



تحلیل اجزای محدود تنش‌های حرارتی - مکانیکی در بستار موتور دیزل با استفاده از الگوی ارتجاعی - مومسان لزج دولایه

غلامحسین فرهی^{۱*}، محمد قدرتی^۲، محمد آزادی^۳

^۱دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران، farrahi@sharif.edu

^۲دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران، ghodrati@mech.sharif.edu

^۳شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو (ایپکو)، تهران، ایران، m_azadi@ip-co.com

^۴نویسنده مسئول، شماره تماس: ۰۲۱-۶۶۱۶۵۵۳۳

اطلاعات مقاله

چکیده

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۲۴ شهریور ۱۳۹۲

پذیرش: ۰۶ مهر ۱۳۹۲

کلیدواژه‌ها:

تحلیل اجزای محدود

تنش ترمومکانیکی

بستار موتور دیزل

الگوی ارتجاعی - مومسان لزج دولایه

هدف این مقاله، شبیه‌سازی رفتار حرارتی- مکانیکی بستار موتور دیزل است. این تحلیل اجزای محدود در نرم‌افزار ABAQUS انجام شد. ابتدا برای بیان رفتار ماده، از نتایج آزمون‌های خستگی کم‌بسامد در دماهای متفاوت (منحنی تنش - کرنش مکانیکی در چرخه نیمه‌عمر) استفاده شده است و ثوابت مادی در الگوی ارتجاعی - مومسان لزج دولایه استخراج شده است. آزمون‌های خستگی با پایش کرنش و به صورت کشش - فشار بر روی همبسته آلومینیوم - سیلیسیوم - منیزیم (A356.0) انجام پذیرفته است. سپس، با استفاده از این ثوابت مادی در دماهای ۲۵، ۲۰۰ و ۲۵۰ درجه سانتیگراد، تنش‌های حرارتی - مکانیکی بستار محاسبه شد. نتایج صحت‌گذاری نشان داد که الگوی ارتجاعی - لزج مومسان دولایه برای تخمین رفتار واماندگی (هیستریزیس) همبسته آلومینیوم، دقت مناسبی دارد. نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود بستار نیز، نشان‌دهنده محل ترک خوردگی‌ها در بین درجه‌هاست. همچنین، مقدار کرنش لزج محاسبه شده، اگرچه کمتر از مقدار کرنش مومسان است، اما قابل چشم‌پوشی نمی‌باشد.

تمامی حقوق برای انجمن علمی موتور ایران محفوظ است.

۱) مقدمه

صنعت خودروسازی همواره به دنبال افزایش بازدهی موتور و بهبود کارکرد خودروها بوده است. برای این منظور، کاهش وزن خودرو و موتور، یکی از راهکارهاست. استفاده از همبسته‌های آلومینیوم بخصوص در محفظه احتراق و بستار موتور، کاهش وزن چشمگیری را در مقایسه با انواع چدن‌ها در پی دارد. همچنین، برای افزایش بازدهی موتور، بیشینه دمای بستار از ۱۷۰ درجه سانتیگراد در موتورهای ابتدایی تا بیش از ۲۵۰ درجه سانتیگراد در موتورهای کنونی، افزایش یافته است. ماده بستار، باید قابلیت استحکام را در آن دما دارا باشد [۴-۱].

بستار یکی از قطعات پیچیده موتور است که در معرض بارهای حرارتی و مکانیکی است. به عبارت دیگر، اختلاف دمایی که از رویه روشن و خاموش کردن موتور ایجاد می‌گردد، باعث ایجاد بارهای خستگی حرارتی- مکانیکی می‌شود که عمر این قطعات را بخصوص در نقاط با ضخامت کمتر، کاهش می‌دهد [۵-۸].

