

بررسی مکانیزم‌های خرابی در پوشش‌های حائل حرارتی تحت بارگذاری خستگی هم‌دما و غیرهم‌دما با طراحی آزمایش‌ها

محمد آزادی^{۱*}، غلامحسین فرهی^۲

* نویسنده مسئول: m_azadi@semnan.ac.ir

چکیده

واژه‌های کلیدی

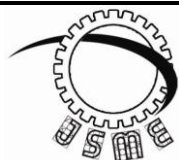
در این مقاله، مکانیزم‌های شکست و خرابی یک آلیاژ آلومینیوم (که در بستار موتورهای احتراق داخلی دیزلی کاربرد دارد) در دو حالت با و بدون پوشش‌های حائل حرارتی سرامیکی، تحت بارگذاری‌های خستگی هم‌دما و غیرهم‌دما، مطالعه شده است. در این تحقیق، ماده پایه شامل آلیاژ آلومینیوم-سیلیسیوم-منیزیم است و پوشش حائل حرارتی نیز، شامل یک پوشش میانی فلزی به ضخامت ۱۵۰ میکرومتر و یک پوشش اصلی از زیرکونیای پایدار شده با ایتریا به ضخامت ۳۵۰ میکرومتر می‌باشد که بر روی ماده پایه (آلیاژ آلومینیوم)، به روش پاشش حرارتی پلاسما ایجاد شده است. برای بررسی تحلیل خرابی و تحلیل حساسیت، آزمون‌های خستگی هم-دما (و یا کم‌چرخه در دمای ثابت) و آزمون‌های خستگی غیرهم‌دما (و یا ترمومکانیکی غیرهم‌فاز)، بر روی نمونه‌های استاندارد آزمون انجام شده است. سپس، با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی، مکانیزم‌های شکست در آلیاژ آلومینیوم، با و بدون پوشش، بررسی شده است. پس از بررسی آسیب خستگی و تحلیل خرابی، حساسیت عمر ماده نسبت به عوامل مختلف (دما و کرنش) نیز، مطالعه شده است. براساس نتایج بدست آمده، سطح شکست آلیاژ آلومینیوم دارای دیپل بوده و شکست آن بصورت نرم است. در پوشش حائل حرارتی نیز، جدایش لایه میانی پوشش از ماده پایه، مکانیزم آسیب غالب است. همچنین، بیشترین حساسیت مربوط به پارامتر کرنش در آزمون‌های خستگی آلیاژ آلومینیوم (با و بدون پوشش) است.

آلیاژ آلومینیوم.
پوشش حائل حرارتی.
مکانیزم‌های خرابی.
تحلیل حساسیت.
بارگذاری خستگی.

تاریخ ارسال: ۹۴/۱۲/۲۳
تاریخ بازنگری: ۹۵/۰۳/۲۸
تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۴/۱۵

۱- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

۲- استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران.



Journal of
Solid Mechanics in
Engineering

Journal of Solid Mechanics in Engineering

<http://jsme.iaukhsh.ac.ir>



Failure Mechanisms Investigation in Thermal Barrier Coatings under Isothermal and Non-isothermal Fatigue Loadings using Design of Experiments

M. Azadi^{1*}, G.H. Farrahi²

*Corresponding Author: m_azadi@semnan.ac.ir

Abstract:

In this article, failure and fracture mechanisms in an aluminum alloy (which has been used in diesel internal combustion engines), with and without ceramic thermal barrier coatings, have been investigated under isothermal and non-isothermal fatigue loadings. In this research, the base material is an aluminum-silicon-magnesium alloy and the thermal barrier coating includes a metallic bond coat layer with 150 μm thickness and a top coat layer, made of zirconia stabilized 8%wt. yttria with 350 μm thickness, which is applied on the substrate by the plasma thermal spray method. In order to study the failure and the sensitivity analysis, isothermal fatigue tests (or low-cycle fatigue tests at constant temperatures) and non-isothermal fatigue tests (or out-of-phase thermo-mechanical fatigue tests) were performed on test specimens. Then, fracture mechanisms in the aluminum alloy, were investigated by the scanning electron microscopy. After checking the fatigue damage and the failure analysis, the sensitivity of the material lifetime was studied based on different parameters (the temperature and the strain). Based on obtained results, the fracture surface of the aluminum alloy had dimples and therefore, its fracture was ductile. In thermal barrier coating, the damage mechanism was the separation between the substrate and the bond coat layer. The highest sensitivity was related to the strain parameter in fatigue tests of the aluminum alloy (with and without coating).

Key words:

Aluminum alloy.
Thermal barrier coating.
Failure mechanisms.
Sensitivity analysis.
Fatigue loading.

1- Assistant Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

2- Professor, Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran.

۱- مقدمه

تنش‌های کششی در لایه اکسیدی زبر است. پيشل^۴ و همکارانش [۳]، نشان دادند که پدیده کماتش و ورقه‌ای شدن^۵ عامل خرابی پوشش‌های حائل حرارتی نبوده است. جدایش لایه میانی و لایه اصلی پوشش و وجود ترک‌ها در مرز بین لایه‌های پوشش، مکانیزم آسیب تحت بارهای خستگی ترمومکانیکی معرفی شده است. جینسترند و برودین^۶ [۴]، ترک‌هایی در لایه اکسیدی (بین لایه‌های میانی و اصلی) پوشش حائل حرارتی (روی یک سوپرآلیاژ)، تحت بارهای خستگی کم چرخه را مشاهده کرده‌اند. مکانیزم آسیب پوشش حائل حرارتی تحت بارهای خستگی کم چرخه دما بالا توسط آگیرو^۷ و همکارانش [۵]، مطالعه شده است. آنها نشان داده‌اند که ترک‌ها بین لایه‌های پوشش و ماده پایه، به دلیل عدم تطابق بین ضریب انبساط حرارتی مواد، ایجاد شده‌اند.

براساس مطالعات انجام شده [۲-۸]، می‌توان گفت که مکانیزم‌های خرابی در پوشش‌های حائل حرارتی، شامل چند عامل است که عبارتند از:

الف) عدم تطابق بین خواص مواد و یا تفاوت در مقدار ضریب انبساط حرارتی و مدول الاستیک لایه‌های پوشش و ماده پایه [۶].

ب) ایجاد لایه اکسیدی در دماهای زیاد (بالتر از ۹۰۰ درجه سانتیگراد)، در اثر اکسیداسیون آلومینیوم موجود در لایه میانی [۷].

پوشش‌های حائل حرارتی^۱، کاربرد وسیعی در توربین‌های گازی دارند و همچنین، امکان استفاده از آنها در پوشش-دهی محفظه احتراق موتورهای دیزل، وجود دارد [۱]. این-گونه پوشش‌های سرامیکی برای جلوگیری از انتقال حرارت بکار رفته تا عمر قطعه تحت دماهای کارکرد زیاد را افزایش دهند. از دیگر مزایای استفاده از آنها، می‌توان به بهبود احتراق و افزایش بازده حرارتی، کاهش مصرف سوخت و کاهش آلاینده‌گی اشاره نمود [۱]. معمولاً، پوشش‌های حائل حرارتی شامل دو لایه هستند و با روش پوشش حرارتی (همچون پلاسما) ایجاد می‌شوند. لایه اول با عنوان لایه میانی، برای ایجاد چسبندگی بهتر با ماده پایه است. لایه دوم با عنوان لایه اصلی شامل یک لایه سرامیکی است و نقش سد حرارتی را بازی می‌کند [۱]. این بحث دو لایه یا چند لایه بودن پوشش‌ها، اهمیت موضوع مکانیزم‌های جدایش را آشکار می‌سازد که بررسی آنها می‌تواند به تحلیل خرابی، کاهش آسیب و افزایش عمر قطعه کمک نماید. در این زمینه، مطالعات فراوانی انجام شده است که در ادامه، به برخی از آنها اشاره می‌شود.

