

ارائه یک مدل جدید پیش‌بینی عمر خستگی کم‌چرخه آلیاژ منیزیم براساس روش انرژی کرنش پلاستیک تصحیح شده

محمد آزادی^{۱*}، غلامحسین فرهی^۲

* ایمیل نویسنده مسئول: m.azadi.1983@gmail.com

واژه‌های کلیدی

سرسیلندر، خستگی کم‌چرخه، مدل
پیش‌بینی عمر خستگی، آلیاژ منیزیم.

چکیده

امروزه تکنولوژی به سمت استفاده از موادی همچون آلیاژهای منیزیم، با نسبت استحکام به وزن بالا در قطعات موتوری، تمایل دارد. بطور معمول، از انواع چدن و آلیاژهای آلومینیوم در ساخت سرسیلندر و بلوک سیلندر موتورها استفاده می‌شود. اما آلیاژهای منیزیم، خواص فیزیکی و مکانیکی نزدیکی به آلیاژهای آلومینیوم داشته و تا حدود ۴۰ درصد وزن را کاهش می‌دهند. در این مقاله، یک مدل جدید پیش‌بینی عمر خستگی کم‌چرخه برای آلیاژ منیزیم، بر اساس روش انرژی کرنش ارائه شده و به جهت تدوین آن، از نتایج آزمون خستگی کم‌چرخه روی نمونه‌های منیزیمی استفاده شده است. این مدل در مقایسه با دیگر تئوریهای موجود، از پارامترهای مادی کمتری برخوردار است و دارای دقت مناسب‌تری می‌باشد؛ چراکه در روش انرژی، از رابطه عمر-کار پلاستیک که معادل با ضرب همزمان عددهای تنش و کرنش پلاستیک می‌باشد، استفاده می‌شود. با توجه به خواص نرم شوندگی آلیاژهای منیزیم و آلومینیوم، انرژی کرنش پلاستیک می‌تواند انتخاب مناسبی باشد؛ چراکه در چرخه بارگذاری خستگی، عدد حاصل ضرب تنش در کرنش پلاستیک می‌تواند ثابت بماند. همچنین، اثر تنش میانگین بصورت یک ضریب تصحیح در مدل پیش‌بینی عمر خستگی کم‌چرخه اعمال شده است. نتایج حاصل از مدل ارائه شده، تطابق خوبی را با نتایج آزمون نشان می‌دهد.

۱- دکتری، کارگروه خستگی و سایش در مواد، شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران‌خودرو (ایپکو)، تهران، ایران

۲- استاد، آزمایشگاه تخمین و بهبود مواد، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

۱- مقدمه

سرسیلندر و بلوک سیلندر، از قطعات حساس در موتور بوده که به دلیل نحوه کارکرد آنها، انتخاب مواد برای این گونه قطعات از اهمیت خاصی برخوردار است. مواد انتخابی باید از نظر خواص مکانیکی و حرارتی، به میزان کافی استحکام داشته باشند تا بتوانند تنش‌های متناوب ناشی از فشار و حرارت گاز را تحمل نمایند. در مقابل، افزایش هزینه‌های سرویس و نگهداری و همچنین هزینه سوخت، نظر طراحان موتور را به سمت موتورهای سبک‌تر جلب می‌کند. لذا امروزه تکنولوژی به سمت استفاده از مواد سبک‌تری همچون آلیاژهای منیزیم، با نسبت استحکام به وزن بالا در قطعات موتوری، تمایل دارد. اما در حال حاضر، برای ساخترسیلندر و بلوک سیلندر موتورها، از انواع چدن و آلیاژهای آلومینیوم استفاده می‌شود. آلیاژهای منیزیم، خواص مواد (فیزیکی و مکانیکی) نزدیکی به آلیاژهای آلومینیوم داشته و البته تا حدود ۴۰ درصد وزن را کاهش می‌دهند و بر این اساس، مورد توجه هستند [۱-۳]. بنابراین، بررسی رفتار خستگی این ماده جایگزین برای ساخت قطعات موتوری (بخصوص دررسیلندر و بلوک سیلندر)، دارای اهمیت است.

در زمینه تحلیل و آزمون خستگی آلیاژهای منیزیم، مقالات متعددی وجود دارد که بیشتر در سالهای اخیر ارائه شده‌اند. آیسنمیر^۱ و همکارانش [۴]، رفتار سیکلی آلیاژ منیزیم (AZ91) را در دماهای محیط و ۱۳۰ درجه سانتیگراد، بررسی کرده‌اند. مدل‌های پیش‌بینی عمر ارائه شده برای این آلیاژ، براساس مدل‌های کلاسیک مانسون-کافین و باسکوئین^۲ است. پکگولریوز و کیا^۳ [۵]، رفتار خزش آلیاژهای منیزیم مورد استفاده در قطعات موتوری را مطالعه کرده‌اند. رفتار

خستگی کم‌چرخه (در دمای محیط) آلیاژ منیزیم (AZ31)، توسط هاسگاوا^۴ و همکارانش [۶]، بر اساس فرمول مانسون-کافین، استخراج شده است. در مدل آنها، به جهت در نظر گرفتن اثر تنش میانگین، یک رابطه ساده بر اساس تنش و مدول الاستیک ماده، به رابطه مانسون-کافین اضافه شده است.

ژو^۵ و همکارانش [۷]، رفتار ریزساختار آلیاژ منیزیم (AE44) را بر اساس مدل‌های مکانیک شکست پیش‌بینی کرده‌اند. بگام^۶ و همکارانش [۸]، خواص خستگی کم‌چرخه آلیاژ منیزیم (AZ31) را طبق رابطه ساده کرنش پلاستیک-عمر و رابطه مانسون-کافین بررسی کرده‌اند. در این تحقیق، تغییرات مدول الاستیک ماده در زمان‌های بارگذاری و باربرداری، برحسب عمر اندازه‌گیری شده است. آنها در مقاله دیگری [۹]، اثر نرخ کرنش و دامنه آن را بر روی آلیاژ فوق، مطالعه کرده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش نرخ کرنش، عمر خستگی ماده زیاد می‌شود. مشخصات خستگی کم‌چرخه آلیاژ منیزیم (AZ31)، بر اساس روش انرژی کرنش، توسط پارک^۷ و همکارانش [۱۰]، تعیین شده است. در این مدل، از رابطه ساده انرژی پلاستیک-عمر استفاده شده که نتایج آن در محدوده خطی با ضریب ۲ (محدوده ± 2 برابر عمر) از نتایج آزمون خستگی قرار می‌گیرد. خواص خستگی کم‌چرخه و رفتار تغییرشکل سیکلی آلیاژ منیزیم (AZ31) توسط کوون^۸ و همکارانش [۱۱]، بر اساس مدل مانسون-کافین استخراج شده است. لی^۹ و همکارانش [۱۲]، اثر دامنه کرنش بر رفتار خستگی (کشش-فشار) آلیاژ منیزیم (AZ61A) را مطالعه کرده‌اند. مدل ارائه شده در این تحقیق، شامل تصحیح رابطه کرنش-عمر می‌باشد. آنها در مقاله دیگری [۱۳]، رفتار

4- Hasegawa

5- Xue

6- Begum

7- Park

8- Kwon

9- Li

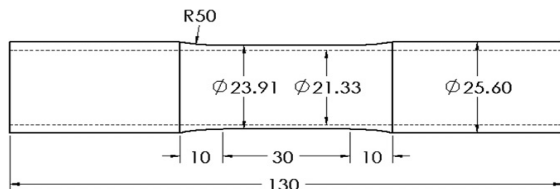
1- Eisenmeier

2- Mandon-Caffin and Basquin

3- Pekguleryuz and Kaya

۲- آزمون خستگی کمپرخه

ماده مورد بررسی شامل آلیاژ منیزیم (AZ61A) بوده که ترکیب شیمیایی آن شامل ۶/۵ درصد آلومینیوم، ۰/۰۵ درصد مس، ۰/۱ درصد سیلیسیم و مابقی شامل عنصر منیزیم می باشد [۱۲]. آزمون خستگی کمپرخه روی نمونه استاندارد، نشان داده شده در شکل (۲) و تحت بارهای کششی- فشاری بصورت کاملاً عکس شونده ($R_\sigma = -1$) و در دمای محیط انجام شده است. شایان ذکر است که نسبت R در خستگی کمپرخه عبارت از کرنش بیشینه به کرنش کمینه می باشد. نتایج عمر نمونه ها (معادل با کاهش ۵ درصدی تنش بیشینه)، در جدول (۱) موجود می باشد.