در زمینه تحلیل تنش و خستگی بستار، مقالات زیادی تاکنون ارائه گردیده است. کوخ^۱ و همکاران [۹]، کرنش را در بستار به صورت تجربی اندازه‌گیری کرده و با نتایج شبیه‌سازی مقایسه نمودند. برای این منظور، آنها از الگوی رفتاری سخت‌شوندگی همسانگرد- پویای غیرخطی استفاده نمودند. ماسن^۲ [۱۰]، کرنش مومسان بستار را با شبیه‌سازی اجزا محدود آن (به منظور محاسبه عمر خستگی)، محاسبه کرد. خزش و پیرسازی ماده را در بستار آلومینیومی تاکاهاشی^۳ و همکاران [۱۱-۱۲]، بررسی کردند. آنها در مقاله دیگری [۱۳]، تحلیل ارتجاعی- مومسان بستار را براساس الگوهای ریزساختاری ماده انجام دادند. توماس^۴ و همکاران [۱۴-۱۵]، براساس مقدار سختی ماده، الگویی را برای شبیه‌سازی رفتار پیرسازی ماده ارائه کردند. آنها با استفاده از انرژی کرنش مومسان (محاسبه شده از روش اجزای محدود)، محل ترک خوردگی‌ها را در بستار با حالت‌های واقعی مقایسه کردند. سو^۵ و همکاران [۱۶]، پس از شبیه‌سازی اجزاء محدود بستار، عمر خستگی ترمومکانیکی آن را با الگوی نرخ آسیب سیتقلو^۶، پیش‌بینی و با نتایج تجربی مقایسه کردند. آنها از الگوی ارتجاعی- مومسان برای بیان رفتار ماده استفاده نمودند. فرایند کامل احتراق موتور را زایهر^۷ و همکاران [۱۷]، شبیه‌سازی کردند. آنها با استفاده از روش انرژی کرنش مومسان، مقدار آسیب خستگی را در بستار چدنی موتور تخمین زدند. کمترین مقدار عمر بستار در ناحیه بین دریچه‌ها مشاهده شد.

بارلاس^۸ و همکاران [۱۸]، از معادله هذلولی (هایپربولیک) برای محاسبه تنش در بستار آلومینیومی استفاده کردند. سپس با استفاده از روش مکانیک آسیب پیوسته، عمر خستگی و خزشی آن را تخمین زدند. بهینه‌سازی نوع ماده (با بررسی چندین نوع چدن) و هندسه بستار را، براساس تنش‌های حرارتی- مکانیکی و عمر خستگی کم بسامد آن، ترامپرت^۹ و همکاران [۱۹]، انجام دادند. فرهی و همکاران [۲۰-۲۱]، اثر وجود لایه‌های پوشش سرامیکی را بر روی بستار موتور دیزل مطالعه نمودند. آنها از الگوی ارتجاعی- لزج مومسان دولایه برای شبیه‌سازی رفتار ماده پایه استفاده کردند. زاهدی و آزادی [۲۲]، با استفاده از الگوی ارتجاعی- مومسان، تنش و عمر خستگی کم بسامد در بستارهای آلومینیومی و منیزیومی را محاسبه و با یکدیگر مقایسه کردند. در مقاله دیگری، آزادی و همکاران [۲۳]، برای تحلیل خرابی بستار ترک خورده از الگوی ارتجاعی- مومسان (به منظور شبیه‌سازی رفتار ماده و محاسبه تنش‌های حرارتی- مکانیکی آن) استفاده کردند.

براساس مطالبی که در بخش قبل، مروری بر ادبیات گذشته ذکر شد، می‌توان گفت که تحلیل‌های صورت گرفته، بیشتر براساس الگوهای ساده رفتاری ماده (ارتجاعی- مومسان) بوده و کمتر اثر لزجت^{۱۰} و خزش در بستار، در نظر گرفته شده است. لذا در این پژوهش، هدف اصلی شبیه‌سازی رفتار حرارتی- مکانیکی بستار براساس الگوی ارتجاعی- مومسان لزج دولایه است. شبیه‌سازی در نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS، انجام شد. در این راستا، برای بیان رفتار ماده، ثوابت مادی از آزمون‌های خستگی کم بسامد در دماهای متفاوت استخراج شد. سپس، با استفاده از این ثوابت مادی برای همبسته آلومینیوم در دماهای مختلف، شبیه‌سازی تنش‌های حرارتی- مکانیکی بستار در نرم‌افزار ABAQUS صورت گرفت. در ادامه نیز، نتایج فوق به صورت نمودارهایی اعلام گردید.

