

# ارزیابی آسیب‌های خستگی، اکسیداسیون و خزش در آلیاژ آلومینیوم A356.0 تحت بارهای چرخه‌ای همدم و ناهمدم

محمد آزادی\*  
غلامحسین فرهی

استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران  
استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

## چکیده

در این مقاله، آسیب‌های خستگی، اکسیداسیون و خزش در آلیاژ ریخته‌گری آلومینیوم A356.0 (شامل یک آلیاژ آلومینیوم-سیلیسیم-منیزیم که در سرسیلندر موتورهای احتراق داخلی دیزلی کاربرد دارد)، تحت بارگذاری‌های چرخه‌ای همدم و ناهمدم، مطالعه شده است. برای محاسبه آسیب‌های مختلف، از مدل آسیب مجموع شهیداوغلو استفاده شده است که در آن، آسیب کلی وارد بر ماده در بارگذاری چرخه‌ای دما بالا را مجموعی از آسیب خستگی در دمای محیط، آسیب اکسیداسیون و آسیب خزش معرفی می‌کند. ثابت‌های مادی موجود در این مدل، براساس نتایج تجربی آزمون‌های خستگی ناهمدم (و یا ترمومکانیکی غیرهمفاز) و خستگی همدم (و یا کم‌چرخه در دمای ثابت محیط ۲۵ درجه سانتیگراد و ۲۵۰ درجه سانتیگراد)، برای ماده مورد نظر، محاسبه شده‌اند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که آسیب غالب در بارگذاری خستگی ترمومکانیکی غیرهمفاز، شامل پدیده اکسیداسیون و در بارگذاری خستگی کم‌چرخه دما بالا، شامل پدیده خزش است. همچنین، این مدل برای آلیاژ آلومینیوم A356.0، به طور کلی، دقت مناسبی (در محدوده فاکتور  $\pm 2$ ) داشته و در کرنش‌های کم (عمرهای زیاد)، خطای آن بیشتر می‌شود. خطای استاندارد مدل شهیداوغلو برای خستگی ترمومکانیکی و کم‌چرخه دما بالا، به ترتیب برابر با ۰.۰۰۶ و ۰.۰۰۵ درصد و میانگین خطای نسبی آسیب کلی، به ترتیب برابر با ۲۱ و ۱۰ درصد می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** آلیاژ آلومینیوم A356.0، آسیب خستگی، آسیب اکسیداسیون، آسیب خزش، بارگذاری چرخه‌ای همدم و ناهمدم.

## Evaluation of Fatigue, Oxidation and Creep Damages in A356.0 Aluminum Alloy under Cyclic Isothermal and Un-isothermal Loadings

M. Azadi  
Gh. H. Farrahi

Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran  
Mechanical Engineering Department, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

## Abstract:

In this article, fatigue, oxidation and creep damages in the A356.0 aluminum alloy (including an aluminum-silicon-magnesium alloy, which has been used in diesel internal combustion engines) have been investigated under isothermal and un-isothermal cyclic loadings. In order to calculate different damages, Sehitoglu's model was utilized, in which the total damage in materials under high-temperature cyclic loadings include the fatigue damage, the oxidation damage and the creep damage. Material constants in this model for the mentioned alloy were calculated by experimental data from isothermal fatigue tests (or low-cycle fatigue tests at constant room temperature and at 250°C) and non-isothermal fatigue tests (or out-of-phase thermo-mechanical fatigue tests) were performed on test specimens. Obtained results showed that the main damage under out-of-phase thermo-mechanical fatigue loadings was the oxidation and under high-temperature low-cycle fatigue loadings was the creep phenomenon. In addition, the model used for the A356.0 aluminum alloy had generally a proper accuracy and in lower strains (higher lifetimes), the error was increased. The standard error for Sehitoglu's model under thermo-mechanical and low-cycle fatigue tests was 0.006 and 0.005%, respectively and the relative error for the total damage was 21 and 10%, respectively.

**Keywords:** A356.0 aluminum alloy, Fatigue damage, Oxidation damage, creep damage, Isothermal and un-isothermal cyclic loadings.

## ۱- مقدمه

قطعات موتور همچون سرسیلندر، معمولاً در معرض بارهای چرخه‌ای مکانیکی و گرمایی هستند و لذا اهمیت تحلیل خستگی آنها در زمان روند طراحی مشخص می‌گردد. یکی از موادی که در سرسیلندر موتورها بخصوص موتورهای دیزل کاربرد وسیعی دارد، آلیاژهای ریخته‌گری آلومینیوم-سیلیسیم می‌باشد که مزیت آن در مقایسه با سایر مواد، نسبت بالای استحکام به وزن آن است [۱].

به منظور محاسبه آسیب در جسم، باید از مدل‌هایی تخمین عمر نظیر مدل شهیداوغلو<sup>۱</sup> استفاده نمود که برای بکارگیری آن، لازم است که خواص مادی از نتایج آزمون خستگی محاسبه شوند. از این مدل، در نرم‌افزارهای تجاری (FEMFAT) به صورت عمده استفاده شده و شامل مجموع سه آسیب خستگی، اکسیداسیون و خزش می‌باشد. در زمینه استفاده از مدل فوق، مطالعات فراوانی بر روی مواد مختلف انجام شده است که در ادامه، به برخی از آنها اشاره می‌شود. همان گونه که ذکر گردید، اولین قدم در استفاده از مدل شهیداوغلو، محاسبه تعداد زیادی از خواص ماده برای رفتار خستگی، اکسیداسیون و خزش آن است که توسط برخی از محققان برای انواعی از فولاد و

<sup>1</sup> Sehitoglu's model

آلومینیوم محاسبه شده است [۲-۴]. این مدل آسیب، برای اولین بار توسط شهیداوغلو و نیو [۲-۳]، در سال ۱۹۸۰ برای نوعی فولاد ۱۰۷۰ ارائه گردید و خواص ماده نیز، محاسبه شد. دقت آن نشان می‌دهد که ۸۵ درصد از پیش‌بینی‌ها، در محدوده پراکندگی با فاکتور  $\pm 2.5$  از عمر تجربی قرار دارند. مینیخمایر و همکارانش [۴]، خستگی ترمومکانیکی و کمپرخه آلیاژ کار شده آلومینیوم (AlCuBiPb) را در مدل شهیداوغلو بررسی کرده‌اند. نتایج آنها نشان می‌دهد که مدل فوق، در کرنش‌های کم، از دقت خوبی برخوردار نبوده و مشکل اصلی آن، دارا بودن تعداد زیادی ثابت مادی است که باید از طریق اجرای آزمون‌های مختلف به دست آیند. هالاستسی و همکارانش [۵]، روشی را برای محاسبه پارامترهای مادی مدل شهیداوغلو ارائه کرده‌اند.