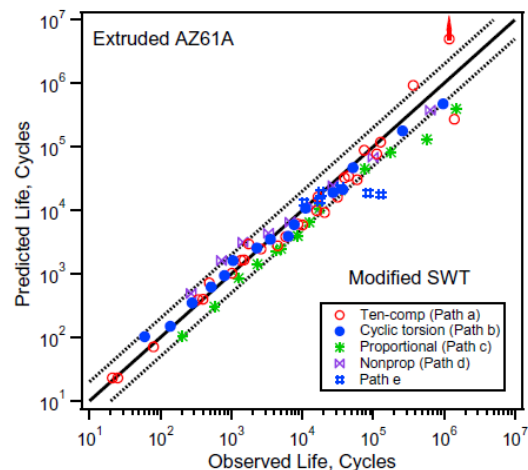
شکل (۲) ابعاد نمونه استاندارد آزمون خستگی کمپرخه [۱۳]
(ابعاد ذکر شده بر حسب میلیمتر هستند.)

جدول (۱) نتایج آزمون خستگی کمپرخه کشش- فشار [۱۳]

عمر خستگی (چرخه)	تنش میانگین (مگاپاسکال)	دامنه تنش (مگاپاسکال)	دامنه کرنش (درصد)
۴۰۰	۳۴/۵	۱۹۲/۲	۱/۰۰
۱۰۲۰	۳۳/۶	۱۷۸/۵	۰/۷۰
۱۵۲۰	۳۱/۶	۱۶۹/۱	۰/۶۰
۲۶۲۰	۲۷/۹	۱۶۳/۹	۰/۵۲
۴۵۰۰	۲۲/۲	۱۶۱/۹	۰/۵۰
۵۸۶۰	۱۷/۸	۱۵۵/۰	۰/۴۵
۸۷۴۰	۷/۸	۱۴۲/۸	۰/۴۰
۱۶۰۰۰	۲/۸	۱۳۰/۱	۰/۳۵
۱۶۷۵۰	۴/۰	۱۱۵/۶	۰/۳۰
۳۹۶۰۰	۳/۱	۹۸/۳	۰/۲۵

ضمناً اعداد دامنه تنش و کرنش گزارش شده، مربوط به نیم-عمر نمونه می باشند. مدول الاستیک ماده، ۴۳/۴ گیگاپاسکال، استحکام نهایی، ۲۷۹ مگاپاسکال و درصد تغییر طول نیز، ۸/۹۴ درصد است [۱۳].

خستگی چندمحوره آلیاژ فوق را بررسی کرده و از رابطه فاطمی- سوشی^۱ و رابطه اصلاح شده اسمیت- واتسون- تاپر (SWT)^۲ استفاده نموده اند. نتایج مدل های پیش بینی عمر خستگی در این دو مقاله، دارای دقت بالایی نمی باشند. همانگونه که در شکل (۱) قابل مشاهده است، به جهت مقایسه نتایج مدل و نتایج آزمون خستگی، از خطی با فاکتور ۲ (محدوده مثبت و منفی دو برابر عمر) بهره گرفته شده که همچنان برخی از نتایج، خارج از محدوده فوق هستند. در این مقاله، با استفاده از نتایج آزمون های خستگی آلیاژ منیزیم (AZ61A) دو مقاله آخر [۱۲-۱۳]، به جهت ارائه یک مدل جدید پیش بینی عمر خستگی بر اساس روش انرژی استفاده شده است.



شکل (۱) نتایج مدلسازی رفتار خستگی آلیاژ منیزیم [۱۳]

در مدل های ارائه شده تاکنون، اکثر مقالات از روش های کلاسیک بهره جسته اند که در این روش ها، اصل کار مدل بر پایه کرنش است. حال آنکه روش انرژی، هر دو پارامتر کرنش و تنش را مدنظر قرار می دهد. این گونه مدل ها، در موادی که دارای خواص نرم شوندگی در دماهای بالاتر از دمای محیط هستند، مناسب تر است [۱۴]. ضمناً با استفاده از روابطی، اثر تنش میانگین بر عمر خستگی کمپرخه آلیاژ منیزیم، بررسی شده است.

دارد که شامل پارامترهای ماده و تغییرات آنها در برابر درجه حرارت است.

برای اولین بار، اسکلتون^۲، روش انرژی را برای نشان دادن رابطه بین انرژی تلف شده در هر چرخه و تعداد چرخه‌ها تا زمان شکست، پیشنهاد داده است. معیارهای انرژی، می‌توانند مشکلات فوق را پشت سر گذاشته و با شرایط بارگذاری چندمحوره و غیرهم‌دما (دمای متغیر)، با استفاده از روش انتگرال‌گیری روی مسیر و داشتن پارامترهای مستقل از دما، سازگار شوند. ضمن اینکه در روش انرژی، اثر زمان، دما و نرخ کرنش، با دقت خوبی قابل مشاهده است [۱۴].

بطور کلی، آلیاژهای منیزیم و آلومینیوم دارای خواص نرم شوندگی در دماهای بالا می‌باشند. به عبارت دیگر، در دامنه ثابتی از کرنش، دامنه تنش با افزایش دامنه کرنش پلاستیک، کاهش می‌یابد. بدین ترتیب، انرژی کرنش پلاستیک می‌تواند انتخاب مناسبی باشد؛ چراکه در چرخه بارگذاری ترمومکانیکی، عدد حاصل ضرب تنش در کرنش پلاستیک می‌تواند ثابت بماند. این پارامتر، می‌تواند اثر دما، زمان نگهداری در یک دمای مشخص، کرنش میانگین، پیرسازی قبل و حین آزمون ترمومکانیکی را توصیف نماید [۱۴]. نکته منفی دیگر در مورد اکثر مدلها (در مقایسه با روش انرژی)، مربوط به ثابتهای موادی زیاد آنها می‌باشد و این درحالی است که براساس روش انرژی، فقط چند ثابت مادی وجود دارد که با انجام آزمونهای خستگی کم‌چرخه هم‌دما، مشخص می‌گردند. به عنوان مثال، مدل آسیب سیتقولو، شامل خستگی مکانیکی، اکسیداسیون و خزش می‌باشد. آسیب خستگی مکانیکی، با استفاده از روشهای کلاسیک و دامنه کرنش، مدل‌سازی شده است. فرآیند اکسیداسیون، به عنوان تابعی از دامنه کرنش، نرخ کرنش، فاز کرنش - دما، و سینتیک اکسیداسیون در نظر گرفته شده است. آسیب خزش

همچنین، جدول (۱) شامل تمامی نتایج موجود در مرجع [۱۳] نمی‌باشد. به عبارت دیگر، در این پژوهش، داده‌های مربوط به آزمون‌های خستگی تا عدد عمر ۳۹۶۰۰ چرخه آلیاژ منیزیم در نظر گرفته شده است تا محدوده عمر خستگی کم‌چرخه ماده، رعایت شده باشد.