تزیماس^۲ و همکارانش [۲]، مکانیزم خرابی پوشش حائل حرارتی ایجاد شده روی یک سوپرآلیاژ تحت بارهای خستگی ترمومکانیکی را مطالعه کرده‌اند. آنها نشان داده‌اند که ترک درون لایه میانی و لایه اکسیدی^۳ (تولید شده در اثر حرارت و اکسیداسیون آلومینیوم موجود در لایه میانی) ایجاد شده و به سمت ماده پایه رشد می‌کند. علت این امر،

⁴ Peichl⁵ Spallation⁶ Jinnestrand and Brodin⁷ Aguero¹ Thermal barrier coating (TBC)² Tzimas³ Thermally grown oxide (TGO)

ج) پدیده ورقه‌ای شدن و کماتش که کمتر مشاهده شده است [۸].

آلیاژ تیتانیوم (با و بدون پوشش)، توسط ساهو^۵ و همکارانش [۱۳]، انجام شده است.

مبحث مهم دیگر در پوشش‌های حائل حرارتی که در تحلیل خرابی آنها می‌تواند موثر واقع شود، شامل تحلیل حساسیت عمر خستگی ماده نسبت به پارامترهای مختلفی همچون دما، تنش و کرنش است. در این زمینه نیز، مطالعاتی روی عمر خستگی آلیاژهای آلومینیوم و پوشش‌های حائل حرارتی انجام شده است که در ادامه، به برخی از آنها اشاره می‌شود.

با مروری بر مقالات می‌توان گفت که اکثر مقالات موجود، به تحلیل خرابی پوشش‌های ایجاد شده بر روی سوپرآلیاژها (بخصوص برای استفاده در توربین‌های گازی) پرداخته‌اند. بنابراین، مکانیزم‌های خرابی در موتورهای دیزل پوشش‌دار، کمتر بررسی شده‌اند. لذا در بخش اول این مقاله، مکانیزم خرابی در آلیاژ آلومینیوم با پوشش حائل حرارتی سرامیکی، مطالعه شده است. به عبارت دیگر، رفتار شکست این ماده پوشش‌دار، تحت بارهای خستگی هم‌دما (کم‌چرخه) و غیرهم‌دما (ترمو مکانیکی) بررسی شده است.

بک^۱ و همکارانش [۹]، اثر پارامترهای دما و زمان نگهداری^۲ (در دمای بیشینه) بر روی عمر خستگی ترمومکانیکی آلیاژهای آلومینیوم-سیلیسیوم را مطالعه کرده‌اند. اثر زمان و دمای پیرسازی بر عمر خستگی ترمومکانیکی آلیاژ آلومینیوم-سیلیسیوم بستار، توسط تاکاهاشی و ساساکی^۳ [۱۰]، بررسی شده است. رایت^۴ [۱۱]، اثر کرنش مکانیکی بر عمر خستگی ترمومکانیکی پوشش حائل حرارتی را بررسی کرده است. رحمانی و ناطق [۱۲]، اثر دو دامنه کرنش مکانیکی ۰٫۸ و ۱٫۲٪ بر روی عمر خستگی کم‌چرخه (در دمای ۸۷۱ درجه سانتیگراد) برای یک سوپرآلیاژ (با و بدون پوشش) را مطالعه کرده‌اند. آنها نشان داده‌اند که رفتار خستگی ماده، با و بدون پوشش، در دو دامنه کرنش مکانیکی، کاملاً برعکس یکدیگر هستند. بررسی اثر چهار دامنه کرنش پلاستیک بر روی عمر خستگی کم‌چرخه (در دمای ۶۰۰ درجه سانتیگراد) یک

نکته حائز اهمیت دیگر آن است که تحلیل حساسیت کاملی از پارامترهای مختلف بر عمر خستگی هم‌دما (کم‌چرخه) و غیرهم‌دما (ترمو مکانیکی) بر روی آلیاژ آلومینیوم با پوشش حائل حرارتی صورت نگرفته است. لذا در این مقاله، اثر پارامترهای مختلف بر عمر خستگی آلیاژ آلومینیوم، با و بدون پوشش، با استفاده از طراحی آزمایش‌ها انجام پذیرفته است. نتایج تحلیل‌های آماری نیز در جداول و شکل‌ها نشان داده شده‌اند.

۲- مواد و آزمون‌ها

در این بخش، به جزئیات مربوط به مواد مورد مطالعه در تحقیق، انواع آزمون‌های خستگی اجرا شده بر روی نمونه استاندارد و طراحی آزمایش‌ها، پرداخته می‌شود.

¹ Beck

² Dwell time

³ Takahashi and Sasaki

⁴ Wright

⁵ Sahu

۱-۲- مواد مورد مطالعه در تحقیق

در این تحقیق، ماده پایه برای کاربرد در بستار موتورهای احتراق داخلی، آلیاژ آلومینیوم-سیلیسیوم-منیزیم (AISI7Mg0.3 یا A356) در نظر گرفته شده است. که به روش ریخته‌گری قالب ثابت تولید شده است. این ماده شامل ۷ درصد سیلیسیوم و ۰٫۳ درصد منیزیم است. پوشش حائل حرارتی نیز، شامل یک پوشش میانی فلزی (NiMoAl) به ضخامت ۱۵۰ میکرومتر و یک پوشش اصلی از زیرکونیای پایدار شده با ۸ درصد وزنی ایتریا به ضخامت ۳۵۰ میکرومتر، روی ماده پایه، به روش پاشش حرارتی پلاسما اسپری ایجاد شده است. جزئیات بیشتر برای فرایند پوشش دهی و بهینه سازی پارامترهای این روش، در مراجع [۱۴-۱۵] آمده‌اند.

۲-۲- آزمون‌های خستگی انجام شده

آزمون‌های خستگی کشش- فشار بصورت کنترل دما و کرنش مکانیکی انجام شده‌اند. آزمون خستگی هم‌دما و یا کم‌چرخه، در یک دمای ثابت، دامنه کرنش مکانیکی، تغییر می‌کند اما در آزمون خستگی غیرهم‌دما و یا ترمومکانیکی غیرهم‌فاز، دما و کرنش، با اختلاف فاز ۱۸۰ درجه، تواما در یک سیکل تغییر می‌کنند؛ بطوری که در دمای بیشینه، کرنش فشاری و در دمای کمینه، کرنش کششی به جسم اعمال می‌گردد. این نوع بارگذاری خستگی، بارهای واقعی وارده به یک بستار طی چرخه‌های خاموش و روشن شدن موتور را مدلسازی می‌نماید.