۲) ماده و الگوی رفتار آن

در این پژوهش، از همبسته ریختگری شده آلومینیوم- سیلیسیوم- منیزیم برای شبیه‌سازی رفتار حرارتی- مکانیکی آن در بستار موتور دیزل استفاده شده است. این همبسته که به نام A356.0 یا AISi7Mg0.3 شناخته می‌شود، مهم‌ترین همبسته سیلیسیوم‌دار و منیزیم‌دار آلومینیوم است. این همبسته آلومینیوم، دارای ۷٪ سیلیسیوم برای ایجاد قابلیت بهتر ریخته‌گری و ۰٫۳٪ منیزیم برای جلوگیری از خوردگی است. توجه شود که در موتور دیزلی در اثر احتراق، مواد خورنده اسیدی تولید می‌گردد.

1 F. Koch

2 F.J. Maassen

3 T. Takahashi

4 J.J. Thomas

5 X. Su

6 Sehitoglu's damage rate model

7 F. Zieher

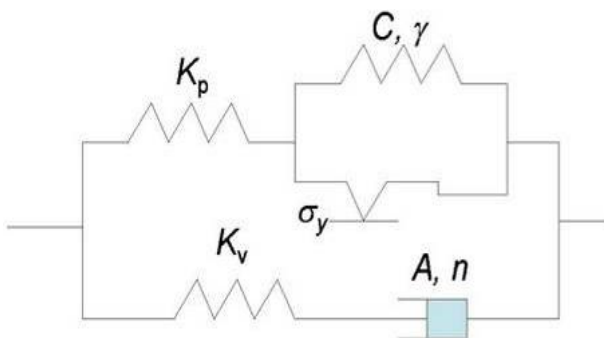
8 B. Barlas

9 S. Trampert

10 Viscosity



شکل ۲: تجهیزات آزمون خستگی کم بسامد



شکل ۳: بیان یک بعدی الگوی ارتجاعی- مومسان لزوج دولا به [۲۴]

در شبکه مومسان، از الگوی سخت‌شوندگی همسانگرد^۲- پویای^۳ غیرخطی استفاده شده است که رفتارهای ماده نظیر سخت‌شوندگی یا نرم‌شوندگی و خزش چرخه به چرخه، رهاسازی تنش میانگین و اثر باشینگر را پیش‌بینی می‌کند و الگوی مناسبی برای بیان رفتار مومسان مواد است. معیار تسلیم در حالت بارگذاری تک‌محوره برای این الگو، در معادله ۱ نشان داده شده است.

$$|\sigma - X| - R - k = 0 \quad (1)$$

که X متغیر سخت‌شوندگی، R مقدار تغییر اندازه سطح تسلیم و k اندازه سطح تسلیم در چرخه اول است. معادلات ۲ و ۳ بیانگر سخت‌شوندگی پویای غیرخطی اند.

$$X = v' \frac{C}{\gamma} + \left(X_0 - v' \frac{C}{\gamma} \right) \exp(-v' \gamma (\epsilon_p - \epsilon_{p,0})) \quad (2)$$

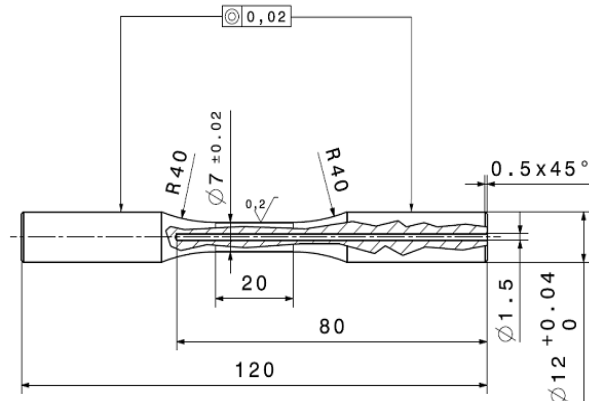
$$X = \sum_{i=1}^M X_i \quad (3)$$

که $v' = \pm 1$ بیانگر جهت سیلان، ϵ_p کرنش مومسان، C و γ ثوابت ماده و $\epsilon_{p,0}$ و X_0 بترتیب مقادیر اولیه ϵ_p و X اند. در