۳- مدل‌های پیش‌بینی عمر

بطور کلی، رویکردهای کلاسیک می‌تواند در فرم کلی رابطه (۱) بیان شود [۱۴].

$$\Phi(\varepsilon, \varepsilon_p, \sigma, \dots) = \Psi(N_f, \alpha, \beta, \dots) \quad (1)$$

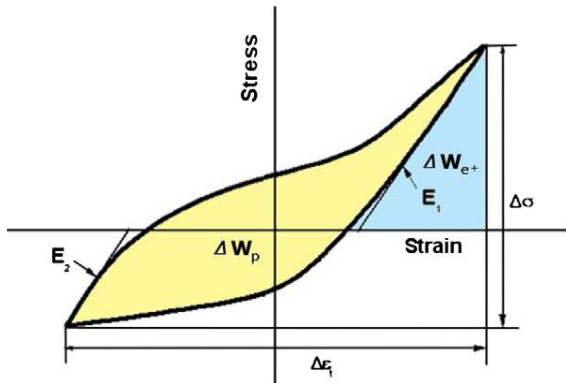
که سمت راست فرمول فوق، شامل عمر و خواص مادی و سمت چپ، شامل شرایط بارگذاری (تنش و کرنش) است. یکی از این روشهای کلاسیک، معیار مانسون - کافین است که به توصیف یک رابطه خطی بین دامنه کرنش پلاستیک و عمر خستگی، در مقیاس لگاریتمی می‌پردازد، بسیار ساده است. رابطه مانسون - کافین - باسکوئین، روش کرنش کل (کرنش الاستیک و پلاستیک) است [۱۵].

$$\varepsilon_{a,p} = \varepsilon'_f (2N_f)^c \quad (2)$$

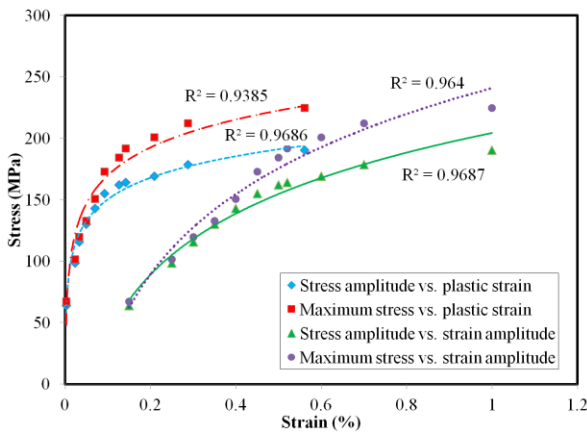
$$\varepsilon_{a,t} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + \varepsilon'_f (2N_f)^c \quad (3)$$

تأثیر تنش متوسط روی عمر خستگی، توسط مورو^۱ و روش اسمیت - واتسون - تاپر (SWT)، در نظر گرفته شده است [۱۵]. این روشهای کلاسیک مبتنی بر کرنش، برای حالت بارگذاری تک‌محوره و هم‌دما (دمای ثابت)، بیان شده‌اند. قطعات مهندسی از قبیل سرسیلندر موتور، در معرض بارهای ترمومکانیکی چندمحوره هستند و معیارهای خستگی باید سازگار با این مشاهدات واقعی باشند. در همین راستا، فاطمی و سوشی، از معیار صفحه بحرانی استفاده نموده‌اند. با فرض مرتفع شدن این مسئله (چندمحوره)، مشکل دیگری وجود

کمچرخه (حداکثر 5×10^4 چرخه) برای آلیاژ منیزیم (AZ61A) حفظ گردد.



شکل (۳) شماتیک منحنی تنش- کرنش در آزمون خستگی کمچرخه [۱۰]



شکل (۴) تنش برحسب کرنش پلاستیک محاسبه شده از رابطه (۶)

بهترین روش به جهت محاسبه انرژی کرنش پلاستیک، انتگرال گیری از نمودار تنش- کرنش (حلقه هیستریزیس)، است که البته زمان بر بوده و کاربرد مهندسی ندارد. اما، محاسبه مقدار انرژی پلاستیک در هر چرخه، با هر روشی که اندازه گیری شود، تابعی از دامنه تغییرات تنش و کرنش خواهد بود. به عبارت دیگر، می توان مقدار انرژی پلاستیک را ضرب محدوده تغییرات تنش و کرنش با در نظر گرفتن یک ثابت عددی (C_n) دانست [۲۰].

$$\Delta W_p = A_1 (2N_f)^{-B_0} = C_n \Delta \sigma \Delta \epsilon_p \quad (7)$$

$$\Delta \sigma \Delta \epsilon_p = A_2 (2N_f)^{-B_0}, A_2 = \frac{A_1}{C_n} \quad (8)$$

نیز براساس تنش، دما، فاز کرنش- دما و زمان می باشد. اشکال اصلی این مدل، آن است که نیاز به آزمایشهای گسترده، برای شناسایی پارامترهای آن (حدود ۲۰ پارامتر مادی) دارد [۱۴].

۴- مدل های انرژی کرنش

بطور کلی، چگالی انرژی (در واحد حجم) هیستریزیس کرنشی کل^۱ در هر چرخه از عمر خستگی ماده، شامل دو قسمت الاستیک و پلاستیک، همانند شکل (۳) می باشد. چند روش به جهت محاسبه چگالی انرژی پلاستیک هدر رفته^۲ وجود دارد که از جمله آنها، انتگرال گیری عددی [۱۴] و یا تحلیلی و بصورت فرمولی (با استفاده از مدل میس^۳ برای موادی که رفتار سیکیلی متقارنی دارند) [۱۶] است. در برخی از مراجع [۱۷-۱۹] نیز، کرنش و انرژی پلاستیک، به فرم روابط (۴) تا (۶) محاسبه می گردد.

$$\Delta W_t = \Delta W_e + \Delta W_p \quad (4)$$

$$\Delta W_p = \int \sigma d\epsilon \approx \Delta \sigma \Delta \epsilon_p \quad (5)$$

$$\Delta \epsilon_p = \Delta \epsilon_t - \frac{\Delta \sigma}{E} \quad (6)$$

تنش بیشینه و میانگین تنش بدست آمده از آزمون خستگی کمچرخه، برحسب دامنه کرنش و همچنین مقادیر کرنش پلاستیک که براساس رابطه (۶) محاسبه شده، در شکل (۴) نشان داده شده است. طبق داده های آزمون خستگی موجود در مرجع [۱۳] برای آلیاژ منیزیم، مقدار کرنش پلاستیک در دامنه کرنش ۰/۱۵ درصد، بسیار کم بوده و برابر با ۰/۰۰۲ درصد است. به همین دلیل، عمر آلیاژ منیزیم وارد محدوده عمر خستگی پرچرخه (برابر با ۳۷۰۰۰۰ چرخه) شده است. لذا از داده تجربی فوق در تحلیل های خستگی این پژوهش، صرف نظر شده است تا همچنان، محدوده عمر خستگی

1- Total hysteresis strain energy density (per unit volume)
2- Dissipated strain energy density (per unit volume)
3- Mase's law

با رسم معادله فوق، می‌توان هر یک از ضرایب ثابت ماده را طبق رابطه (۱۴) محاسبه نمود.