با توجه به اینکه هر دو پارامتر کرنش و دما در آزمون خستگی غیرهم‌دما (ترمومکانیکی)، تغییر می‌کند، پارامتری تعریف می‌شود شامل فاکتور بارگذاری ترمومکانیکی، که نسبت کرنش مکانیکی به کرنش حرارتی است. سیستم حرارت‌دهی بصورت القایی (شامل کویل‌های مسی) بوده و

از جت هوای فشرده برای سرد کردن نمونه‌های آزمون استفاده شده است. برای اندازه‌گیری کرنش و دما، به ترتیب از دستگاه اندازه‌گیر کرنش دما بالا و ترموکوپل (داخل و روی نمونه آزمون) استفاده شده است. برای اندازه‌گیری دمای ماده پایه، سوراخی در وسط نمونه تعبیه شده که یک ترموکوپل داخل آن قرار می‌گیرد.

نمونه آلومینیومی (با و بدون پوشش) مورد استفاده در آزمون‌های خستگی، در شکل (۱) نشان داده شده است. تجهیزات مورد استفاده (شامل ترموکوپل‌ها، نمونه و فک-های دستگاه، سیستم و کویل حرارتی، کرنش سنج دما بالا و جت هوای فشرده) نیز، در شکل (۲) نشان داده شده است. جزئیات بیشتر در مورد مراحل اجرای آزمون‌های خستگی و سایر تجهیزات مورد استفاده، در مرجع [۱] آمده است. همچنین، شرایط آزمون‌های انجام شده شامل آزمون خستگی هم‌دما (و یا کم‌چرخه) و آزمون خستگی غیرهم‌دما (و یا ترمومکانیکی غیرهم‌فاز) نیز در جدول (۱) ذکر شده است.

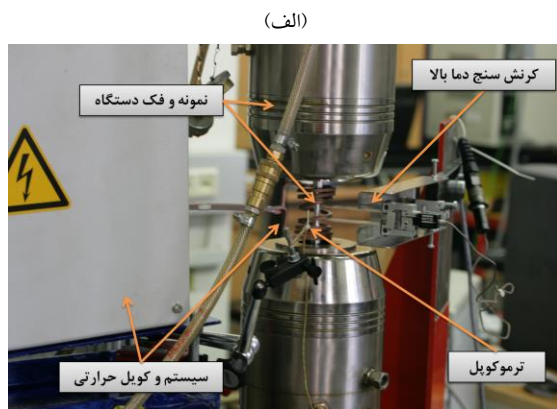
جدول (۱) شرایط آزمون‌های خستگی انجام شده.

نوع آزمون	بار حرارتی	زمان	بار مکانیکی
آزمون	دمای ثابت (T): ۲۵		دامنه کرنش
خستگی	۲۰۰ و ۲۵۰ درجه	-	مکانیکی ($\epsilon_{a, mech}$):
هم‌دما	سانتیگراد		۰٫۲، ۰٫۳ و ۰٫۴٪
آزمون	دمای کمینه (T_{min}):	زمان	
خستگی	۵۰ درجه سانتیگراد	نگهداری در	فاکتور بارگذاری
غیرهم‌دما	و دمای بیشینه (T_{max}): ۲۰۰، ۲۲۵	دمای بیشینه (t_D): ۵، ۳۰	ترمومکانیکی
	۲۵۰ و ۲۷۵ درجه	۶۰ و ۱۸۰ ثانیه	(K_{TD}): ۰٫۷۵، ۱٫۰۰
	سانتیگراد		۱۲۵ و ۱۵۰٪

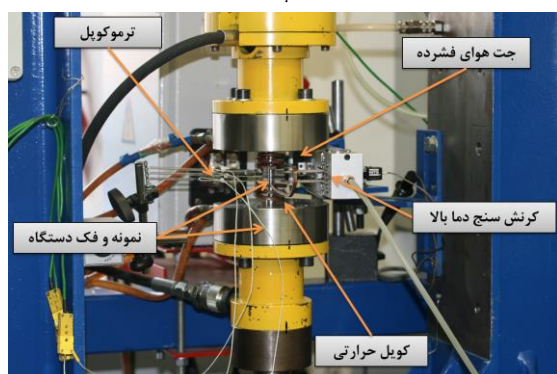


شکل (۱) نمونه‌های آزمون خستگی آلومینیومی با و بدون پوشش.

۲-۳- طراحی آزمایش ها



(الف)



(ب)

شکل (۲) تجهیزات مربوط به آزمون های (الف) خستگی هم دما یا کم چرخه و (ب) خستگی غیرهم دما یا ترمومکانیکی غیرهم فاز.

به منظور ایجاد یک درک صحیح از اثر پارامترهای مختلف بر یک رفتار برای شناخت بهتر مکانیزم های خرابی، می توان از روش های طراحی آزمایش ها^۱ استفاده نمود. یکی از این روش ها، تحلیل حساسیت با استفاده از تحلیل های آماری است. بر این اساس، با محاسبه میانگین مربعات (MS) اثر و مقایسه آن با مقدار مرجع ($F_{\alpha, a-1, N-a}$)، حساسیت اثر بدست می آید [۱۶].

$$F_0 = \frac{MS_{treatment}}{MS_{error}} \quad (1)$$

$$F_0 > F_{\alpha, a-1, N-a} \quad (2)$$

که در آن، $F_{\alpha, a-1, N-a}$ از جداول آماری استخراج می شود. مقدار سطح ریسک α ، معمولاً برابر با ۰٫۰۵ بوده و ضریب اطمینان، ۹۵٪ در نظر گرفته شده است. مقادیر $a-1$ و $N-a$ نیز، درجات آزادی اثر و خطا را نشان می دهد. روابط فوق برای یک اثر قابل اجراست و می توان برای چند اثر، آن را تعمیم داد. جزئیات بیشتر در این مورد، در مرجع [۱۶] آمده است. این گونه تحلیل های آماری در این مقاله، با استفاده از نرم افزار MINITAB انجام شده است. پس از تحلیل حساسیت، با استفاده از آنالیز رگرسیون خطی، تابعی براساس پارامترهای موثر (P_1, P_2, \dots) برای تخمین عمر خستگی (N_f) ارائه شده است.

$$N_f = C_0 + C_1 P_1 + C_2 P_2 + C_3 P_1 P_2 + \dots \quad (3)$$

پس از تطبیق رابطه فوق با نتایج تجربی، ضرائب تابع فوق (C_0, C_1, \dots) محاسبه می شوند [۱۶].

۳- نتایج و بحث بر روی نتایج

بخش نتایج شامل دو قسمت برای بررسی مکانیزم های خرابی و تحلیل حساسیت، است که در ادامه، به آنها پرداخته می شود.

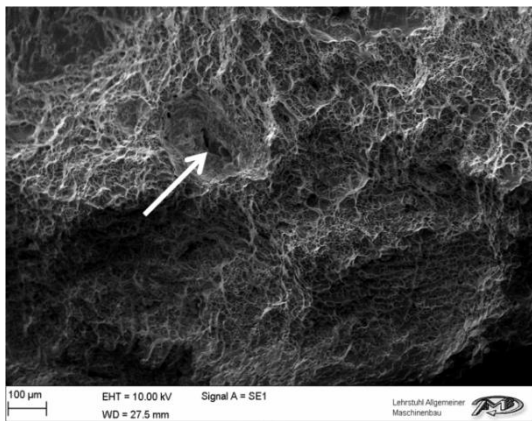
۳-۱- بررسی مکانیزم های خرابی

در بخش اول نتایج، مکانیزم های خرابی ماده مطالعه شده است. برای این منظور، نتایج حاصل از آزمون خستگی کم-چرخه در دمای ۲۵۰ درجه سانتیگراد و در دامنه کرنش مکانیکی ۰٫۳٪ مدنظر قرار گرفته است. در آزمون خستگی ترمومکانیکی غیرهم فاز برای این بخش نیز، تغییرات دما بین ۵۰ و ۲۵۰ درجه سانتیگراد بوده و فاکتور بارگذاری ترمومکانیکی (یا نسبت کرنش مکانیکی به کرنش حرارتی)، ۱۲۵٪ مدنظر قرار گرفته است.