مدل شهیداوغلو برای یک سوپرآلیاژ تک کریستال پایه نیکل، توسط آمارو و همکارانش [۶-۷]، بر اساس آزمون‌های خستگی ترمومکانیکی، توسعه یافته است. در این مدل، از یک مدل جدید بجای مدل کلاسیک آسیب خستگی استفاده شده است. کادی‌وقلو [۸] و همچنین شهیداوغلو و بویسمایر [۹]، مدل آسیب مجموع آسیب‌های خستگی، اکسیداسیون و خزش را برای یک سوپرآلیاژ پایه نیکل (Mar-247) بررسی کرده‌اند و ثوابت مادی آن را نیز استخراج نموده‌اند. در تحقیقات دیگری، کادی‌وقلو و شهیداوغلو [۱۰]، کار قبلی را تکمیل کرده و برای سوپرآلیاژ فوق به صورت پوشش‌دار (از اکسید آلومینیوم) نیز، ثوابت مادی را ارائه کرده‌اند. آنها به آسیب اکسیداسیون، در حالتی که یک پوشش روی ماده اعمال شده باشد، تابعی اضافه کردند که نشان دهنده اثر محافظتی پوشش در مقابل شرایط محیطی باشد. پارامتر فوق تابعی از متغیرهای تجربی نظیر دامنه کرنش، نرخ کرنش، دما، مشخصات پوشش و متغیرهای متالورژیکی است. مدل شهیداوغلو تعمیم یافته برای حالت سه بعدی، به منظور تحلیل خستگی سرسپیندر آلومینیومی (A319) توسط سو و همکارانش [۱۱]، بکار گرفته شده است. فلوری و ها [۱۲]، رفتار خستگی کم‌چرخه و ترمومکانیکی یک سوپرآلیاژ پوشش‌دار را براساس مدل شهیداوغلو بررسی کرده‌اند. تحلیل عمر خستگی پره‌های توربین در یک موتور هوایی توسط آبو و همکارانش [۱۳]، با استفاده از مدل آسیب شهیداوغلو - نیو انجام پذیرفت. نتایج آنها نشان داد که بیشترین آسیب در قطعه مورد مطالعه، مربوط به پدیده اکسیداسیون بود. مائو و همکارانش [۱۴]، از مدل شهیداوغلو برای تحلیل خستگی چندراشه دود در موتور استفاده کردند و نشان دادند که نتایج عددی شامل تخمین عمر خستگی ترمومکانیکی با ترک‌های واقعی ایجاد شده رو قطعه، سازگاری دارد.

علاوه بر مدل آسیب مجموع شهیداوغلو که شامل آسیب‌های خستگی، اکسیداسیون و خزش است، مدل‌های دیگری نیز در مقالات مدنظر قرار گرفته است. به عنوان مثال، مجموع آسیب خستگی و خزش توسط جولیس و همکارانش [۱۵]، بارلاس و همکارانش [۱۶] و کیم و همکارانش [۱۷]، در مواد مختلف در نظر گرفته شد. همچنین، مجموع آسیب خستگی و اکسیداسیون (بخصوص برای مواد پوشش‌دار)، توسط کورسایر و همکارانش [۱۸] و ژانگ و همکارانش [۱۹]، به عنوان معیاری برای خرابی در مواد در نظر گرفته شده است. در مجموع می‌توان نتیجه گرفت که تعداد کمی از محققان روی مدل شهیداوغلو مطالعه کرده‌اند چراکه این مدل، دارای پارامترهای مادی زیادی (۲۷ پارامتر) بوده و برای تمامی مواد و بخصوص آلیاژ آلومینیوم، به دلیل

زیاد بودن آنها و هزینه زیاد آزمون‌های خستگی ترمومکانیکی، استخراج نشده است. لذا در این تحقیق، بر اساس آزمون‌های خستگی دما بالا، مدل فوق (مدل آسیب مجموع شهیداوغلو) برای آلیاژ آلومینیوم A356.0، بررسی شده و ثوابت مادی آن استخراج گردیده است.

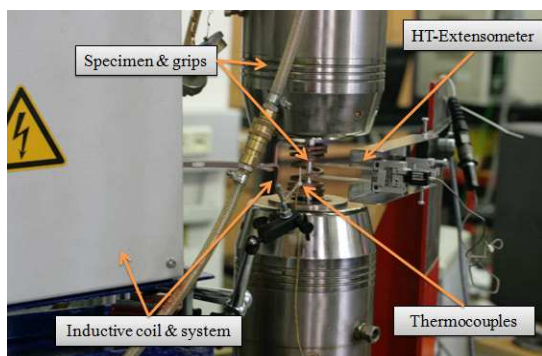
## ۲- مواد و آزمون‌ها

در این تحقیق، ماده مورد مطالعه، آلیاژ آلومینیوم A356.0 (شامل یک آلیاژ آلومینیوم-سیلیسیوم-منیزیم یا AlSi7Mg0.3) در نظر گرفته شد. شایان ذکر است که این آلیاژ ریخته‌گری آلومینیوم برای ساخت سرسپیندر موتورهای احتراق داخلی بخصوص موتورهای دیزلی کاربرد دارد. این آلیاژ به روش ریخته‌گری در قالب ثابت تولید شد. این ماده شامل ۷ درصد سیلیسیوم و ۰.۳ درصد منیزیم در زمینه آلومینیومی است. ریزساختار ماده اولیه در شکل ۱ نمایش داده شده است. این ریزساختار شامل فاز زمینه اصلی (آلومینیوم) و فاز ثانویه (ذرات سیلیسیوم) می‌باشد. طول بازوی دوم درختی<sup>۱</sup> در فاز زمینه که به عنوان یکی از مشخصه‌های ریزساختاری آلیاژهای آلومینیوم محسوب می‌شود، در این ماده مورد مطالعه، بین ۳۰ تا ۳۵ میکرون محاسبه شده است.