آزمون‌های خستگی کم بسامد براساس استاندارد ASTM E606، تحت شرایط پایش کرنش مکانیکی و در دماهای ۲۵۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ درجه سانتیگراد، روی نمونه‌های آلومینیومی استوانه‌ای (شکل ۱) صورت گرفته است. دامنه کرنش مکانیکی در همه دماها برابر ۰٫۳٪ است. این شرایط بارگذاری به گونه‌ای انتخاب شده است که حتی الامکان شبیه به بارهای واقعی وارد شده به بستار باشد. تجهیزات آزمون خستگی کم بسامد در شکل ۲ نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود، از سامانه القایی برای گرم کردن نمونه آزمون استفاده شده است. کرنش مکانیکی با دستگاه اندازه‌گیری کرنش در دمای گرم^۱، اندازه‌گیری شده و مقدار آن را رایانه مهار کرده است.

نرخ بارگذاری کرنش مکانیکی در آزمون‌های خستگی برابر با ۰٫۱ بر ثانیه در نظر گرفته شده است. همچنین، مقداری کرنش اولیه، به عنوان شرایط اولیه بارگذاری نیز به نمونه آزمون اعمال شده است. مقدار این کرنش برابر با ۰٫۰۵٪ و به صورت کششی است که در عمل، معادل با نیروی حاصل از پیچ‌های بستار، به عنوان پیش‌بار (شرایط اولیه) می‌باشد. پس از اعمال این مقدار اولیه برای کرنش مکانیکی (معادل با مقدار کرنش کمینه)، براساس دامنه کرنش مکانیکی ۰٫۳٪، مقدار بیشینه کرنش نیز محاسبه شده و بارگذاری کرنش مکانیکی با نرخ ۰٫۱ بر ثانیه، به صورت مثلثی (بین دو نقطه کمینه و بیشینه)، به نمونه آزمون اعمال می‌گردد. شایان ذکر است که در ابتدای هر آزمون، ضریب ارتجاعی ماده اندازه‌گیری شده و نتایج آن با نتایج مراجع و استانداردهای موادی مقایسه می‌گردد. در صورت مشاهده مغایرت زیاد مقادیر فوق، که ممکن است ناشی از عیب‌های ریزساختاری ماده باشد، نتایج آن آزمون، در نظر گرفته نمی‌شود.

برای شبیه‌سازی رفتار همبسته آلومینیوم از الگوی ارتجاعی- مومسان لزوج دولا به برای بیان رفتار مومسان و لزجت استفاده گردیده است. این الگو، اثر مومسان و اثر لزجت را به دو شبکه ارتجاعی- مومسان و ارتجاعی- لزوج تقسیم می‌کند. تصویر این الگو، در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۱: ابعاد نمونه آلومینیومی در آزمون خستگی کم بسامد

² Isotropic
³ Kinematic

¹ High temperature extensometer

ارتجاعی ۱۰۶ گیگاپاسکال و نسبت پواسون ۰,۳۵ اند. این راهنماها به طور کامل در بستار محکم شده‌اند و رفتار آنها ارتجاعی فرض می‌شود. همچنین نشیمنگاه دریچه‌ها نیز از جنس فولاد با ضریب ارتجاعی ۲۰۰ گیگاپاسکال و نسبت پواسون ۰,۳۰ در نظر گرفته شده‌اند. این نشیمنگاه‌ها نیز به صورت ارتجاعی رفتار می‌کنند و در جای خود محکم شده‌اند. این کار با استفاده از قیدهایی صورت گرفته است که فاصله اجزای نشیمنگاه با دریچه را با معادلاتی به هم متصل می‌سازد تا در حین بارگذاری اجزا جدا نشوند.

این شبیه‌سازی از ۱۹۳۹۴ جزء آجری مرتبه اول^۵ و ۱۳۳۴ جزء منشوری^۶ مرتبه اول برای نقاط با هندسه پیچیده‌تر تشکیل شده است [۳]. بارگذاری در دو مرحله صورت می‌پذیرد که شامل تحلیل حرارتی (برای محاسبه توزیع دما روی بستار) و تحلیل حرارتی- مکانیکی (برای محاسبه تنش‌های حرارتی- مکانیکی در بستار) است.