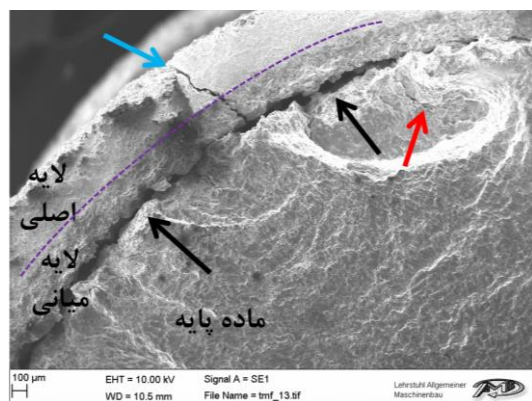
¹ Design of Experiments (DOE)

باعث ایجاد ترک محیطی بین این دو قسمت شده است. این مبحث، در ادامه و با استفاده از روابط تنش و همچنین، محاسبه مقادیر تنش در هر قسمت (لایه اصلی پوشش، لایه میانی و ماده پایه)، اثبات می گردد.

نکته دیگر اینکه هیچ گونه ترک بین لایه اصلی و لایه میانی مشاهده نمی شود که نشان دهنده فرایند مناسب پوشش دهی (روش حرارتی پلاسما اسپری) می باشد و لذا باعث ایجاد چسبندگی کافی بین این دو لایه از پوشش شده است. شایان ذکر است که پارمترهای فرایند پوشش دهی آلومینیوم، در مطالعات قبلی بهینه سازی شده است [۱۴-۱۵].



شکل (۳) بخشی از سطح شکست آلیاژ آلومینیوم (بدون پوشش).

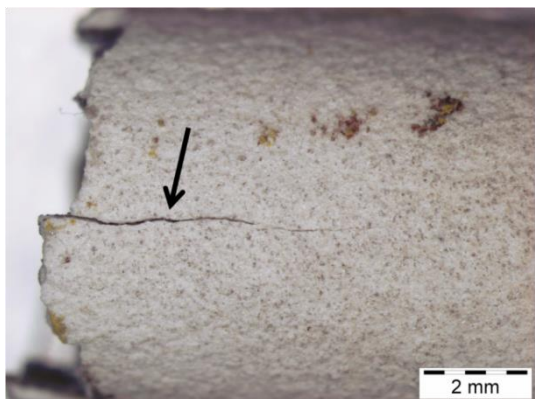


شکل (۴) بخشی از سطح شکست آلیاژ آلومینیوم (با پوشش) پس از آزمون خستگی ترمومکانیکی غیرهم فاز.

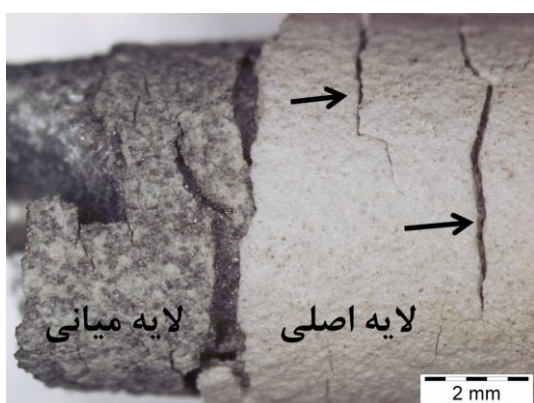
براساس نتایج بدست آمده، عمر خستگی کم چرخه در دمای ۲۵۰ درجه سانتیگراد برابر با ۳۴۴۸ و ۲۹۲۲ سیکل، به ترتیب برای آلیاژ آلومینیوم با و بدون پوشش گردید. بدان معنی که پوشش، عمر خستگی کم چرخه را نسبت به حالت بدون پوشش، به میزان ۱۸٪ افزایش داد. این بهبود عمر تحت بارگذاری خستگی ترمومکانیکی غیرهم فاز، به مقدار ۱۷,۵٪ است. عمر خستگی ترمومکانیکی برابر با ۲۳۰۸ و ۱۹۶۴ سیکل، به ترتیب برای آلیاژ آلومینیوم با و بدون پوشش گردید. در حالت کلی، عمر خستگی ترمومکانیکی کمتر از عمر خستگی هم دما می باشد؛ چراکه هر دو پارامتر کرنش و دما در آزمون خستگی ترمومکانیکی تغییر می کنند و شرایط سخت تری برای ماده ایجاد می کنند. این در حالی است که در آزمون خستگی کم چرخه، دما ثابت بوده و ماده فقط تحت تغییرات کرنش مکانیکی خواهد بود.

بخشی از سطح شکست آلیاژ آلومینیوم (بدون پوشش) پس از آزمون خستگی، در شکل (۳) نشان داده شده است. این عکس (گرفته شده با دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی) شامل یک حفره انقباضی و دیمپل ها بوده که نشان دهنده یک شکست نرم در آلیاژ آلومینیوم- سیلیسیوم- منیزیم است.

در شکل (۴)، بخشی از شکست آلیاژ آلومینیوم با پوشش سرامیکی، پس از آزمون خستگی ترمومکانیکی آمده است. همان گونه که قابل مشاهده است، یک ترک محیطی بین لایه میانی و ماده پایه ایجاد شده و سپس به دو سمت سطح بیرونی پوشش (لایه اصلی) و درون ماده پایه رشد کرده است. علت این امر، عدم تطابق بین خواص مواد و تفاوت در مقدار ضریب انبساط حرارتی و مدول الاستیک لایه های پوشش و ماده پایه است [۶]. عملاً تنش های حرارتی- مکانیکی، در لایه میانی و ماده پایه متفاوت است و همین امر



شکل (۶) بخشی از سطح نمونه آلومینیومی (با پوشش) پس از آزمون خستگی ترمومکانیکی غیرهم فاز.



شکل (۷) بخشی از سطح نمونه آلومینیومی (با پوشش) پس از آزمون خستگی کم چرخه دما بالا.

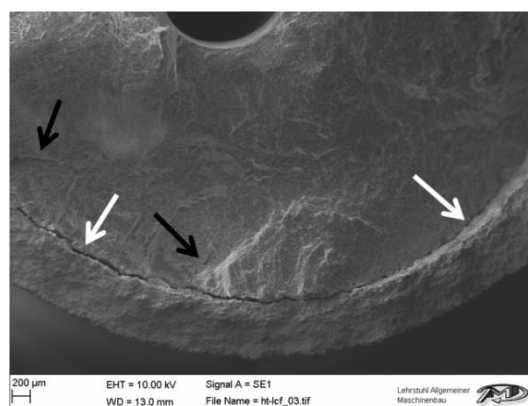
قابل ذکر است که جدایشی بین لایه میانی و لایه اصلی پوشش ایجاد نشده است و مکانیزم خرابی به دلیل عدم تطابق خواص مواد، شامل جدایش ماده پایه از لایه میانی است. این مکانیزم آسیب بر اساس تحلیل تنش ها قابل توجه است که می توان از فرمول های تحلیلی برای محاسبه آنها در پوشش حائل حرارتی استفاده نمود [۱۸].