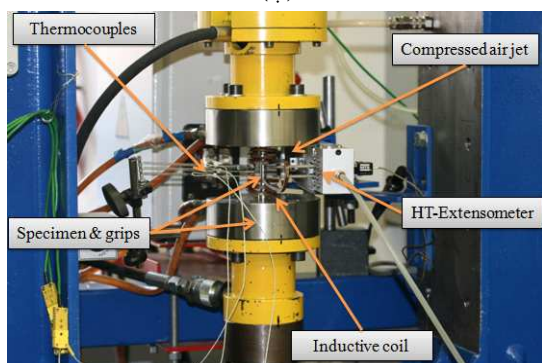
آزمون‌های خستگی کشش-فشار به صورت کنترل دما و کرنش مکانیکی انجام شدند. آزمون خستگی همدم و یا کمپرخه، در یک دمای ثابت، دامنه کرنش مکانیکی، تغییر می‌کند اما در آزمون خستگی ناهمدم و یا ترمومکانیکی غیرهمفاز، دما و کرنش، با اختلاف فاز ۱۸۰ درجه، تواما در یک چرخه تغییر می‌کنند؛ به طوری که در دمای بیشینه، کرنش فشاری و در دمای کمینه، کرنش کششی به جسم اعمال می‌گردد.

این نوع بارگذاری خستگی، بارهای واقعی وارده به یک سرسپیندر طی چرخه‌های خاموش و روشن شدن موتور را مدلسازی می‌نماید. با توجه به اینکه هر دو پارامتر کرنش و دما در آزمون خستگی ناهمدم (ترمومکانیکی)، تغییر می‌کند، پارامتری تعریف می‌شود شامل فاکتور بارگذاری ترمومکانیکی، که به طور کلی نسبتی بین کرنش‌های مکانیکی و حرارتی است. برای بارگذاری از دستگاه کشش-فشار (نوع دستگاه: Servo-Hydraulic INSTRON 100 kN) استفاده شد. سیستم حرارت‌دهی به صورت القایی شامل کویل‌های مسی (نوع دستگاه: Huettinger TIG 10/300) بود و از جت هوای فشرده برای سرد کردن نمونه‌های آزمون استفاده شد. برای اندازه‌گیری کرنش و دما، به ترتیب از دستگاه اندازه‌گیر کرنش دما بالا (نوع دستگاه: MTS EXH 15-0.75A) و ترموکوپل در داخل و روی نمونه آزمون (نوع حسگر: K-Type) استفاده شد. برای اندازه‌گیری دمای ماده، سوراخی در وسط نمونه تعبیه شد که یک ترموکوپل داخل آن قرار گرفت. نمونه آلومینیومی مورد استفاده در آزمون‌های خستگی، در شکل ۲ نشان داده شده است. تجهیزات مورد استفاده (شامل ترموکوپل، نمونه و فک دستگاه، کرنش‌سنج، المان گرمایی و هوای فشرده) نیز، در شکل ۳ نشان داده شده است. جزئیات بیشتر در مورد مراحل اجرای آزمون‌های خستگی و سایر تجهیزات مورد استفاده، در مرجع [۱] آمده است.

<sup>1</sup> Secondary dendrite arm spacing (SDAS)



(ب)



شکل ۳- تجهیزات مربوط به آزمون‌های خستگی (الف) همدم و (ب) ناهمدم (شامل ترموکوپل، نمونه و فک دستگاه، کرنش‌سنج، المان گرمایی و جت هوای فشرده)

### ۳- معرفی مدل آسیب

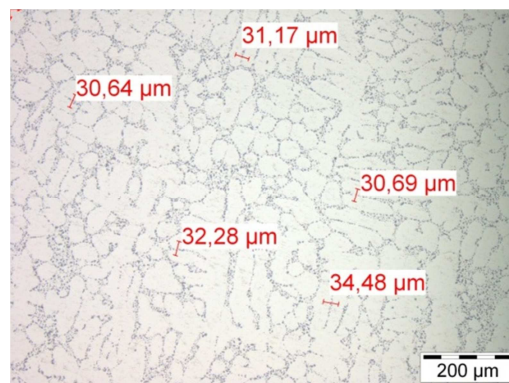
در شرایط بارگذاری خستگی ترمومکانیکی، جسم دچار آسیب‌هایی نظیر خستگی، اکسیداسیون و خزش می‌شود. این آسیب‌ها و علت هر یک از آنها، در شکل ۴ نشان داده شده‌اند. این مکانیزم‌های آسیب ممکن است به نوع ماده و شرایط کاری مختلف (از جمله دمای کمینه و بیشینه، محدوده تغییرات دما، دامنه کرنش مکانیکی، نرخ کرنش، فاز بارگذاری، مدت زمان نگهداری در دمای بیشینه و یا عوامل محیطی)، وابسته باشد و یا از آنها مستقل باشند.

مدل آسیب شهیداوغلو، شامل آسیب‌های خستگی مکانیکی، اکسیداسیون و خزش می‌باشد. آسیب خستگی مکانیکی در دمای محیط، با استفاده از روش‌های کلاسیک (مدل مانسون-کافین-باسکوئین<sup>۱</sup>) و دامنه کرنش، مدلسازی می‌شود. فرآیند اکسیداسیون، به عنوان تابعی از دامنه کرنش، نرخ کرنش، فاز کرنش-دما، و سینتیک اکسیداسیون در نظر گرفته می‌شود. آسیب خزش نیز براساس تنش، دما، فاز کرنش-دما و زمان می‌باشد.

لذا پارامتر آسیب مربوط به هر مکانیزم، با یکدیگر جمع شده تا تخمینی از عمر خستگی کل، به دست آید.

$$D_{tot} = D_{fat} + D_{ox} + D_{cr} \quad (1)$$

$$\frac{1}{N_{tot}} = \frac{1}{N_{fat}} + \frac{1}{N_{ox}} + \frac{1}{N_{cr}} \quad (2)$$



شکل ۱- ریزساختار آلیاژ آلومینیوم A356.0 (نقاط روشن‌تر شامل فاز زمینه اصلی ریزساختار، یعنی دندریت‌های آلومینیومی بوده و نقاط تیره‌تر شامل فاز ثانویه ریزساختار ماده، یعنی ذرات سلیسیوم است.)

