

25. Zhang, X. C., Xu, B. S., Wang, H. D., & Wu, Y. X., *Effects of oxide thickness, Al₂O₃ interlayer and interface asperity on residual stresses in thermal barrier coatings.*, Materials & design, 27(10) (2006) 989-996.

26. Widjaja, S., Limarga, A. M., & Yip, T. H. *Oxidation behavior of a plasma-sprayed functionally graded ZrO₂/Al₂ O₃ thermal barrier coating.*, Materials Letters, 57(3) (2002) 628-634.

۲۷. عرب سرهنگی سمانه، میرحبیبی علیرضا، عربی حسین، رستگاری سعید، بررسی خواص ریزساختاری و مکانیکی پوشش چند لایه سپرحرارتی کامپوزیتی زیرکونیا/آلومینا و پوشش دولایه زیرکونیایی اعمال شده به روش پاشش پلاسما، فصلنامه سرامیک ایران، ۳۱ (۱۳۹۱) ۵۶-۵۰.

28. Saremi, M., & Valefi, Z., *Thermal and mechanical properties of nano-YSZ-Alumina functionally graded coatings deposited by nano-agglomerated powder plasma spraying.*, Ceramics International, 40(8) (2014) 13453-13459.

29. Bäker, M., *Influence of material models on the stress state in thermal barrier coating simulations*, Surface and Coatings Technology, 240, (2014) 301-310.

30. Chen, H., Liu, Y., Gao, Y., Tao, S., & Luo, H. Design, *preparation, and characterization of graded YSZ/La₂Zr₂O₇ thermal barrier coatings.*, Journal of the American Ceramic Society, 93(6) (2010) 1732-1740.

31. Haynes International, I., <https://www.haynesintl.com>. HASTELLOY ® X ALLOY. (1997).

32. Wang, L., Wang, Y., Zhang, W. Q., Sun, X. G., He, J. Q., Pan, Z. Y., & Wang, C. H. *Finite element simulation of stress distribution and development in 8YSZ and double-ceramic-layer La₂Zr₂O₇/8YSZ thermal barrier coatings during thermal shock.*, Applied Surface Science, 258(8) (2012) 3540-3551.

حرارتی پایه زیرکونیایی پاشش پلاسمایی شده، مجله علمی

پژوهشی مهندسی سطح، ۱۴ (۱۳۹۱) ۸۷-۷۷.

13. K.A. Khor, Y.W.G., Thermal properties of plasma-sprayed functionally graded thermal barrier coatings. Thin Solid Films, 372 (2000)104-113.

14. Chen, H., Liu, Y., Gao, Y., Tao, S., & Luo, H., *preparation, and characterization of graded YSZ/La₂Zr₂O₇ thermal barrier coatings.*, Journal of the American Ceramic Society, 93(6) (2010)1732-1740.

15. Haynes International, I., <https://www.haynesintl.com>. HASTELLOY ® X ALLOY. (1997).

16. Wang, L., Wang, Y., Sun, X. G., He, J. Q., Pan, Z. Y., & Wang, C. H., *Thermal shock behavior of 8YSZ and double-ceramic-layer La₂Zr₂O₇/8YSZ thermal barrier coatings fabricated by atmospheric plasma spraying.* Ceramics International, 38(5) (2012)3595-3606.

17. Limarga, A. M., Widjaja, S., & Yip, T. H. *Mechanical properties and oxidation resistance of plasma-sprayed multilayered Al₂O₃/ZrO₂ thermal barrier coatings.*, Surface and Coatings Technology, 197(1) (2005) 93-102.

18. Reed, R. C., *The superalloys: fundamentals and applications.* Cambridge university press, (2008).

19. Rasheedat, M. M., Esther, T. A., Mukul, S., & Sisa, P., *Functionally graded material: An overview.* In Proceedings of the World Congress on Engineering, (2012).

20. Keyvani, A., Saremi, M., & Sohi, M. H. *Microstructural stability of zirconia-alumina composite coatings during hot corrosion test at 1050° C.*, Journal of Alloys and Compounds, 506(1) (2010) 103-108.

21. Keyvani, A., Saremi, M., & Sohi, M. H. *Oxidation resistance of YSZ-alumina composites compared to normal YSZ TBC coatings at 1100 C.* Journal of alloys and compounds, 509(33) (2011) 8370-8377.

22. Saremi, M., Valefi, Z., & Abaeian, N., *Hot corrosion, high temperature oxidation and thermal shock behavior of nanoagglomerated YSZ-Alumina composite coatings produced by plasma spray method.*, Surface and Coatings Technology, 221 (2013) 133-141.

23. Chen, Z., Wu, N. Q., Singh, J., & Mao, S. X., *Effect of Al₂O₃ overlay on hot-corrosion behavior of yttria-stabilized zirconia coating in*

33. Limarga, A. M., Widjaja, S., & Yip, T. H. *Mechanical properties and oxidation resistance of plasma-sprayed multilayered Al₂O₃/ZrO₂ thermal barrier coatings.*, Surface and Coatings Technology, 197(1) (2005) 93-102.
34. Widjaja, S., Limarga, A. M., & Yip, T. H. *Modeling of residual stresses in a plasma-sprayed zirconia/alumina functionally graded-thermal barrier coating.*, Thin Solid Films, 434(1) (2003) 216-227.
35. Ranjbar-Far, M., Absi, J., Shahidi, S., & Mariaux, G. *Impact of the non-homogenous temperature distribution and the coatings process modeling on the thermal barrier coatings system.*, Materials & Design, 32(2) (2011) 728-735.