با فرض شرایط دائمی، تنش های شعاعی (σ_r) و محیطی (σ_θ) برای هر لایه (ماده پایه، لایه میانی و لایه اصلی پوشش) را می توان بر حسب شعاع (r) به فرم زیر نوشت [۱۸]:

$$\sigma_r^{(i)} = C_{1,i} + \frac{1}{r^2} (C_{2,i} - \alpha_i E_i \tilde{T}_i(r)) \quad (4)$$

در آزمون خستگی ترمومکانیکی، ترک طولی (در طول نمونه) روی لایه بیرونی پوشش ایجاد شده و در آزمون خستگی کم چرخه، این ترک محیطی وجود نداشته و ترک های سطحی پوشش، بصورت محیطی ظاهر شده اند. این مطلب در شکل های (۵) تا (۷) نشان داده شده است.

دلیل وجود ترک محیطی آن است که در بارگذاری خستگی ترمومکانیکی، دمای متغیر بوده که باعث انبساط و انقباض ماده پایه می شود. وجود پوشش، همچون یک قید مکانیکی، برای ماده پایه محسوب می شود. لذا ترک های طولی ایجاد می شوند که ناشی از وجود یک تنش شعاعی است. در بارگذاری خستگی کم چرخه، چون دما در طول آزمون ثابت است، پس از یک انبساط اولیه، ماده پایه تغییرشکلی نداشته و لذا ترک بصورت محیطی روی سطح بیرونی پوشش ایجاد می گردد. این نوع ترک به دلیل رفتار شکننده پوشش سرامیکی ایجاد شده که به نرخ کرنش حساسیت بیشتری دارد [۱۷]. نرخ کرنش در آزمون خستگی کم چرخه، ۰٫۰۱ بر ثانیه و در آزمون خستگی ترمومکانیکی، ۰٫۰۰۰۱ بر ثانیه می باشد.



شکل (۵) بخشی از سطح شکست آلیاژ آلومینیوم (با پوشش) پس از آزمون خستگی کم چرخه دما بالا.

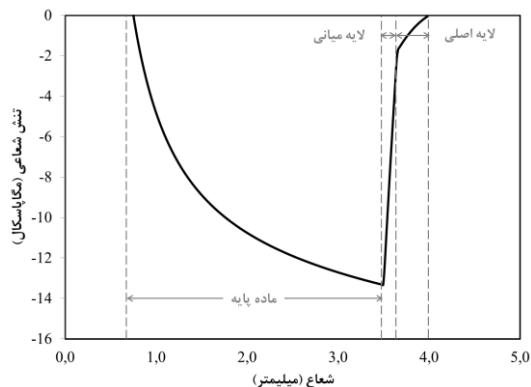
بوده [۱۸] و کرنش محیطی (ε_θ) از رابطه

$$\varepsilon_\theta^{(i)}(r) = \frac{1}{E_i} [\sigma_\theta^{(i)}(r) - \nu_i \sigma_r^{(i)}(r)] + \alpha_i T_i(r) \quad (14)$$

محاسبه می‌شود [۱۸] که در آن، ν_i ضریب پواسون است.

قابل ذکر است که خواص مواد مربوط به لایه‌های پوشش و ماده پایه، در مرجع [۱۹] آمده است. با اعمال شرایط مرزی و پیوستگی فوق و در نظر گرفتن دمای ۲۵۰ درجه سانتیگراد برای سطح پوشش و اختلاف دمای ۹۰ درجه سانتیگراد با دمای ماده پایه (اندازه‌گیری شده در آزمون خستگی ترمومکانیکی)، می‌توان ثوابت $C_{2,i}$ و $C_{1,i}$ را محاسبه نمود. بدین ترتیب، تغییرات تنش شعاعی و محیطی بر حسب شعاع در شکل‌های ۸ و ۹، نشان داده شده است. همان‌گونه که قابل مشاهده است، مقدار تنش شعاعی در مرز بین لایه میانی و ماده پایه، به دلیل نقش قید بودن پوشش برای ماده پایه، بیشینه می‌باشد.

تنش محیطی نیز، در لایه میانی، بیشترین مقدار خود را دارد و این همان عامل جدایش لایه میانی از ماده پایه است. قابل ذکر است که تنش تسلیم در لایه اصلی پوشش بین ۱۰ تا ۱۰۰ مگاپاسکال بوده و در لایه میانی حدود ۲۷۰ مگاپاسکال است [۱۹].



شکل (۸) توزیع تغییرات تنش شعاعی در سطح مقطع نمونه آلومینیومی با پوشش، بر حسب شعاع.

$$\sigma_\theta^{(i)} = C_{1,i} - \frac{1}{r^2} (C_{2,i} + \alpha_i E_i [T_i(r) - \tilde{T}_i(r)]) \quad (5)$$

که در آن، E_i و α_i به ترتیب، مدول الاستیک و ضریب انبساط حرارتی هر لایه بوده و همچنین، $C_{1,i}$ و $C_{2,i}$ ثوابت هستند که براساس یک سری شرایط مرزی و پیوستگی محاسبه می‌شوند [۱۸] و

$$\tilde{T}_i(r) = \int_{s=a_i}^r T_i(s) s ds : i = 1, 2, 3 \quad (6)$$

توزیع دما در سطح مقطع نمونه آن (سطح عمود بر طول آن)، در شعاع‌های مختلف، براساس شعاع داخلی (a_i) و شعاع خارجی (b_i) هر لایه، بصورت زیر محاسبه می‌شود [۱۸].

$$T_i(r) = [T_i(a_i) - T_i(b_i)] \frac{\ln(b_i/r)}{\ln(b_i/a_i)} + T_i(b_i) \quad (7)$$

شرایط مرزی برای تنش‌های شعاعی بصورت

$$\sigma_r^{(1)}(r = a_1) = 0 \quad (8)$$

$$\sigma_r^{(3)}(r = b_3) = 0 \quad (9)$$

زیر هستند [۱۸]. شرایط پیوستگی برای تنش‌های شعاعی بصورت

$$\sigma_r^{(1)}(r = b_1) = \sigma_r^{(2)}(r = a_2) \quad (10)$$

$$\sigma_r^{(2)}(r = b_2) = \sigma_r^{(3)}(r = a_3) \quad (11)$$

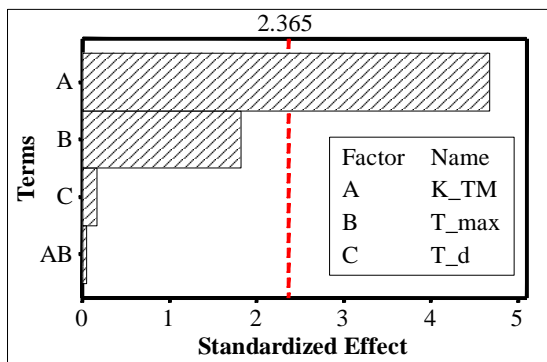
زیر هستند [۱۸]. شرایط پیوستگی برای کرنش‌های محیطی بصورت

$$\varepsilon_\theta^{(1)}(r = b_1) = \varepsilon_\theta^{(2)}(r = a_2) \quad (12)$$