شرایط آزمون خستگی همدم (و یا کمپرچه) عبارتند از:

الف) دما ( $T$ ): ۲۵، ۲۰۰ و ۲۵۰ درجه سلسیوس

ب) دامنه کرنش مکانیکی ( $\epsilon_{a, mech}$ ): ۰.۳، ۰.۴ و ۰.۴

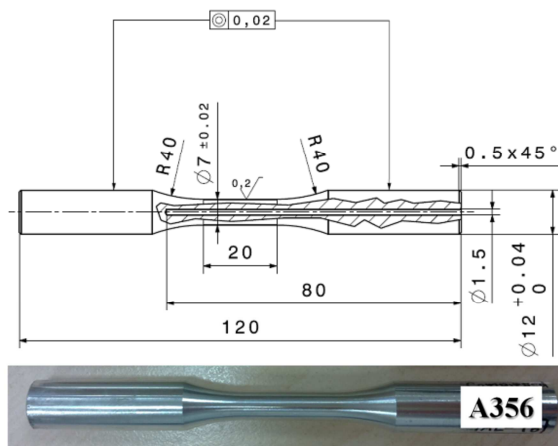
شرایط آزمون خستگی ناهمدم (و یا ترمومکانیکی غیرهمفاز) عبارتند از:

الف) محدوده تغییرات دمایی بین دمای کمینه ( $T_{min}$ ) و دمای بیشینه ( $T_{max}$ ): ۵۰ تا ۲۰۰، ۵۰ تا ۲۲۵، ۵۰ تا ۲۵۰ و ۵۰ تا ۲۷۵ درجه سلسیوس

ب) فاکتور بارگذاری ترمومکانیکی ( $K_{TM}$ ): ۰.۷۵، ۱.۰۰، ۱.۲۵ و ۱.۵۰

ج) زمان نگهداری در دمای بیشینه ( $t_D$ ): ۵، ۳۰، ۶۰ و ۱۸۰ ثانیه

شایان ذکر است که فاکتور بارگذاری ترمومکانیکی، شامل نسبت دامنه کرنش مکانیکی به دامنه کرنش حرارتی (ضرب محدوده تغییرات دما در ضریب انبساط گرمایی ماده) می‌باشد.



شکل ۲- نمونه آلومینیومی آزمون‌های خستگی (الف)

<sup>1</sup> Manson-Coffin-Basquin (MCB)

شایان ذکر است؛ علاوه بر تعداد زیاد ثوابت مادی، ضعف مدل فوق این است که برهمکنش بین آسیب‌های خستگی، اکسیداسیون و خزش در مواد را لحاظ نمی‌کند.

اولین آسیب، آسیب خستگی است که در حالت بارگذاری چرخه‌ای ترمومکانیکی، ناشی از ایجاد و رشد میکروترک‌ها در کرنش‌های پلاستیکی بالا می‌باشد. برای توصیف آسیب خستگی، از معادله کرنش-عمر، استفاده می‌شود.

$$\frac{\Delta \varepsilon_{mech}}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_{fat})^b + \varepsilon'_f (2N_{fat})^c \quad (3)$$

پارامترهای مادی در رابطه بالا (مدل مانسون-کافین-باسکوئین)، از آزمون‌های خستگی کم‌چرخه در دمای محیط محاسبه می‌شوند [۳]. دومین آسیب، آسیب اکسیداسیون است که می‌تواند در تشکیل یک نفوذ اکسید، اتفاق افتد. در بارگذاری ترمومکانیکی غیرهمفاز، یک لایه اکسید می‌تواند روی سطح، و زمانی که ماده به بیشترین دما رسیده و تحت فشار است، تشکیل گردد. در دمای پایین، لایه اکسید، شکننده شده و در طی اعمال کرنش مکانیکی، می‌شکند و سطوح فلزی جدید و تمیزی را نمایان می‌کند. این فلز تمیز (بدون لایه اکسید)، به سرعت اکسید شده و فرایند، در طول چرخه بعدی اعمال کرنش مکانیکی، تکرار می‌شود. در نهایت، این فرایند، یک ترک را تشکیل می‌دهد که می‌تواند رشد نماید. رابطه عمر اکسیداسیون ماده به شکل زیر است:

$$\frac{1}{N_{ox}} = \left[ \frac{h_c \delta_0}{B \phi^{ox} K_{p,eff}} \right]^{-1/\beta} \frac{2(\Delta \varepsilon_{mech})^{1+2/\beta}}{(\dot{\varepsilon}_{mech})^{1-\alpha/\beta}} \quad (4)$$

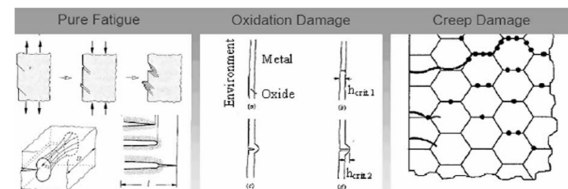
سه‌می‌گون اکسیداسیون موثر، به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$K_{p,eff} = \frac{1}{t_c} \int_0^{t_c} D_0 \exp\left(\frac{-Q}{RT(t)}\right) dt \quad (5)$$

فاکتور فازی اکسیداسیون که آسیب اکسیداسیون نسبی بین فازها را مشخص می‌کند، به شرح ذیل بیان می‌گردد.

$$\phi^{ox} = \frac{1}{t_c} \int_0^{t_c} \exp\left(-\frac{1}{2} \left[ \frac{1 + \dot{\varepsilon}_{th} / \dot{\varepsilon}_{mech}}{\xi^{ox}} \right]^2\right) dt \quad (6)$$

سومین آسیب، آسیب خزش است. مسئله خزش، اساساً یک فرایند انتشار بوده و در انتشار تنش، نابجایی‌ها اجازه می‌یابند که از روی موانع (همچون مرز دانه‌ها) عبور کنند. انتشار، شدیداً به دما و زمان وابسته است. تنش بیشینه، نقش موثرتری را در تشکیل این میکروترک‌ها، نسبت به دامنه کرنش، ایفا می‌کند.



شکل ۴- آسیب‌های خستگی، اکسیداسیون و خزش در مواد تحت

بارگذاری خستگی ترمومکانیکی [۲۰]

لذا رابطه آسیب خزش به صورت زیر تعریف می‌گردد.

$$\frac{1}{N_{cr}} = \phi^{cr} \int_0^{t_c} A \exp\left(\frac{-\Delta H}{RT(t)}\right) \left(\frac{\alpha_1 \bar{\sigma} + \alpha_2 \sigma_h}{K}\right)^m dt \quad (7)$$