$$B_u = \frac{-1}{x}, A_u = 10^{\frac{-y}{x}} \quad (14)$$

پس از محاسبه ضرایب مربوط به ماده، باید ضرایب تاثیر دمای بیشینه (MT_EF)^۱ و ضریب تصحیح تنش میانگین (MS_CF)^۲، محاسبه گردند. با توجه به اینکه در این مقاله، به نتایج آزمون خستگی کم‌چرخه در دمای محیط پرداخته می‌شود، لذا ضریب تاثیر دمای بیشینه، صفر خواهد بود. ضریب تصحیح تنش میانگین، به فرم روابط (۱۵) تا (۱۷) معرفی شده و براساس تنش بیشینه و استحکام نهایی ماده، تعریف شده‌اند که رابطه (۱۵)، همان مدل انرژی ارائه شده در مرجع [۱۴] بوده و روابط (۱۶) و (۱۷)، پیشنهادی این مقاله می‌باشند. پارامتر m_i نیز، یک عدد ثابت است.

$$f_\sigma \equiv MS_CF_1 = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_u - m_1 \sigma_m} \quad (15)$$

$$f_\sigma \equiv MS_CF_2 = 1 + m_2 \frac{\sigma_m}{\sigma_u} \quad (16)$$

$$f_\sigma \equiv MS_CF_3 = \left(1 + \frac{\sigma_m}{\sigma_u}\right)^{m_3} \quad (17)$$

نکته قابل توجه این است که در رابطه (۱۵)، اگر تنش میانگین صفر باشد، مقدار ضریب تصحیح تنش صفر نشده و این مطلب یکی از ایرادهای مدل ارائه شده در مرجع [۱۴] است. در این رابطه، با توجه به اینکه تنش بیشینه از مجموع تنش میانگین و دامنه تنش محاسبه می‌شود، ضریب تصحیح تنش فقط تابعی از تنش میانگین خواهد شد.

به منظور محاسبه پارامترهای m_i ، رابطه ضریب تعیین (CDR)^۳، معادل با پارامتر R^2 در مرجع [۱۴]، به فرم رابطه (۱۸) بوده و عبارت از توان دوم تفاضل عمر محاسبه شده از عمر بدست آمده در آزمونهای خستگی، تقسیم بر تفاضل

بر این اساس، فرقی نمی‌کند که بطور کاملاً دقیق انرژی محاسبه شود و یا حاصلضرب محدوده تغییرات تنش و کرنش را برای آن در نظر گرفت. تنها مشکل استفاده از روش انرژی پلاستیک این است که وقتی کرنش پلاستیک صفر باشد، عمر بینهایت محاسبه می‌شود. البته باید دقت کرد که در این مقاله، مدل انرژی برای خستگی کم‌چرخه ارائه می‌شود که هرچند بصورت نقطه‌ای، اما بهر حال کرنشهای پلاستیک ظاهر خواهند شد.

در این مقاله، یک مدل کلی به جهت پیش‌بینی عمر خستگی کم‌چرخه در دماهای مختلف، بر اساس روش انرژی، به فرم رابطه (۹) ارائه شده که دارای ترمهای ضریب تصحیح تنش و ضریب تاثیر دما می‌باشد.

$$N_f = A_u \left(\frac{\Delta W_p}{W_{u,p}} (f_\sigma + f_T) \right)^{-B_u} \quad (9)$$

که در آن، A_u و B_u ثوابت مادی و هر دو مثبت می‌باشند. پارامتر $W_{u,p}$ ، از خواص مکانیکی ماده بوده و میزان انرژی پلاستیک در آزمون کشش ساده (مونوتونیک) است که برای آلیاژ منیزیم به میزان ۱۶/۷ مگاپاسکال محاسبه شده است [۱۳]. بنابراین، هر چه انرژی پلاستیک بیشتری هدر رود (به عبارت دیگر، منحنی هیستریزیس بزرگتری ایجاد شود)، عمر خستگی کمتر خواهد شد. لذا مدل پیش‌بینی عمر خستگی به فرم رابطه (۱۰) ساده می‌گردد.

$$\Delta W_p = \frac{W_{u,p}}{f_\sigma + f_T} \left(\frac{N_f}{A_u} \right)^{\frac{-1}{B_u}} \quad (10)$$

به جهت محاسبه ضرایب ثابت ماده در مقیاس لگاریتمی، رابطه (۱۰)، به فرم روابط (۱۱) تا (۱۳) تبدیل می‌شود.

$$Y = y + xX \quad (11)$$

$$Y = \log \left(\frac{\Delta W_p}{W_{u,p}} (f_\sigma + f_T) \right), X = \log(N_f) \quad (12)$$

$$y = \frac{1}{B_u} \log(A_u), x = \frac{-1}{B_u} \quad (13)$$

1- Maximum temperature effect factor
2- Mean stress correction factor
3- Coefficient of determination (R2)

$$Y = y + xX \quad (25)$$

$$Y = \log(P_j), X = \log(N_f) \quad (26)$$

$$y = \log(A), x = B \quad (27)$$

با رسم معادله فوق، می‌توان هر یک از ضرایب ثابت ماده را طبق رابطه (۲۸) محاسبه نمود. عمر خستگی نیز از رابطه (۲۹) بدست می‌آید.

$$B = x, A = 10^y \quad (28)$$

$$N_f = \left(\frac{P_j}{A} \right)^{\frac{1}{B}} \quad (29)$$

۵- مقایسه دو ماده چدن و منیزیم

به جهت مقایسه ضرایب تصحیح مدل ارائه شده، از دو ماده چدنی (GJL-250) و منیزیمی (AZ61A)، استفاده شده که تنش استحکام نهایی آنها در دمای محیط، به ترتیب، برابر با ۲۵۰ و ۲۷۹ مگاپاسکال بوده و مدول یانگ نیز به ترتیب، برابر با ۱۳۰ و ۴۳/۳ گیگاپاسکال می‌باشد [۱۳-۱۴]. در شکل (۵)، ضریب تصحیح تنش برای دو ماده فوق، با در نظر گرفتن مقدار ۲/۰۱ برای پارامتر m_1 [۱۴]، مقایسه شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، مقدار ضریب برای ماده چدنی (تا تنش میانگین ۱۰۰ مگاپاسکال)، بیش از ماده منیزیمی بوده و زمانی که تنش میانگین صفر است، ضریب تصحیح تنش مرجع [۱۴]، برابر با یک نمی‌باشد. ضمناً با افزایش تنش میانگین، اختلاف بین ضریب تصحیح تنش چدن و منیزیم بیشتر شده و نرخ رشد ضریب تصحیح تنش چدن افزایش می‌یابد. همچنین، در برخی از نقاط (تنش میانگین ۱۲۵ مگاپاسکال)، ضریب تصحیح تنش برابر با بینهایت می‌شود. عملاً تابع ارائه شده دارای یک نقطه ناپیوستگی است و این مسئله دومین ایراد مدل فوق می‌باشد.