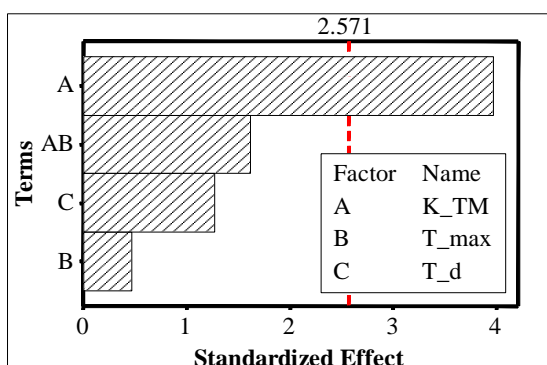
$$\varepsilon_\theta^{(2)}(r = b_2) = \varepsilon_\theta^{(3)}(r = a_3) \quad (13)$$

علت این امر نیز آن است که نقش پوشش حائل حرارتی، همانندی سدی است که در مقابل انتقال حرارت به ماده پایه مقاومت می کند. لذا دمای بیشینه، کمترین اثر را در عمر خستگی ترمومکانیکی آلیاژ آلومینیوم با پوشش حائل حرارتی را دارد.

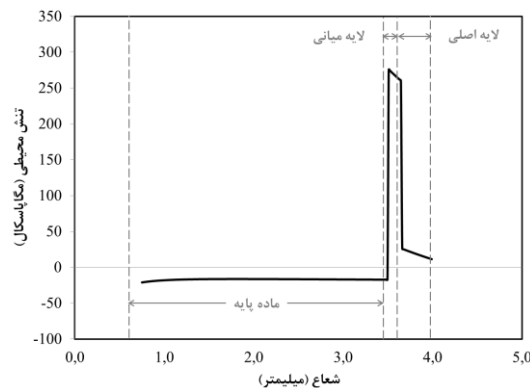
نتایج مربوط به تحلیل رگرسیون خطی برای عمر خستگی ترمومکانیکی غیرهم فاز آلیاژ آلومینیوم، با و بدون پوشش سرامیکی، در جدول (۲) آورده شده است که شامل یک ضریب ثابت و ضرائب وزنی هر یک از اثرها می باشد.



شکل (۱۰) نتایج تحلیل پارامترها بر روی عمر خستگی ترمومکانیکی غیرهم فاز آلیاژ آلومینیوم بدون پوشش (K_TM: فاکتور بارگذاری ترمومکانیکی، T_max: دمای بیشینه و T_d: زمان نگهداری در دمای بیشینه).



شکل (۱۱) نتایج تحلیل پارامترها بر روی عمر خستگی ترمومکانیکی غیرهم فاز آلیاژ آلومینیوم با پوشش (K_TM: فاکتور بارگذاری ترمومکانیکی، T_max: دمای بیشینه و T_d: زمان نگهداری در دمای بیشینه).



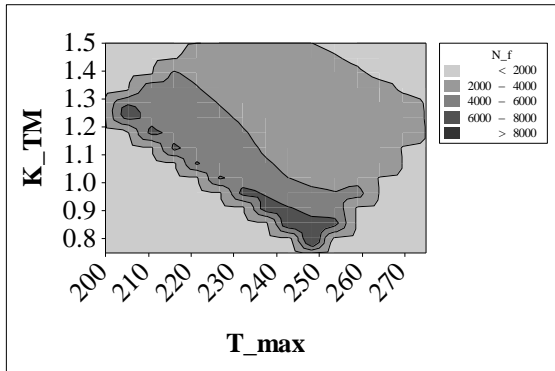
شکل (۹) توزیع تغییرات تنش محیطی در سطح مقطع نمونه آلومینیومی با پوشش، بر حسب شعاع.

براساس شکل (۸)، تنش محیطی محاسبه شده در لایه میانی، حدود ۳۰۰ مگاپاسکال بوده و با توجه به تنش تسلیم این لایه میانی، این میزان تنش می تواند باعث ایجاد ترک در آن باشد.

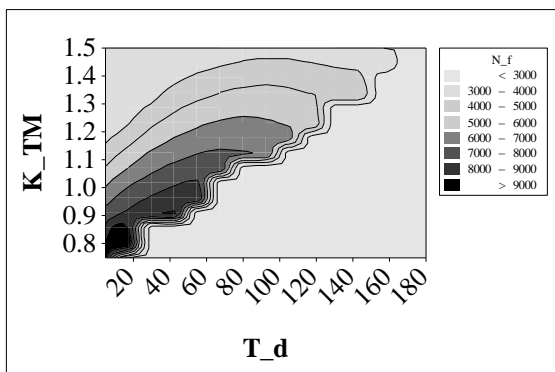
۳-۲- نتایج تحلیل حساسیت

تحلیل حساسیت پارامترها بر روی عمر خستگی ترمومکانیکی غیرهم فاز آلیاژ آلومینیوم بدون پوشش، نشان می دهد که فاکتور بارگذاری ترمومکانیکی، پارامتر موثر می باشد. این موضوع در شکل (۱۰) آمده است. پس از آن، اثر دمای بیشینه قابل توجه است و از بین اثرات متقابل پارامترها، فقط اثر متقابل فاکتور بارگذاری ترمومکانیکی و دمای بیشینه، لحاظ شده است و حساسیت بقیه اثرات متقابل، صفر است. همین نتایج برای آلیاژ آلومینیوم با پوشش حائل حرارتی، در شکل (۱۱) نشان داده شده است.

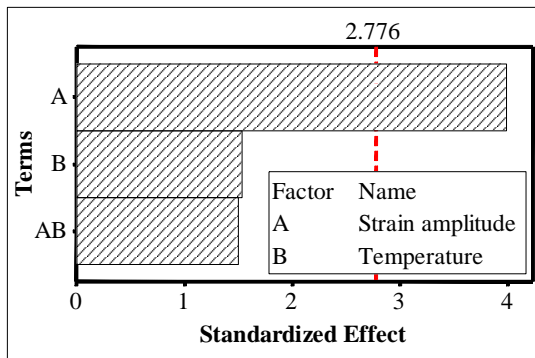
در این حالت نیز، فاکتور بارگذاری ترمومکانیکی، پارامتر موثر شناخته شده است. پس از آن، اثر متقابل دو پارامتر فاکتور بارگذاری ترمومکانیکی و دمای بیشینه، دارای درجه اهمیت بوده و سپس، پارامتر زمان نگهداری (در دمای بیشینه) می باشد. کمترین درجه اهمیت مربوط به پارامتر دمای بیشینه است.



شکل (۱۲) کانتور تغییرات عمر خستگی ترمومکانیکی غیرهم فاز آلیاژ آلومینیوم بدون پوشش براساس پارامترهای فاکتور بارگذاری ترمومکانیکی و دمای بیشینه (K_TM: فاکتور بارگذاری ترمومکانیکی و T_max: دمای بیشینه).



شکل (۱۳) کانتور تغییرات عمر خستگی ترمومکانیکی غیرهم فاز آلیاژ آلومینیوم با پوشش براساس پارامترهای فاکتور بارگذاری ترمومکانیکی و زمان نگهداری در دمای بیشینه (K_TM: فاکتور بارگذاری ترمومکانیکی و T_d: زمان نگهداری در دمای بیشینه).