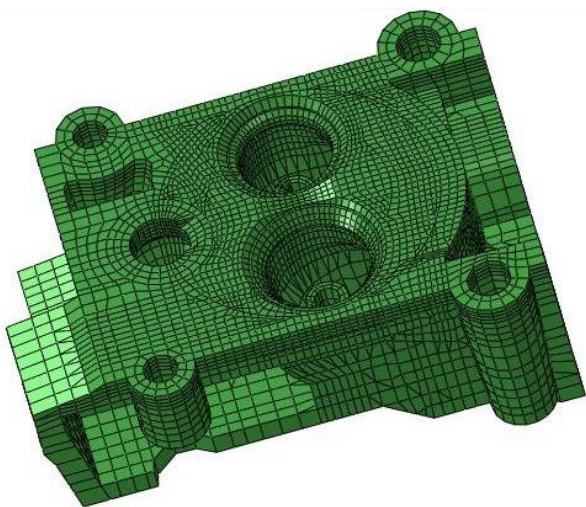
۳-۲) تحلیل حرارتی

در این شبیه‌سازی اجزای محدود، ناحیه اطراف دو دریچه سوخت و دود که بیشترین تمرکز دمایی در آنجاست، تحت بارگذاری حرارتی با حداقل دمای ۲۵ و حداکثر ۲۵۰ درجه سانتیگراد قرار می‌گیرد. با تعریف خواص انتقال حرارتی و ضرایب رسانش و جابجایی و گرمای ویژه برای هر کدام از مواد، تحلیل حرارتی روی بستار به منظور بدست آوردن توزیع دما، انجام می‌شود [۲۵].

در تحلیل حرارتی، کرنش حرارتی از معادله ۷ بدست می‌آید.

$$\varepsilon_{th} = \alpha(T - T_{ref}) \quad (7)$$

که α ضریب انبساط حرارتی و T_{ref} دمای اولیه ماده‌اند. برای همبسته آلومینیوم در دماهای مختلف (۲۵ تا ۲۵۰ درجه سانتیگراد)، به طور میانگین برابر $2,31 \times 10^{-5}$ در نظر گرفته شده است [۸].



شکل ۴: نمای کلی بستار موتور دیزل در حالت شبکه‌بندی شده

معادله ۳ نیز، با در نظر گرفتن M برابر با ۳، متغیر سخت‌شوندگی به سه قسمت تقسیم می‌شود که موجب افزایش دقت الگو می‌شود.

معادله ۴، بیانگر سخت‌شوندگی همسانگرد است:

$$R = Q(1 - \exp(-bp)) \quad (4)$$

که Q مقدار اشباع شده R است که حداکثر کاهش یا افزایش شعاع سطح تسلیم را نشان می‌دهد و b بیان‌کننده سرعت رسیدن سخت‌شوندگی همسانگرد (R) به مقدار اشباع^۱ خود، یعنی Q است. p نیز، مقدار کرنش تجمعی در مجموع چرخه‌ها است. همچنین، در شبکه لزج از قانون نورتون- هاف^۲ برای در نظر گرفتن اثر نرخ کرنش استفاده شده است. در معادله ۵، این قانون بیان شده است.

$$\dot{\varepsilon}_v = A(\sigma_v)^n \quad (5)$$

که $\dot{\varepsilon}_v$ نرخ کرنش لزج، A و n ثوابت مادی و σ_v تنش لزج اند. همچنین، نسبت ضرایب ارتجاعی، در دو شبکه لزج و مومسان، با ضریب f ، مطابق معادله ۶ بیان می‌شود.

$$f = \frac{K_v}{K_v + K_p} \quad (6)$$

که K_v و K_p ، بترتیب، ثوابت ارتجاعی در شبکه‌های ارتجاعی- لزج و ارتجاعی- مومسان اند.

برای بدست آوردن ثوابت مادی این الگوی رفتار ماده، از آزمون‌های خستگی استفاده شده است. این ثوابت با انطباق نتایج شبیه‌سازی و تجربی، محاسبه می‌شوند. سپس با استفاده از ثوابت فوق، شبیه‌سازی رفتار حرارتی- مکانیکی بستار آلومینیومی با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS صورت گرفته است.