ضریب تصحیح تنش برای ماده منیزیمی و به ازای مقادیر مختلف m_1 در شکل (۶) نشان داده شده است. به ازای مقدار صفر برای پارامتر m_1 ضریب تصحیح تنش برابر با مقدار ثابتی می‌گردد. با افزایش مقدار m_1 نرخ رشد ضریب تصحیح نیز

توان دوم عمرهای بدست آمده از آزمون و میانگین آنها، تعریف شده است. پارامتر k ، تعداد آزمونهای خستگی است.

$$CDR = 1 - \frac{\sum (N_{f,cal,i} - N_{f,exp,j})^2}{\sum (N_{f,exp,j})^2 - \frac{1}{k} (\sum N_{f,exp,j})^2} \quad (18)$$

هر چه این پارامتر به عدد یک نزدیک‌تر باشد، مدل دارای جوابهای بهتری است. پارامتر R^2 در مرجع [۱۴]، به منظور محاسبه پارامتر m_i در ضریب تصحیح تنش، مورد استفاده قرار گرفته است. به جهت مقایسه بهتر مدل‌های پیش‌بینی عمر خستگی، پارامترهای دیگری همچون میانگین و بیشینه درصد خطای نسبی (MOE و AOE)^۱، برای نتایج آزمونهای خستگی تعریف شده‌اند که به فرم روابط (۱۹) تا (۲۱) محاسبه می‌شوند.

$$E_i = \frac{|N_{f,exp,j} - N_{f,cal,i}|}{N_{f,exp,j}} \times 100 \quad (19)$$

$$MOE = \max \{E_i\} : i = 1, \dots, k \quad (20)$$

$$AOE = \frac{1}{k} \sum E_i : i = 1, \dots, k \quad (21)$$

هر چه مقدار پارامترهای فوق کمتر باشند، نشان دهنده دقت بهتر مدل خواهند بود. به جهت مقایسه نتایج پیش‌بینی عمر به روش انرژی با روشهای دیگر، از روابط (۲۲) تا (۲۴) استفاده شده است.

$$P_{SWT} = \sigma_{\max} \varepsilon_{a,t} = A(N_f)^B \quad (22)$$

$$P_{M\&C} = \varepsilon_{a,p} = A(N_f)^B \quad (23)$$

$$P_{OST} = \sigma_{\max} \Delta \varepsilon_p = A(N_f)^B \quad (24)$$

روابط (۲۲) تا (۲۴)، به ترتیب به فرمول اسمیت-واتسون-تاپر (SWT)، فرمول مانسون-کافین و فرمول استرجن (OST)^۲ معروف هستند. برای محاسبه ضرایب ثابت ماده در مقیاس لگاریتمی، روابط (۲۲) تا (۲۴)، به فرم روابط (۲۵) تا (۲۷) تبدیل می‌شوند.

1- Maximum of errors and average of errors
2- Osteregen

روی ضریب تصحیح تنش بررسی شده است. با افزایش مقدار تنش بیشینه، ضریب تصحیح تنش نیز افزایش می‌یابد و با افزایش این ضریب، چون در عدد انرژی پلاستیک ضرب می‌شود، عمر خستگی کاهش می‌یابد.

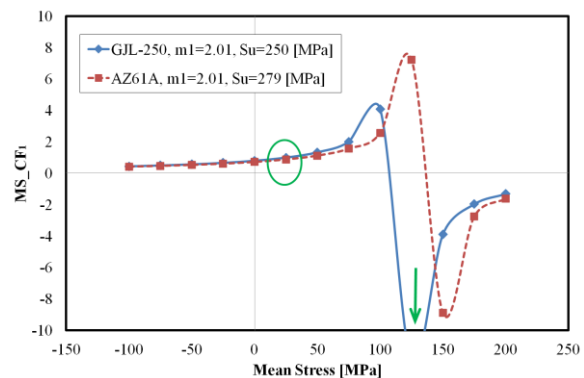
در ادامه، به بررسی مدل‌های پیشنهادی برای ضریب تصحیح تنش میانگین پرداخته شده است. در مدل‌های پیشنهادی، اثر تنش بیشینه لحاظ نشده است؛ چراکه اثر آن در کار پلاستیک، بصورت مستقیم وارد می‌شود. ضمناً، مقادیر ضرایب تصحیح تنش، در تنش میانگین صفر، طبق شکل‌های (۸) و (۹)، برابر با عدد یک است. در مدل پیشنهادی اول نشان داده شده در شکل (۸)، ضریب تصحیح تنش با رابطه‌ای خطی به تنش میانگین وابسته بوده و در مدل پیشنهادی دوم نشان داده شده در شکل (۹)، تابعی غیرخطی بین ضریب تصحیح تنش و تنش میانگین در نظر گرفته شده و با افزایش تنش میانگین کششی، نرخ رشد ضریب، افزایش یافته و عمر خستگی، کاهش می‌یابد. همچنین، با افزایش تنش میانگین فشاری، نرخ رشد ضریب، کاهش یافته و عمر خستگی نیز، افزایش می‌یابد.

۶- مدل پیش‌بینی عمر آلیاژ منیزیم

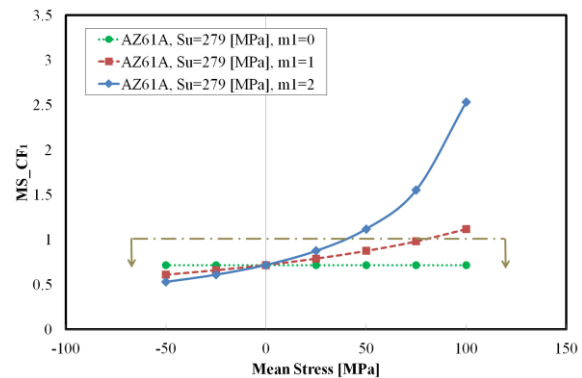
با استفاده از نتایج موجود برای آلیاژ منیزیم (AZ61A) در جدول (۱)، می‌توان تمامی مراحل ذکر شده قبلی را اجرا نمود. بر این اساس و با توجه به رابطه CDR، ابتدا مقادیر پارامتر m_i مطابق شکل (۱۰) محاسبه شده است. با بیشینه کردن مقدار CDR، مقادیر m_1 ، m_2 و m_3 به ترتیب، برابر با ۶/۷، ۱۱/۶ و ۹/۰ محاسبه شده‌اند.

در ادامه، پارامترهای موادی برای ماده فوق در مدل‌های مختلف پیش‌بینی عمر خستگی، محاسبه گردیده که در شکل (۹) نشان داده شده است.

افزایش می‌یابد. بر اساس مدل ارائه شده، با افزایش ضریب تصحیح تنش، به این دلیل که در کار پلاستیک ضرب می‌شود، عمر خستگی کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، ضریب تصحیح تنش بیش از یک، باعث کاهش عمر خستگی شده و ضریب تصحیح تنش کمتر از یک نیز، باعث افزایش عمر خستگی می‌شود. به علاوه، واضح است که تنش میانگین کششی و تنش میانگین فشاری، به ترتیب، باعث کاهش و افزایش عمر خستگی می‌شوند.