شکل (۱۴) نتایج تحلیل پارامترها بر روی عمر خستگی هم‌دما (کم‌چرخه در دماهای مختلف) آلیاژ آلومینیوم بدون پوشش (Strain amplitude: دامنه کرنش مکانیکی و Temperature: دما).

نتایج تحلیل حساسیت پارامترها بر روی عمر خستگی هم‌دما (و یا کم‌چرخه در دماهای مختلف) آلیاژ آلومینیوم با پوشش سرامیکی، در شکل (۱۵) نشان داده شده است.

تابع مدنظر براساس پارامترهای موثر برای تخمین عمر خستگی ترمومکانیکی ($N_{f, TMF}$)، به فرم زیر ارائه شده است.

$$N_{f, TMF} = C_0 + C_1 K_{TM} + C_2 T_{max} + C_3 t_D + C_4 K_{TM} T_{max} \quad (15)$$

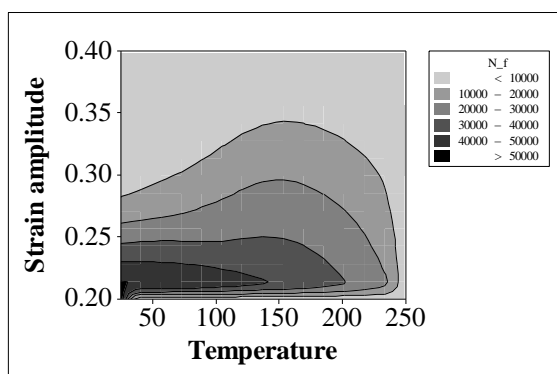
ضمناً بیشینه خطای استاندارد نیز در آخرین ردیف جدول (۲) آمده است که نشان‌دهنده دقت مدل پیش‌بینی عمر خستگی است. بیشینه خطای استاندارد مدل تخمین عمر خستگی ترمومکانیکی آلیاژ آلومینیوم پوشش دار کمی کمتر از حالت بدون پوشش است. علامت مثبت و منفی ضرائب وزنی هر یک از پارامترها، مشخص‌کننده نوع اثر آنهاست اما مقدار آن نمی‌تواند مقدار اثر را نشان دهد؛ چراکه بی‌بعد نیستند. با حذف اثرات متقابل، کانتور تغییرات عمر خستگی ترمومکانیکی آلیاژ آلومینیوم، با و بدون پوشش، بر حسب دو پارامتر موثرتر، در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) رسم شده‌اند.

نتایج تحلیل حساسیت پارامترها بر روی عمر خستگی هم‌دما (و یا کم‌چرخه در دماهای مختلف) آلیاژ آلومینیوم (بدون پوشش)، در شکل (۱۴) آمده است. در این حالت، پارامتر موثر، دامنه کرنش مکانیکی است. میزان تاثیر اثر متقابل دامنه کرنش مکانیکی و دما و همچنین اثر دما، تقریباً به یک مقدار است.

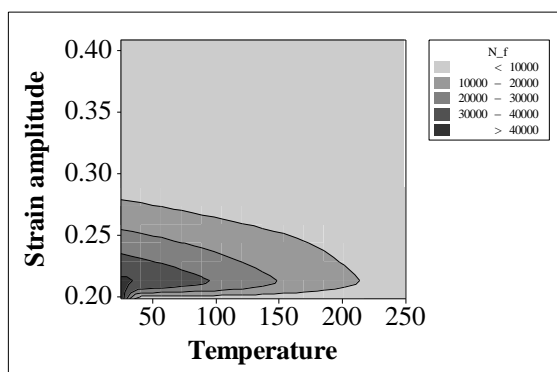
جدول (۲) ضرایب رگرسیون خطی عمر خستگی آلومینیوم با و بدون پوشش.

ضریب	آزمون خستگی	آزمون خستگی
	ترمومکانیکی روی آلیاژ آلومینیوم با پوشش	ترمومکانیکی روی آلیاژ آلومینیوم بدون پوشش
C_0	-۷۸۳۵۴	۲۶۲۴۱
C_1	۷۰۶۳۲	-۶۸۸۲
C_2	۳۷۷	-۴۸
C_3	۸	۱
C_4	-۳۲۱	-۸
بیشینه خطای استاندارد	۹۴۶۰۹	۱۰۱۷

به عبارت دیگر، مدل رگرسیون خطی برای تخمین عمر خستگی کم چرخه پوشش حائل حرارتی، مناسب نیست. پیشینه خطای استاندارد مدل تخمین عمر خستگی کم چرخه آلیاژ آلومینیوم بیشتر از خطای استاندارد مدل تخمین عمر خستگی ترمومکانیکی است. دلیل آن، این است که بطور کلی، عمر خستگی کم چرخه، بیشتر از حالت ترمومکانیکی (با شرایط بارگذاری سخت تر) است. کانتور تغییرات عمر خستگی هم دمای آلیاژ آلومینیوم، با و بدون پوشش، بر حسب دو پارامتر دامنه کرنش مکانیکی و دما، در شکل های (۱۶) و (۱۷) رسم شده اند.



شکل (۱۶) کانتور تغییرات عمر خستگی هم دما آلیاژ آلومینیوم بدون پوشش براساس پارامترهای دامنه کرنش مکانیکی و دما (Strain amplitude): دامنه کرنش مکانیکی و Temperature: دما).



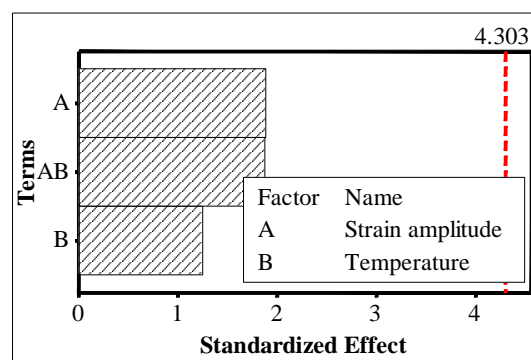
شکل (۱۷) کانتور تغییرات عمر خستگی هم دما آلیاژ آلومینیوم با پوشش براساس پارامترهای دامنه کرنش مکانیکی و دما (Strain amplitude): دامنه کرنش مکانیکی و Temperature: دما).

این تحلیل، هیچ کدام از پارامتر موثر شناخته نشده است اما بیشترین تاثیر مربوط به دامنه کرنش مکانیکی است. نتایج مربوط به تحلیل رگرسیون خطی برای عمر خستگی هم-دمای آلیاژ آلومینیوم، با و بدون پوشش سرامیکی، در جدول ۳ آورده شده است.

تابع مدنظر براساس تحلیل پارامترهای موثر برای تخمین عمر خستگی ترمومکانیکی ($N_{f,LCF}$)، به فرم زیر ارائه شده است.

$$N_{f,LCF} = C_0 + C_1 \varepsilon_{a,mech} + C_2 T + C_3 \varepsilon_{a,mech} T \quad (16)$$

ضمنا خطای استاندارد مدل تخمین عمر خستگی کم چرخه برای آلیاژ آلومینیوم، محاسبه نشده است. دلیل آن، عدم کاربرد مدل ساده رگرسیون خطی برای این حالت می باشد.



شکل (۱۵) نتایج تحلیل پارامترها بر روی عمر خستگی هم دما (کم چرخه در دماهای مختلف) آلیاژ آلومینیوم با پوشش (Strain amplitude): دامنه کرنش مکانیکی و Temperature: دما).