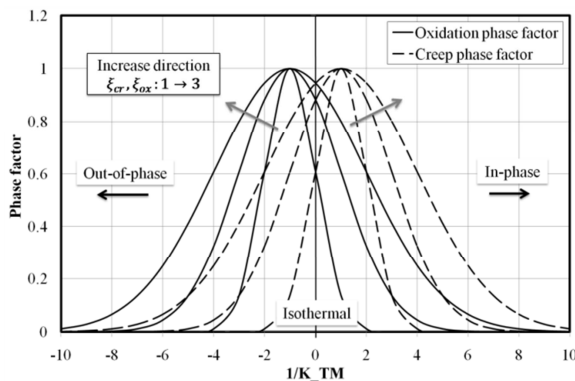
در آزمون خستگی تک محوره، اگر هیچ آسیب خزشی در حالت فشاری رخ ندهد، ضرائب  $\alpha_1, \alpha_2$ ، به ترتیب به میزان یک سوم و یک خواهد بود. تنش و دما در نیمه عمر در نظر گرفته می‌شود. تنش پسا<sup>۱</sup>، تنش تسلیم ماده بر اساس دما و به صورت زیر است [۳].

$$K = K_0 - K_1 T \quad (8)$$

بر اساس آزمون‌های کشش در دماهای مختلف، پارامترهای  $K_0, K_1$  به ترتیب، ۰.۲ و ۱۴۹ مگاپاسکال برای آلیاژ آلومینیوم می‌باشد [۱]. فاکتور فازی در خزش به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\phi^{cr} = \frac{1}{t_c} \int_0^{t_c} \exp\left(-\frac{1}{2} \left[ \frac{-1 + \dot{\varepsilon}_{th} / \dot{\varepsilon}_{mech}}{\xi^{cr}} \right]^2\right) dt \quad (9)$$

به دلیل اینکه نرخ کرنش‌های مکانیکی و گرمایی، ثابت است، فاکتورهای فازی در طول یک چرخه، عدد ثابتی هستند. در شکل ۵، نحوه تغییرات هر دو فاکتور فازی اکسیداسیون و خزش نشان داده شده است.



شکل ۵- تغییرات فاکتورهای فازی اکسیداسیون و خزش

همان گونه که در شکل ۵ مشخص است؛ فاکتور فازی اکسیداسیون، بیشتر در بارگذاری‌های چرخه‌ای ترمومکانیکی غیرهمفاز و فاکتور فازی خزش، بیشتر در بارگذاری‌های چرخه‌ای ترمومکانیکی همفاز، فعال هستند.

با اجرای آزمون‌های مختلف بر روی آلیاژ آلومینیوم، پارامترهای مادی مدل شهیداوغلو، با ساده‌سازی روابط مربوطه، استخراج می‌شوند. به عنوان مثال، نسبت نرخ کرنش مکانیکی به نرخ کرنش حرارتی، به فرم رابطه زیر درمی‌آید.

$$K_{TM} = -\frac{\varepsilon_{a,mech}}{\varepsilon_{a,th}} = -\frac{\varepsilon_{a,mech}}{\alpha_{th} \Delta T} = -\frac{k_1 t}{k_2 t} = -\frac{k_1}{k_2} \rightarrow \frac{\dot{\varepsilon}_{th}}{\dot{\varepsilon}_{mech}} = \frac{k_2}{k_1} = \frac{1}{K_{TM}} \quad (10)$$

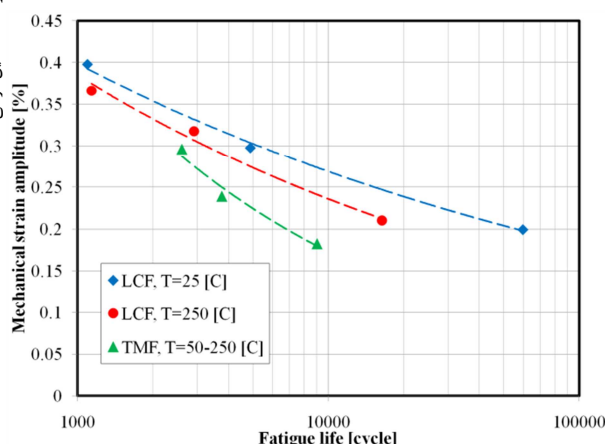
که در آن فرض شده است که کرنش مکانیکی با ضریب  $k_1$  و کرنش حرارتی با ضریب  $k_2$ ، نسبت به زمان تغییر می‌کنند. لذا نرخ کرنش مکانیکی، براساس نرخ دما، طبق رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$\dot{\varepsilon}_{mech} = K_{TM} \dot{\varepsilon}_{th} = K_{TM} \alpha_{th} \dot{T} \quad (11)$$

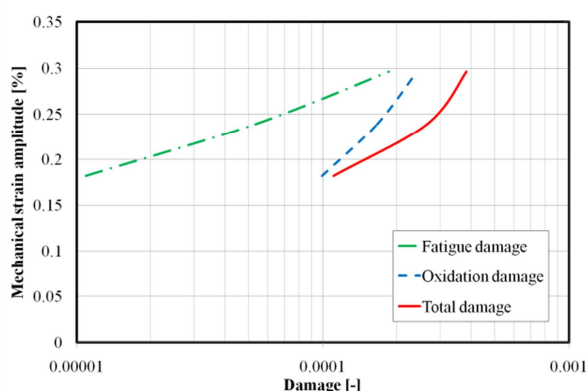
بنابراین، با انتگرال‌گیری، فاکتورهای فازی برای آزمون‌های خستگی، همانند جدول ۱، ساده می‌شوند. قابل ذکر است که مقدار فاکتور

<sup>1</sup> Drag stress

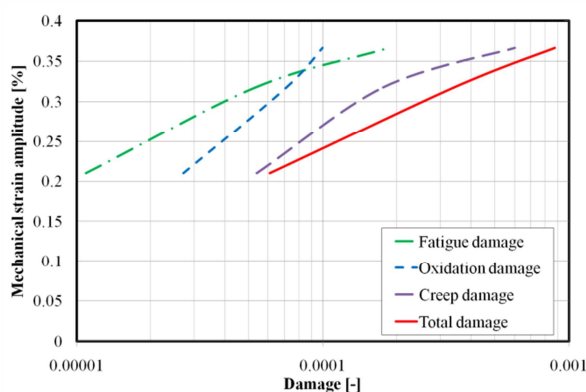
غالب در خستگی کم‌چرخه دما بالا و خستگی ترمومکانیکی غیرهمفاز) در سایر مراجع [۴-۱] نیز برای مواد دیگر، مطرح شده است.