شکل (۵) مقایسه ضریب تصحیح تنش برای دو ماده چدنی و منیزیمی

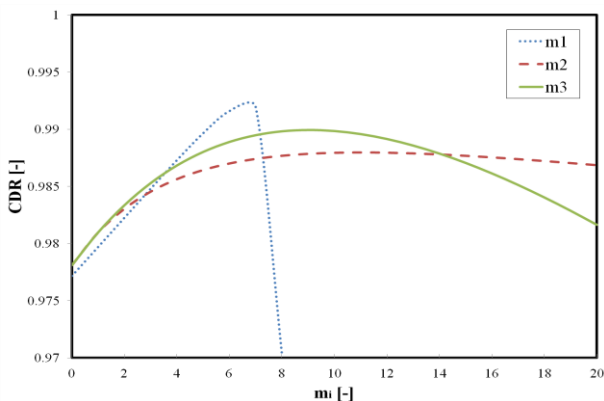


شکل (۶) مقایسه ضریب تصحیح تنش برای ماده منیزیمی، به ازای مقادیر مختلف m_1

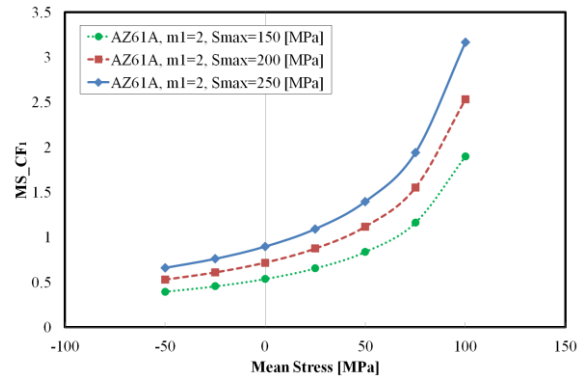
همانگونه که در شکل (۶) مشخص است، به ازای مقادیر صفر و ۱ برای m_1 در حالت تنش‌های میانگین کمتر از ۷۵ مگاپاسکال، ضریب تصحیح تنش کمتر از یک بوده و تنش میانگین (هر دو نوع فشاری و کششی)، باعث افزایش عمر خستگی می‌شود. همچنین، به ازای مقدار ۲ برای m_1 تنش میانگین کششی تا حدود ۵۰ مگاپاسکال باعث افزایش عمر و بیش از آن، باعث کاهش عمر خستگی می‌گردد. در شکل (۷) نیز، اثر تنش بیشینه

مدلهای پیشنهادی، عمر خستگی نمونه آزمون بدست آمده و با نتایج آزمونهای واقعی خستگی کمپرخه، مقایسه شده که در شکل (۱۲) نشان داده شده است. نتایج بدست آمده از مدل‌های مختلف بین خطوط $\pm 1/46$ (برای ۹۰ درصد آزمونهای خستگی) قرار گرفته‌اند که در مقایسه با نتایج مرجع [۱۳]، دقت بهتری دارند. قابل ذکر است که این خطوط در مرجع [۱۳]، با فاکتور ± 2 مشخص شده است (به شکل (۱) مراجعه شود).

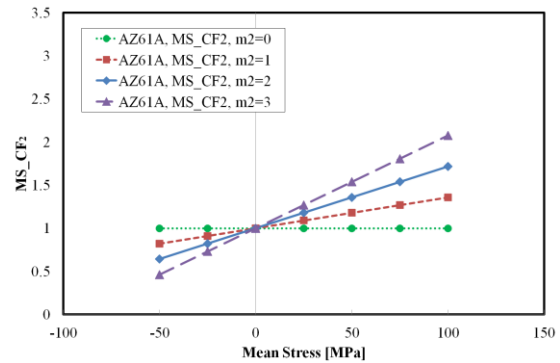
مقادیر عمر خستگی محاسبه شده با مدل‌های مختلف (شامل روش انرژی بدون ضریب تصحیح، سه روش انرژی با سه ضریب تصحیح متفاوت، مدل اسمیت-واتسون-تاپر، مدل مانسون-کافین و مدل استرجن)، در جداول (۲)، (۳) و (۴) آمده است. جواب مدل‌های پیش‌بینی عمر خستگی بر اساس روش انرژی و با ضریب تصحیح تنش میانگین، به مراتب بهتر از روشهای کلاسیک (مدل اسمیت-واتسون-تاپر، مدل مانسون-کافین و مدل استرجن) است. البته بیشترین خطاها (میانگین و بیشینه خطاها) در عمر پیش‌بینی شده از روش انرژی (بدون ضریب تصحیح تنش میانگین) است. این مطلب لزوم استفاده از ضریب تصحیح تنش میانگین را در روش انرژی مشخص می‌نماید.



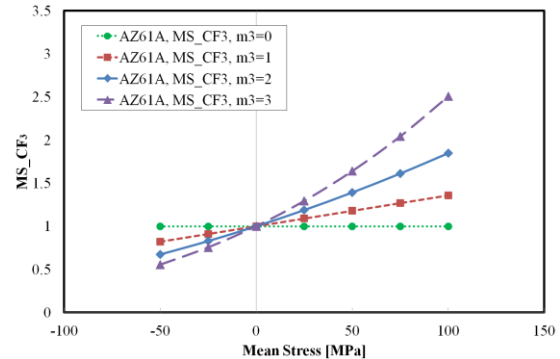
شکل (۱۰) تغییرات پارامتر CDR برحسب پارامتر m_i در مدل‌های مختلف پیش‌بینی عمر بر اساس روش انرژی



شکل (۷) مقایسه ضریب تصحیح تنش برای ماده منیزیمی، به ازای مقادیر مختلف تنش بیشینه



شکل (۸) مدل پیشنهادی اول برای ضریب تصحیح تنش ماده منیزیمی



شکل (۹) مدل پیشنهادی دوم برای ضریب تصحیح تنش ماده منیزیمی

در شکل (۱۱)، پارامتر R^2 همان معیار CDR است که میزان نزدیک بودن داده‌های آزمون به خط منطبق شده بر آنها را مشخص می‌کند. در بهترین حالت، برابر با ۱ بوده و همانگونه که در شکل (۱۱) مشخص است، مقدار آن برای مدل انرژی بدون ضریب تصحیح تنش برابر با $0/978$ و کمتر از مدل انرژی با ضریب تصحیح تنش است و این مسئله، اهمیت و لزوم استفاده از ضریب تصحیح تنش در همگن‌سازی نتایج انرژی کرنش پلاستیک را نشان می‌دهد. سپس با استفاده از

جدول (۳) مقایسه نتایج آزمون خستگی کم‌چرخه و مدل‌های پیش‌بینی

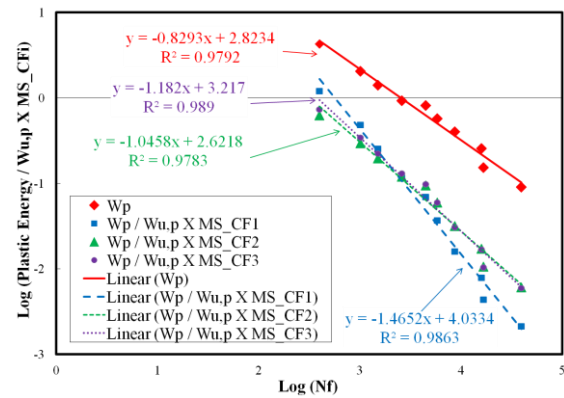
عمر خستگی ماده منیزیمی (مدل ارائه شده اول و دوم)

عمر خستگی تجربی (چرخه)	انرژی پلاستیک با ضریب MS_CF ₂ (m ₂ =11.6)		انرژی پلاستیک با ضریب MS_CF ₁ (m ₁ =6.7)	
	خطای نسبی شده (چرخه) (درصد)	عمر محاسبه شده (چرخه)	خطای نسبی شده (چرخه) (درصد)	عمر محاسبه شده (چرخه)
۴۰۰	۳۶	۵۴۳	۲۰	۴۸۱
۱۰۲۰	۶	۱۰۷۷	۱۱	۹۰۵
۱۵۲۰	۳	۱۵۶۵	۶	۱۴۲۲
۲۶۲۰	۶	۲۴۵۹	۶	۲۴۵۳
۴۵۰۰	۳۲	۳۰۷۵	۲۲	۳۵۱۳
۵۸۶۰	۲۰	۴۶۸۲	۷	۵۴۳۲
۸۷۴۰	۵	۸۳۱۴	۱۲	۹۷۵۵
۱۶۰۰۰	۹	۱۴۵۸۵	۱	۱۵۹۳۷
۱۶۷۵۰	۳۵	۲۲۶۵۴	۴۴	۲۴۱۶۶
۳۹۶۰۰	۵	۳۷۷۷۹	۱	۳۹۷۲۵

کمترین خطای انحراف (CDR) و کمترین میزان میانگین خطاها، مربوط به مدل ارائه شده در مرجع [۱۴] است و کمترین میزان بیشینه خطاها در محاسبه عمر، مربوط به مدل‌های دوم و سوم ارائه شده در این مقاله می‌باشد. نکته قابل توجه این است که میزان بیشینه خطاها برای مدل مرجع [۱۴]، حتی از مدل اسمیت-واتسون-تاپر هم بیشتر است.