۳) شبیه‌سازی بستار

۳-۱) الگو و خواص مواد

الگوی ارائه شده در نرم‌افزار ABAQUS به همراه تصویر ریزدانه شده از هندسه بستار، در شکل ۴ نشان داده شده است. این بستار متعلق به یک موتور دیزل چهار استوانه خطی است. هر بستار موتور دیزل دو محل دریچه دارد که برای ورودی هوا و خروجی دود است و دو نشیمنگاه^۳ بر روی آنها سوار می‌شود. یک سوراخ دیگر روی بستار، محل افشانه سوخت است. از طرفی دو راهنمای دریچه^۴ دارد که دریچه‌ها در آن هدایت می‌شوند و در چهار نقطه بستار به محفظه احتراق پیچ می‌شود.

خواص ارتجاعی، مومسان و لزجی که از همبسته آلومینیوم به دست آمد و با آزمون‌های خستگی، صحنه‌گذاری شدند؛ در نرم‌افزار ABAQUS وارد می‌شود. راهنماهای دریچه از جنس فولاد با ضریب

¹ Saturation

² Norton- Hoff

³ Valve seat

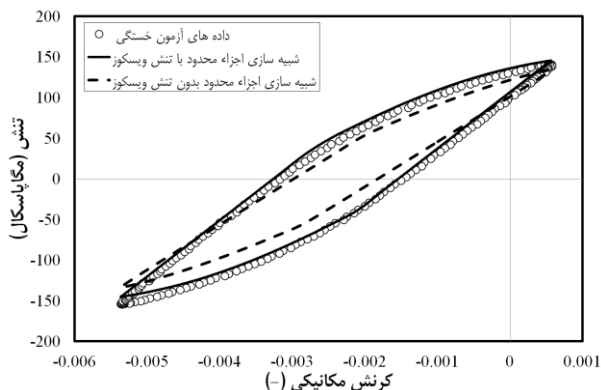
⁴ Valve guide

⁵ First-order brick elements

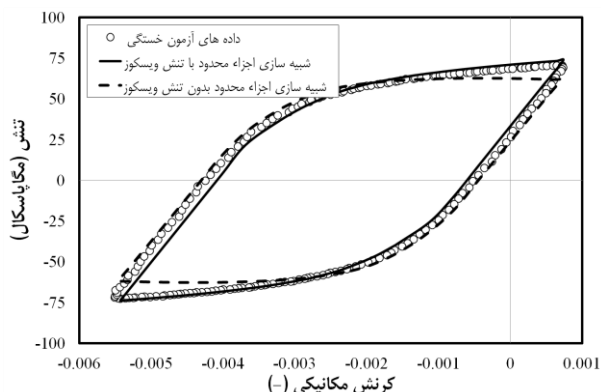
⁶ Prism

۲۵۰ درجه سانتیگراد، تفاوت چندانی با یکدیگر ندارند اما مقدار تنش ماده در دمای ۲۵۰ درجه سانتیگراد، کمی کمتر از دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد است.

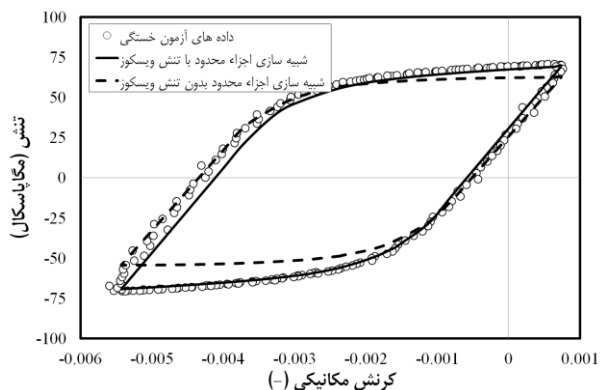
ثوابت مادی همبسته آلومینیوم در الگوی ارتجاعی- مومسان لزج دولایه، در جدول‌های ۱-۳ نشان داده شده‌اند. این جداول شامل ثوابت متعلق به رفتارهای ارتجاعی، مومسان و لزج ماده می‌باشد.