شکل ۶- نتایج آزمون‌های خستگی کم‌چرخه در دمای محیط و ۲۵۰ درجه سانتیگراد و خستگی ترمومکانیکی غیرهمفاز با محدوده تغییرات دما بین ۵۰ تا ۲۵۰ درجه سانتیگراد



شکل ۷- آسیب‌های خستگی، اکسیداسیون و کلی در آزمون خستگی ترمومکانیکی غیرهمفاز بر اساس مدل شهیداوغلو



شکل ۸- آسیب‌های خستگی، اکسیداسیون، خزش و کلی در آزمون خستگی کم‌چرخه دما بالا بر اساس مدل شهیداوغلو

بارگذاری ترمومکانیکی در آزمون خستگی کم‌چرخه برابر با بینهایت و در آزمون خستگی ترمومکانیکی غیرهمفاز برابر با یک عدد ثابت می‌باشد. با توجه به بارگذاری تک‌محوره، تنش در آسیب خزش، به فرم رابطه زیر ساده می‌گردد.

$$\bar{\sigma} = \sigma, \quad \sigma_h = \frac{1}{3}\sigma \quad (12)$$

$$\rightarrow \alpha_1 \bar{\sigma} + \alpha_2 \sigma_h = \frac{1}{3}\sigma + \frac{1}{3}\sigma = \frac{2}{3}\sigma$$

روابط انتگرالی در آسیب‌های خزش و اکسیداسیون، به یک سری (روی داده‌های تنش، کرنش و دمای در نیم چرخه عمر) تبدیل شده و به فرم روابط زیر درمی‌آید.

$$\frac{1}{N_{cr}} = \Phi_{cr} \bar{A} t_c \sum \exp \left[ -\frac{\Delta H_{cr}}{RT(t)} \right] \left( \frac{\alpha_1 \bar{\sigma} + \alpha_2 \sigma_h}{K} \right)^{\bar{m}} \quad (13)$$

$$K_{p,eff} = D_0 \sum \exp \left[ -\frac{\Delta H_{ox}}{RT(t)} \right] \quad (14)$$

جدول ۱- فاکتورهای فازی خزش و اکسیداسیون در آزمون چرخه‌ای

| نوع آزمون چرخه‌ای    | $\Phi_{cr}$                                                                | $\Phi_{ox}$                                                                               |
|----------------------|----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| کم‌چرخه دما بالا     | $\exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{1}{\xi_{cr}} \right)^2 \right]$     | $\exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{1}{\xi_{ox}} \right)^2 \right]$                    |
| ترمومکانیکی غیرهمفاز | $\exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{1}{\xi_{cr}} - 1 \right)^2 \right]$ | $\exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{1 + \frac{1}{K_{TM}}}{\xi_{ox}} \right)^2 \right]$ |

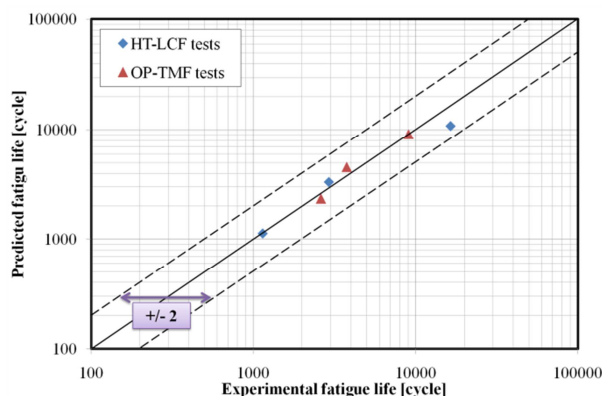
#### ۴- نتایج و بحث بر روی نتایج

نتایج آزمون‌های خستگی شامل دامنه کرنش مکانیکی (در نیمه عمر) بر حسب عمر خستگی در شکل ۶، نشان داده شده‌اند. با کمینه نمودن خطای استاندارد<sup>۱</sup> و خطای نسبی<sup>۲</sup> بین نتایج آزمون‌های خستگی و نتایج مدل‌سازی، پارامترهای مادی برای هر یک از آسیب‌ها محاسبه می‌شوند. بر این اساس، میزان آسیب‌های خستگی، اکسیداسیون و خزش در هر یک از آزمون‌های خستگی ترمومکانیکی غیرهمفاز و خستگی کم‌چرخه دما بالا، در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده است. پارامترهای مدل شهیداوغلو محاسبه شده برای آلیاژ آلومینیوم A356.0 نیز، در جدول ۲ آورده شده‌اند. مقادیر به دست آمده ثوابت مادی مدل شهیداوغلو برای آلیاژ مدنظر، نسبت به مراجع دیگر [۲، ۳، ۶، ۷، ۲۱]، در محدوده قابل قبولی، قرار دارند.

با توجه به اینکه در آزمون‌های خستگی ترمومکانیکی غیرهمفاز، در دمای بیشینه، ماده تحت فشار است، آسیب ناشی از پدیده خزش مقدار ناچیزی داشته و از آن صرف نظر می‌شود [۲-۳] و همان‌گونه که در شکل ۷ مشخص است، آسیب ناشی از اکسیداسیون آلیاژ آلومینیوم A356.0، بیشتر از آسیب خستگی آن است. در آزمون خستگی کم‌چرخه دما بالا، با توجه به ثابت بودن دما، آسیب خزش، سهم بیشتری نسبت به آسیب‌های اکسیداسیون و خستگی را ایفا می‌کند (شکل ۸). و این در حالی است که آسیب غالب در خستگی ترمومکانیکی غیرهمفاز، اکسیداسیون است. این موضوع (معرفی آسیب

<sup>1</sup> Standard error

<sup>2</sup> Relative error



شکل ۹- عمر خستگی حاصل از نتایج تجربی و شبیه‌سازی بر اساس مدل شهیداوغلو برای آلیاژ آلومینیوم

مشکل عمده مدل آسیب مجموع شهیداوغلو آنجا نمایان می‌شود که عمر خستگی دما بالای یک ماده، بیشتر از عمر خستگی دمای محیط آن باشد. در آلیاژ آلومینیوم A356.0، در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس، عمر خستگی کم‌چرخه ماده بیشتر از عمر خستگی کم‌چرخه دمای محیط آن می‌شود. دلیل این عمر، پدیده پیرسازی در آلیاژ آلومینیوم است. به عبارت دیگر، بیشترین استحکام آلیاژ آلومینیوم A356.0 پس از فرایند پیرسازی، در دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد رخ می‌دهد [۱]. لذا این مدل برای آلیاژ آلومینیوم، در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس، کاربردی ندارد؛ زیرا آسیب خستگی در این دما، بیشتر از آسیب خستگی در دمای محیط است و بر این اساس، نمی‌توان آسیب کل که مجموع آسیب‌های خستگی (در دمای محیط)، اکسیداسیون و خزش (در دمای بالا) است را محاسبه نمود.

## ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، پارامترهای مادی مدل شهیداوغلو برای آلیاژ ریخته‌گری آلومینیوم A356.0 بر اساس نتایج آزمون‌های خستگی همدم (کم‌چرخه دما بالا و ناهمدم (ترمو مکانیکی غیرهمفاز) محاسبه گردید. در خستگی ترمو مکانیکی غیرهمفاز، با صرف نظر از آسیب خزش، آسیب غالب شامل اکسیداسیون ماده بوده اما در خستگی کم‌چرخه دما بالا (دمای ثابت ۲۵۰ درجه سلسیوس)، خزش نقش مهمتری نسبت به آسیب‌های اکسیداسیون و خستگی را ایفا می‌کند. در کرنش‌های کم (عمرهای زیاد)، خطای مدل شهیداوغلو برای آلیاژ آلومینیوم بیشتر از سایر نقاط می‌شود. در صورتی که عمر خستگی ماده‌ای در دمای بالا، بیشتر از عمر خستگی آن در دمای محیط گردد، مدل آسیب مجموع شهیداوغلو، کاربردی نخواهد داشت.

## ۶- تشکر و قدردانی

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

جدول ۲- پارامترهای مادی آلیاژ ریخته‌گری آلومینیوم در مدل

| شهیداوغلو       |                              |                       |
|-----------------|------------------------------|-----------------------|
| نوع آسیب        | مقدار پارامتر در آزمون خستگی |                       |
| خستگی           | کم‌چرخه دما بالا             | ترمو مکانیکی غیرهمفاز |
| $\epsilon'_f$   | ۰/۰۰۴۹۷                      | ۰/۰۰۴۹۷               |
| $\sigma'_f / E$ | ۰/۰۰۹۸۵                      | ۰/۰۰۹۸۵               |
| $b$             | - ۰/۱۸۸                      | - ۰/۱۸۸               |
| $C$             | - ۰/۱۴۹                      | - ۰/۱۴۹               |
| اکسیداسیون      | کم‌چرخه دما بالا             | ترمو مکانیکی غیرهمفاز |
| $\xi^{ox}$      | ۰/۵                          | ۱/۶                   |
| $B$             | ۰/۰۰۸                        | ۰/۰۰۸                 |
| $h_c$           | ۰/۰۰۰۵                       | ۰/۰۰۰۵                |
| $Q$             | ۱۲۰                          | ۱۲۰                   |
| $\alpha$        | ۰/۷۵                         | ۰/۷۵                  |
| $\beta$         | ۱/۵                          | ۱/۵                   |
| خزش             | کم‌چرخه دما بالا             | ترمو مکانیکی غیرهمفاز |
| $\xi^{cr}$      | ۲/۸                          | -                     |
| $m$             | ۷/۱                          | -                     |
| $\Delta H$      | ۲۱۵                          | -                     |

بر اساس شکل ۸، در کرنش‌های مکانیکی زیاد (۰/۳۵ درصد)، آسیب خستگی در آلیاژ آلومینیوم، بیشتر از آسیب اکسیداسیون ناشی از خستگی کم‌چرخه دما بالا می‌شود. اما در محدوده کرنش‌های کمتر، همچنان آسیب اکسیداسیون نقش مهمتری را نسبت به آسیب خستگی، دارد. طبق جدول ۲، پارامترهای مادی آسیب خستگی، برای هر دو نوع آزمون یکسان بوده و از نتایج آزمون خستگی کم‌چرخه در دمای محیط استخراج شده‌اند.

تمامی ثوابت مادی آسیب اکسیداسیون بجز یک پارامتر ( $\xi^{ox}$ )، برای هر دو نوع آزمون خستگی، یکسان بوده و پارامتر فوق نیز نشان دهنده میزان تاثیر اکسیداسیون است که مقدار آن برای خستگی ترمو مکانیکی ۱/۶ و برای خستگی کم‌چرخه دما بالا ۰/۵ می‌باشد و لذا اثر آسیب اکسیداسیون در خستگی ترمو مکانیکی بیشتر است. ثوابت مادی در آسیب خزش نیز، فقط برای خستگی کم‌چرخه دما بالا ذکر و از این آسیب در خستگی ترمو مکانیکی غیرهمفاز صرف نظر شده است.

در شکل ۹، عمر خستگی آلیاژ آلومینیوم A356.0 حاصل از نتایج تجربی و شبیه‌سازی رفتار خستگی آلیاژ ریخته‌گری فوق با استفاده از مدل شهیداوغلو، نشان داده شده است. با توجه به اینکه نتایج فوق در محدوده فاکتور  $2 \pm$  قرار دارند، دقت مناسب مدل شهیداوغلو برای آلیاژ آلومینیوم را نشان می‌دهد. خطای استاندارد مدل شهیداوغلو برای خستگی ترمو مکانیکی و کم‌چرخه دما بالا، به ترتیب برابر با ۰/۰۰۶ و ۰/۰۰۵ درصد و میانگین خطای نسبی آسیب کلی، به ترتیب برابر با ۲۱ و ۱۰ درصد می‌باشد. همان‌گونه که در شکل ۷ دیده می‌شود، خطای مدل شهیداوغلو در کرنش‌های کم (۰/۲ درصد) و در عمرهای زیاد (شکل ۸)، بیشتر می‌گردد [۴].