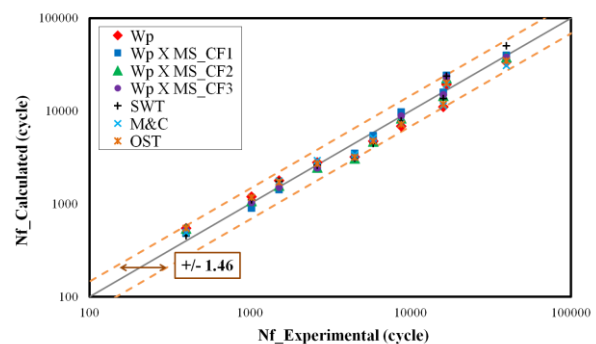
همان‌گونه که مشاهده شد، روش انرژی با ضریب تصحیح تنش (مدل مرجع [۱۴]) بهترین جواب را برای پیش‌بینی عمر خستگی کم‌چرخه آلیاژ منیزیم، ارائه نمود. اما مدل مرجع [۱۴]، همچنان دارای ایراداتی است. ایرادهای این مدل شامل بینهایت شدن ضریب در برخی از تنش‌های میانگین و عدم صفر بودن آن در تنش میانگین صفر است. این مطالب در شکل (۱۳) نشان داده شده است. بر این اساس، این مدل قادر به پیش‌بینی عمر خستگی با تنش‌های میانگین بیشتر از ۴۱/۶ مگاپاسکال، به دلیل صفر شدن مخرج کسر ضریب تصحیح تنش، نخواهد بود.

در این مقاله، صحت و دقت مدل ارائه شده برای آلیاژ منیزیم مورد مطالعه، بررسی و اثبات گردید. برای استفاده از مدل‌های ارائه شده، لازم است که در مورد سایر مواد نیز، دقت



شکل (۱۱) انرژی پلاستیک (با و بدون ضریب تصحیح تنش میانگین)

بر حسب عمر، در مقیاس لگاریتمی



شکل (۱۲) محاسبه عمر خستگی ماده منیزیمی بر اساس مدل‌های پیشنهادی

جدول (۲) مقایسه نتایج آزمون خستگی کم‌چرخه و مدل‌های پیش‌بینی عمر خستگی ماده منیزیمی (انرژی پلاستیک و مدل ارائه شده سوم)

عمر خستگی تجربی (چرخه)	انرژی پلاستیک با ضریب MS_CF ₃ (m ₃ =9.0)		انرژی پلاستیک بدون ضریب	
	خطای نسبی شده (چرخه) (درصد)	عمر محاسبه شده (چرخه)	خطای نسبی شده (چرخه) (درصد)	عمر محاسبه شده (چرخه)
۴۰۰	۳۲	۵۲۷	۳۸	۵۵۰
۱۰۲۰	۱	۱۰۳۳	۱۸	۱۲۰۰
۱۵۲۰	۱	۱۵۱۴	۱۸	۱۷۸۶
۲۶۲۰	۷	۲۴۳۰	۷	۲۸۰۸
۴۵۰۰	۳۰	۳۱۶۲	۲۹	۳۲۱۷
۵۸۶۰	۱۷	۴۸۹۴	۲۰	۴۷۱۸
۸۷۴۰	۱	۸۸۱۵	۲۱	۶۸۷۷
۱۶۰۰۰	۶	۱۵۰۳۷	۳۱	۱۱۰۲۷
۱۶۷۵۰	۳۸	۲۳۱۶۱	۱۵	۱۹۲۹۴
۳۹۶۰۰	۴	۳۷۹۰۳	۱۵	۳۳۸۰۱

می‌شود، در مدل جدید ارائه شده، اثر تنش میانگین، بصورت یک ضریب تصحیح تنش شامل یک رابطه‌ای از ضریب ثابت مادی، تنش میانگین و استحکام نهایی ماده، در پیش‌بینی عمر خستگی کم‌چرخه اعمال شده است. تنشهای میانگین فشاری باعث افزایش عمر و تنشهای میانگین کششی باعث کاهش عمر خستگی می‌گردند. نتایج مدل جدید نشان می‌دهد که عمر محاسبه شده از آن، حتی در مقایسه با روش انرژی (بدون ضریب تصحیح تنش)، دقت بهتری داشته و با نتایج تجربی حاصل از آزمون خستگی کم‌چرخه، دارای تطابق خوبی می‌باشد.

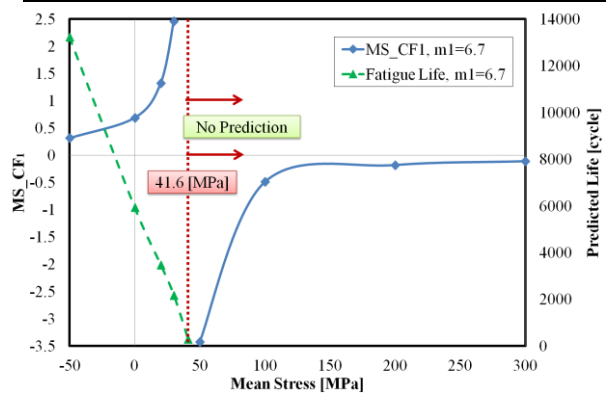
فهرست علائم

N_f	عمر خستگی (چرخه)
$N_{f,cal,i}$	عمر خستگی محاسبه شده (چرخه)
$N_{f,exp,i}$	عمر خستگی تجربی (چرخه)
ε	کرنش (درصد)
ε_p	کرنش پلاستیک (درصد)
$\varepsilon_{a,p}$	دامنه کرنش پلاستیک (درصد)
$\varepsilon_{a,t}$	دامنه کرنش کل (الاستیک و پلاستیک) (درصد)
$\Delta\varepsilon_t$	دامنه تغییرات کرنش کل (درصد)
$\Delta\varepsilon_p$	دامنه تغییرات کرنش پلاستیک (درصد)
σ	تنش (MPa)
$\Delta\sigma$	دامنه تغییرات تنش (MPa)
σ_{max}	تنش بیشینه (MPa)
σ_m	تنش میانگین (MPa)
σ_u	تنش نهایی (MPa)
α, β	ثوابت مادی
A_u, B_u	ثوابت مادی در مدل انرژی
A_1, A_2, B_0	ثوابت مادی
A, B	ثوابت مادی

آنها بررسی شود تا بتوان از مدل ارائه شده به عنوان یک مدل مرجع استفاده نمود.