جدول (۳) ضرایب رگرسیون خطی عمر خستگی آلومینیوم با و بدون پوشش.

ضریب	آزمون خستگی کم چرخه روی آلیاژ آلومینیوم بدون پوشش	آزمون خستگی کم چرخه روی آلیاژ آلومینیوم با پوشش	
	۹۸۳۲۶	۱۱۸۵۱۲	C_0
	-۲۶۱۸۱۴	-۳۱۶۹۲۶	C_1
	-۳۷۳	-۲۹۴	C_2
	۱۰۴۵	۷۸۱	C_3
	-	۱۰۱۸۰	پیشینه خطای استاندارد

۴- نتیجه گیری

نتایج بررسی سطوح شکست نمونه‌های آزمون نشان می‌دهد که آلیاژ آلومینیوم دارای دیپل بوده و شکست آن بصورت نرم است. در پوشش حائل حرارتی نیز، جدایش لایه میانی پوشش از ماده پایه، مکانیزم آسیب غالب است. بطور کلی، مکانیزم خرابی در پوشش شامل سه عامل اکسیداسیون لایه میانی، کماتش لایه‌های پوشش و جدایش لایه‌های پوشش از یکدیگر و یا از ماده پایه است. عامل اول، یعنی پدیده اکسیداسیون در این بررسی رخ نمی‌دهد زیرا که دمای بیشینه در آزمونهای خستگی، ۲۷۵ درجه سانتیگراد بوده، حال آنکه اکسید شدن لایه میانی در دماهای بیشتر از ۹۰۰ درجه سانتیگراد رخ می‌دهد [۷]. عامل دوم نیز، یعنی کماتش لایه‌های پوشش مشاهده نشد. عامل دیگر، جدایش لایه‌های پوشش از یکدیگر و یا از ماده پایه، به دلیل اختلاف در مقادیر خواص مکانیکی و حرارتی مواد، شامل مدول الاستیک و ضریب انبساط حرارتی می‌باشد. این مطلب با توزیع تنش همخوانی داشته و تنش محیطی در لایه میانی، بیشترین مقدار خود را دارد و عامل جدایش لایه میانی از ماده پایه است. نتایج تحلیل‌های آماری نشان می‌دهد که بیشترین حساسیت مربوط به پارامتر دامنه کرنش در آزمون خستگی کم چرخه آلومینیوم (با و بدون پوشش) است. همچنین، عمر خستگی ترمومکانیکی غیرهم‌فاز آلایژ آلومینیوم (با و بدون پوشش)، به پارامتر فاکتور بارگذاری ترمومکانیکی، و به عبارت دیگر، به کرنش حساسیت بیشتری را در مقایسه با دمای بیشینه و زمان نگهداری نشان می‌دهد. به عبارت دیگر، عامل خرابی در پوشش‌های حائل حرارتی، کرنش مکانیکی است که براساس رفتار شکنندگی سرامیک‌ها، قابل توجیه است.

۵- تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله، از شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو (ایپکو) بابت حمایت‌های مالی برای اجرای آزمون‌ها تشکر کرده و از دانشگاه لئوین اتریش بابت همکاری آنها، قدردانی می‌نماید.

مراجع

- [1] Azadi M, *Thermo-mechanical fatigue life prediction model for aluminum alloy with thermal barrier coating*, PhD Thesis, Sharif University of Technology, Tehran, Iran, 2013.
- [2] Tzimas E, Muellejans H, Peteves SD, Bressers J, Stamm JW, Failure of thermal barrier coating under cyclic thermo-mechanical loading, *Acta Materialia*, vol. 48, 2000, pp. 4699-4707.
- [3] Peichl A, Beck T, Voehringer O, Behavior of an EB-PVD thermal barrier coating system under thermo-mechanical fatigue loading, *Surface and Coating Technology*, vol. 162, 2003, pp. 113-118.
- [4] Jinnertrand M, Brodin H, Crack initiation and propagation in air plasma sprayed thermal barrier coatings, testing and mathematical modeling of low cycle fatigue behavior, *Materials Science and Engineering A*, vol. A379, 2004, pp. 45-57.
- [5] Aguero A, Muelas R, Gutierrez M, Vulpen RV, Osgerby S, Banks JP, Cyclic oxidation and mechanical behavior of slurry aluminide coatings for steam turbine components, *Surface and Coatings Technology*, vol. 201, 2007, pp. 6253-6260.
- [6] Uzun A, Cevik I, Akcil M, Effects of thermal barrier coating on a turbocharged diesel engine performance, *Surface and Coatings Technology*, vol. 116-119, 1999, pp. 505-507.
- [7] Ranjbar-far M, Absi J, Mariaux G, Dubois F, Simulation of the effect of material properties and interface roughness on the stress distribution in thermal barrier coatings using finite element method, *Materials and Design*, vol. 31, 2010, pp. 772-781.

- [19] Moridi A, Azadi M, Farrahi GH, Thermo-mechanical stress analysis of thermal barrier coating system considering thickness and roughness effect, *Surface and Coatings Technology*, vol. 243, 2014, pp. 91-99.
- [8] Bartsch M, Baufeld B, Dalkilic S, Chernova L, Heinzelmann M, Fatigue cracks in a thermal barrier coating system on a super-alloy in multi-axial thermo-mechanical testing, *International Journal of Fatigue*, vol. 30, 2008, pp. 211-218.
- [9] Beck T, Henne I, Loehe D, Lifetime of cast AlSi6Cu4 under superimposed thermal-mechanical fatigue and high-cycle fatigue loading, *Materials Science and Engineering A*, vol. A483-484, 2008, pp. 382-386.
- [10] Takahashi T, Sasaki K, Low cycle thermal fatigue of aluminum alloy cylinder head in consideration of changing metrology microstructure, *Procedia Engineering*, vol. 2, 2010, pp. 767-776.
- [11] Wright PK, Influence of cyclic strain on life of a PVD TBC, *Materials Science and Engineering A*, vol. A245, 1998, pp. 191-200.
- [12] Rahmani K, Nategh S, Influence of aluminide diffusion coating on low cycle fatigue properties of Rene80, *Materials Science and Engineering A*, vol. A486, 2008, pp. 686-695.
- [13] Sahu JK, Das Dk, Nandy TK, Mandal D, Rajinikanth V, Swaminathan J, Ray AK, Effect of titanium aluminide coating on cyclic plastic deformation and fatigue life of a titanium alloy at 600°C, *Materials Science and Engineering A*, vol. 530, 2011, pp. 664-668.
- [14] Azadi M, Moridi A, Farrahi GH, Optimal experiment design for plasma spray parameters at bending loads, *International Journal of Surface Science and Engineering*, vol. 6(1-2), 2012, pp. 3-14
- [15] Azadi M, Farrahi GH, Moridi A, Optimization of air plasma sprayed thermal barrier coating parameters in diesel engine applications, *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 22(11), 2013, pp. 3530-3538
- [16] Azadi M, *Analysis and improvement of a passenger car NVH behavior using DOE method*, MSc Thesis, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran, 2008.
- [17] ASM Handbook, *Mechanical Testing and Evaluation*, ASM International, 2000
- [18] Shi J, Karlsson AM, Baufeld B, Bartsch M, Evaluation of surface morphology of thermo-mechanically cycled NiCoCrAlY bond coats, *Materials Science and Engineering A*, vol. A434, 2006, pp. 39-52.