- [2] Neu R.W., Sehitoglu H., Thermo-mechanical Fatigue, oxidation and creep: Part I. Damage mechanisms, Metallurgical Transactions, Vol. 20A, pp. 1755-1767, 1989.
- [3] Neu R.W., Sehitoglu H., Thermo-mechanical Fatigue, oxidation and creep: Part II. Life Prediction, Metallurgical Transactions, Vol. 20A, pp. 1769-1783, 1989.
- [4] Minichmayr R., Riedler M., Winter G., Leitner H., Eichlseder W., Thermo-mechanical fatigue life assessment of aluminum components using the damage rate model of Sehitoglu, International Journal of Fatigue, Vol. 30, pp. 298-304, 2008
- [5] Halaszi C.S., Nelhiebel A., Gaier C., Dannbauer H., Determination of the material parameters for Sehitoglu's TMF life prediction model, MAGNA Powertrain, Engineering Center Steyr GmbH & Co. KG, Austria, 2007.
- [6] Amaro R.L., Antolovich S.D., Neu R.W., Staroselsky A., On thermo-mechanical fatigue in single crystal Ni-base superalloys, Procedia Engineering, Vol. 2, pp. 815-824, 2010.
- [7] Antolovich S.D., Amaro R.L., Neu R.W., Staroselsky A., On the development of physically based life prediction models in the thermo-mechanical fatigue of Ni-base superalloys, Key Engineering Materials, Vol. 465, pp. 47-54, 2011.
- [8] Kadioglu Y., Modeling of thermo-mechanical fatigue behavior in superalloys, PhD Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, USA, 1992.
- [9] Sehitoglu H., Boismier D.A., Thermo-mechanical fatigue of March-M247, Part 2: Life prediction, ASME Journal of Engineering Materials Technology, Vol. 112, pp. 80-89, 1990.
- [10] Kadioglu Y., Sehitoglu H., Modeling of thermo-mechanical fatigue damage in coated alloys. Editor: H. Sehitoglu, Thermo-mechanical fatigue behavior of materials, American Society for Testing and Materials, 1993.
- [11] Su X., Zubeck M., Lasecki J., Engler-Pinto Jr. C.C., Tang C., Sehitoglu H. and Allison J., Thermal fatigue analysis of cast aluminum cylinder heads, SAE International, Paper No. 2002-01-0657, 2002.
- [12] Fleury E., Ha J.S., Thermo-mechanical fatigue behavior of nickel base superalloy IN738LC, Part 2: Lifetime prediction, Materials Science and Engineering, Vol. 17, pp. 1087-1092, 2011.
- [13] Abu A.O., Eshati S., Laskaridis P., Singh R., Aero-engine turbine blade life assessment using the Neu/Sehitoglu damage model, International Journal of Fatigue, Vol. 61, pp. 160-169, 2014.
- [14] Mao J., Engler-Pinto C.C., Li T., Hsieh J., Su X., Effect of constitutive model on thermo-mechanical fatigue life prediction, Procedia Engineering, Vol. 133, pp. 655-668, 2015.
- [15] Julis M., Obrtlík K., Pospisilova S., Podrabsky T., Polak J., Effect of Al-Si diffusion coating on the fatigue behavior of cast Inconel 713LC at 800°C, Procedia Engineering, Vol. 2, pp. 1983-1989, 2010.
- [16] Barlas B., Massinon D., Meyer P., Cailletaud G., Guillot I., Morin G., A phenomenological model for fatigue life prediction of highly loaded cylinder heads, SAE International, Paper No. 2006-01-0542, 2006.
- [17] Kim T.W., Kang D.H., Yeom J.T., Park N.K., Continuum damage mechanism-based creep-fatigue-interacted life prediction of nickel-based superalloy at high temperature, Scripta Materialia, Vol. 57, pp. 1149-1152, 2007.
- [18] Courcier C., Maurel V., Remy L., Quilici S., Rouzou I., Phelippeau A., Interfacial damage based life model for EB-PVD thermal barrier coating, Surface and Coatings Technology, Vol. 205, pp. 3763-3773, 2011.
- [19] Zhang Y.Y., Deng H.X., Shi H.J., Yu H.C., Zhong B., Failure characteristic and life prediction for thermally cycled thermal barrier coatings, Surface and Coatings Technology, Vol. 206, pp. 2977-2985, 2012.
- [20] Gocmez T., Awarake A., Pischinger S., A new low cycle fatigue criterion for isothermal and out-of-phase thermo-mechanical loading, International Journal of Fatigue, Vol. 32, pp. 769-779, 2010.
- [21] Minichmayr R., Modeling and simulation of thermo-mechanical fatigue behavior of aluminum components, Ph.D. thesis, University of Leoben, Leoben, Austria, 2005.

## ۷- فهرست علائم

|             |                                             |
|-------------|---------------------------------------------|
| $A$         | ثابت مادی در آسیب خزش، $s^{-1}$             |
| $B$         | ثابت مادی در آسیب اکسیداسیون، $s^{-0.5}$    |
| $b$         | توان استحکام خستگی                          |
| $c$         | توان شکل پذیری خستگی                        |
| $D_0$       | ثابت مادی در سهمی گون اکسیداسیون، $\mu m/s$ |
| $E$         | مدول الاستیسیته، $GPa$                      |
| $\Delta H$  | انرژی فعالسازي خزش، $kJ/mol$                |
| $h_c$       | ثابت مادی در آسیب اکسیداسیون، $\mu m$       |
| $K$         | تنش پسا، $MPa$                              |
| $K_{p,eff}$ | سهمی گون اکسیداسیون موثر                    |
| $Q$         | انرژی فعالسازي اکسیداسیون، $kJ/mol$         |
| $m$         | ثابت ماده در آسیب خزش                       |
| $N$         | عمر خستگی، چرخه                             |
| $R$         | ثابت جهانی گازها، $J/molK$                  |
| $T$         | دما، $^{\circ}C$                            |
| $t$         | زمان، $s$                                   |
| $t_c$       | زمان یک چرخه، $s$                           |

## علائم یونانی

|                      |                                         |
|----------------------|-----------------------------------------|
| $\dot{\epsilon}$     | نرخ تغییرات کرنش                        |
| $\Delta \epsilon$    | محدوده تغییرات کرنش                     |
| $\phi^{cr}$          | فاکتور فازی آسیب خزش                    |
| $\phi^{ox}$          | فاکتور فازی آسیب اکسیداسیون             |
| $\epsilon'_f$        | ضریب شکل پذیری خستگی                    |
| $\sigma'_f$          | ضریب استحکام خستگی، $MPa$               |
| $\bar{\sigma}$       | تنش معادل، $MPa$                        |
| $\sigma_h$           | تنش هیدرواستاتیک، $MPa$                 |
| $\alpha, \beta$      | ثوابت مادی در آسیب اکسیداسیون           |
| $\alpha_1, \alpha_2$ | ثوابت مادی در آسیب خزش                  |
| $\delta_0$           | ثابت مادی در آسیب خزش، $\mu ms^{-0.75}$ |
| $\xi$                | ثابت مادی                               |

## زیرنویس

|        |            |
|--------|------------|
| $fat$  | خستگی      |
| $ox$   | اکسیداسیون |
| $cr$   | خزش        |
| $mech$ | مکانیکی    |
| $th$   | گرمایی     |

## ۸- مراجع

- [1] Azadi M., A Thermo-mechanical fatigue life prediction model for aluminum alloy with thermal barrier coating, PhD Thesis, Sharif University of Technology, Tehran, Iran, 2013.