جدول (۴) مقایسه نتایج مدل‌های پیش‌بینی عمر خستگی آلیاژ منیزیم

مدلها	MOE (%)	AOE (%)	CDR (%)
ΔW_p	۶۰	۲۵	۹۸
$\Delta W_p \times MS_{CF1}$	۴۴	۱۳	۹۹
$\Delta W_p \times MS_{CF2}$	۳۶	۱۶	۹۸
$\Delta W_p \times MS_{CF3}$	۳۸	۱۳	۹۹
SWT	۴۲	۱۷	۹۹
M&C	۵۳	۲۲	۹۸
OST	۴۹	۲۲	۹۸



شکل (۱۳) بررسی نتایج پیش‌بینی عمر در مدل مرجع [۱۴] برحسب تنش میانگین

بطور مثال، برای آلیاژ آلومینیوم، این مدل در مرجع [۲۱] مطالعه شده است. فرهی و همکارانش [۲۱] نشان داده‌اند که دقت مدل فوق برای آلیاژ آلومینیوم (A356.0) نیز، مناسب است. به عبارت دیگر، می‌توان گفت که مدل ارائه شده برای آلیاژهای سبک آلومینیوم و منیزیم، قابل اعتماد است.

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله، براساس نتایج آزمون خستگی کم‌چرخه، یک مدل جدید پیش‌بینی عمر برای آلیاژ منیزیم (AZ61A)، ارائه شده است. این مدل بر اساس روش انرژی بوده و در مقایسه با دیگر تئوریهای کلاسیک همچون مدل اسمیت-واتسون-تاپر، دارای دقت مناسب‌تری می‌باشد. علاوه بر اینکه در روش انرژی از رابطه عمر-کار پلاستیک که معادل با ضرب همزمان عددهای تنش و کرنش پلاستیک می‌باشد، استفاده

- [3] Park H.M., Magnesium alloy engine block, United States Patent Application Publication, No. US 2010/0050977-A1, 2010.
- [4] Eisenmeier G., Holzwarth B., Hoepfel H.W., Mughrabi H., Cyclic deformation and fatigue behaviour of the magnesium alloy AZ91, *Materials Science and Engineering*, Vol. 319-321, 2001, pp. 578-582.
- [5] Pegguleryuz M.O., Kaya A.A., Creep resistant magnesium alloys for powertrain applications, Proceedings of the 6th International Conference Magnesium Alloys and Their Applications, Wolfsburg, Germany, 2004.
- [6] Hasegawa S., Tsuchida Y., Yano H., Matsui M., Evaluation of low cycle fatigue life in AZ31 magnesium alloy, *International Journal of Fatigue*, Vol. 29, 2007, pp. 1839-1845.
- [7] Xue Y., Horstemeyer M.F., McDowell D.L., Kadiri H.E., Fan J., Microstructure-based multistage fatigue modeling of a cast AE44 magnesium alloy, *International Journal of Fatigue*, Vol. 29, 2007, pp. 666-676.
- [8] Begum S., Chen D.L., Xu S., Luo A.A., Low cycle fatigue properties of an extruded AZ31 magnesium alloy, *International Journal of Fatigue*, Vol. 31, 2009, pp. 726-735.
- [9] Beguma S., Chen D.L., Xu S., Luoc A.A., Effect of strain ratio and strain rate on low cycle fatigue behavior of AZ31 wrought magnesium alloy, *Materials Science and Engineering*, Vol. 517, 2009, pp. 334-343.
- [10] Park S.H., Hong S.G., Lee B.H., Bang W., Lee C.S., Low-cycle fatigue characteristics of rolled Mg-3Al-1Zn alloy, *International Journal of Fatigue*, Vol. 32, 2010, pp. 1835-1842.
- [11] Kwon S., Song K., Shin K.S., Kwun S.I., Low cycle fatigue properties and cyclic deformation behavior of as-extruded AZ31 magnesium alloy, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 20, 2010, pp. 533-539.
- [12] Li Q., Yu Q., Zhang J., Jiang Y., Effect of strain amplitude on tension-compression fatigue behavior of extruded Mg6Al1ZnA magnesium alloy, *Scripta Materialia*, Vol. 62, 2010, pp. 778-781.
- [13] Li Q., Yu Q., Zhang J., Jiang Y., Multiaxial fatigue of extruded AZ61A magnesium alloy, *International Journal of Fatigue*, Vol. 33, 2011, pp. 437-447.
- C_n ثابت عددی انتگرال‌گیری
- ε'_f ضریب شکل‌پذیری خستگی
- c توان شکل‌پذیری خستگی
- σ'_f ضریب استحکام خستگی (MPa)
- b توان استحکام خستگی
- E مدول الاستیک (GPa)
- ΔW_t انرژی کرنش کل (J)
- ΔW_p انرژی کرنش پلاستیک (J)
- ΔW_e انرژی کرنش الاستیک (J)
- $W_{u,p}$ انرژی کرنش پلاستیک در حالت کشش ساده (J)
- f_σ, f_T ضریب تصحیح تنش و دما
- m_1, m_2, m_3 توان ضریب تصحیح تنش
- CDR, R^2 ضریب تعیین
- E_i خطای نسبی (درصد)
- MOE بیشینه خطای نسبی (درصد)
- AOE میانگین خطای نسبی (درصد)
- k تعداد آزمونهای خستگی
- P_j پارامتر آسیب خستگی
- P_{SWT} پارامتر آسیب خستگی اسمیت-واتسون-تاپر
- P_{OST} پارامتر آسیب خستگی استرجن
- $P_{M\&C}$ پارامتر آسیب خستگی مانسون-کافین

مراجع

- [1] Tharumarajah A., Koltun P., Is there an environmental advantage of using magnesium components for light-weighting cars?, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 15, 2007, pp. 1007-1013.
- [2] Okamoto Y., Kinoshita K., Tanizawa M., Yoshida K., Magnesium alloy for casting and magnesium-alloy cast product, United States Patent Application Publication, No. US 2010/0119405-A1, 2010.

- [14] Gocmez T., Awarke A., Pischinger S., A new low cycle fatigue criterion for isothermal and out-of-phase thermo-mechanical loading, *International Journal of Fatigue*, Vol. 32, 2010, pp. 769-779.
- [15] Trampert S., Gocmez T., Pischinger S., Thermo-mechanical fatigue life prediction of cylinder heads in combustion engines, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 130, 2008, pp. 1-10.
- [16] Lagoda T., Energy models for fatigue life estimation under uniaxial random loading, Part I: The model elaboration, *International Journal of Fatigue*, Vol. 23, 2001, pp. 467-480.
- [17] Minichmayr R., Riedler M., Winter G., Leitner H., Eichlseder W., Thermo-mechanical fatigue life assessment of aluminium components using the damage rate model of Sehitoglu, *International Journal of Fatigue*, Vol. 30, 2008, pp. 298-304.
- [18] Minichmayr R., Riedler M., Eichlseder W., Fatigue analysis of aluminum components using the damage rate model of Neu/Sehitoglu, International Workshop on Thermo-Mechanical Fatigue, Berlin, Germany, 2005.
- [19] Riedler M., Winter G., Minichmayr R., Eichlseder W., Applicability of plastic and total hysteresis energy criterions for simulating the TMF lifetime, International Workshop on Thermo-Mechanical Fatigue, Berlin, Germany, 2005.
- [20] Song G., Hyun J., Ha J., Creep-fatigue life prediction of aged 13CrMo44 steel using the tensile plastic strain energy, Temperature-Fatigue Interaction, edited by L. Remy and J. Petit, Elsevier Science Ltd. and ESIS, 2002.
- [21] Farrahi G.H., Azadi M., Winter G., Eichlseder W., A new energy-based isothermal and thermo-mechanical fatigue lifetime prediction model for aluminum-silicon-magnesium alloy, *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 2013, DOI: 10.1111/ffe.12078.