شکل ۵: رفتار چرخه به چرخه همبسته آلومینیوم در چرخه نیمه‌عمر، تحت بارگذاری خستگی کم بسامد در دمای ۲۵۰ درجه سانتیگراد



شکل ۶: رفتار چرخه به چرخه همبسته آلومینیوم در چرخه نیمه‌عمر، تحت بارگذاری خستگی کم بسامد در دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد



شکل ۷: رفتار چرخه به چرخه همبسته آلومینیوم در چرخه نیمه‌عمر، تحت بارگذاری خستگی کم بسامد در دمای ۲۵۰ درجه سانتیگراد

بارگذاری حرارتی به صورت چرخه به چرخه انجام می‌شود و پس از سه چرخه تعادل دمایی برقرار می‌شود. بنابراین چرخه انتهایی به عنوان چرخه پایدار انتخاب می‌شود و نتایج آن ذخیره می‌شود تا برای بارگذاری حرارتی- مکانیکی استفاده شود [۲۵].

۳-۳ تحلیل حرارتی- مکانیکی

پس از آنکه تحلیل حرارتی صورت گرفت و دما در نقاط مختلف بستار بدست آمد، نوبت به تحلیل حرارتی مکانیکی می‌رسد. در این قسمت اجزای اطراف پیچ های بستار در تمام جهات مقید می‌شوند. در مرحله اول جابجایی اولیه، به مقدار بسیار کم، به نشیمنگاه دریچه‌ها داده می‌شود تا در جای خود محکم شوند. سپس در مراحل بعد به تعداد لازم بارگذاری حرارتی چرخه به چرخه انجام می‌شود تا رفتار ماده به پایداری برسد. چون بستار در جای خود ثابت است و تحت بارگذاری حرارتی چرخه به چرخه قرار دارد، بنابراین کرنش مکانیکی در جهت عکس کرنش حرارتی در قطعه بوجود می‌آید که به این نوع بارگذاری حرارتی- مکانیکی، حالت غیرهم‌فاز می‌گویند. شایان ذکر است که در این تحلیل، از تنش‌های ناشی از نیروهای مکانیکی (بارهای چرخه‌ای ناشی از برخورد دریچه‌ها) صرف نظر شده است.

۴ بررسی نتایج

۴-۱ محاسبه ثوابت مادی

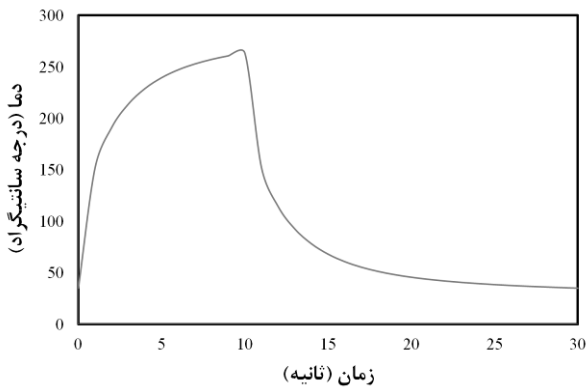
با استفاده از الگوهای ذکر شده، شبیه‌سازی خستگی کم بسامد در دماهای ۲۵، ۲۰۰ و ۲۵۰ درجه سانتیگراد صورت گرفت و نمودار تنش- کرنش مکانیکی این شبیه‌سازی اجزای محدود با نمودار تنش- کرنش مکانیکی تجربی (بدست آمده از نتایج آزمون خستگی صورت گرفته در چرخه نیمه‌عمر ماده)، مقایسه گردیده و صحت‌گذاری شده است. این نتایج شبیه‌سازی، در سه دمای مختلف ۲۵، ۲۰۰ و ۲۵۰ درجه سانتیگراد، در شکل‌های ۵، ۶ و ۷ (برای دو حالت با و بدون درنظر گرفتن تنش لزج) مشاهده می‌شوند.

همان‌گونه که در اشکال قابل مشاهده است، تطابق مناسبی بین نتایج شبیه‌سازی و تجربی وجود دارد که نشان‌دهنده دقت الگوی ارتجاعی- مومسان لزج دولایه است. شبیه‌سازی فوق بدون درنظر گرفتن تنش لزج، نتایج ضعیف‌تری دارد و عملاً مقدار تنش را کمتر از حالت واقعی، پیش‌بینی می‌کند. این مقدار خطا در تخمین مقدار تنش بخصوص در کمینه و بیشینه کرنش مکانیکی، با افزایش دما، بیشتر شده است؛ چراکه رفتار لزج ماده شدیداً به دما وابسته است. بنابراین، اهمیت لحاظ نمودن خواص لزج ماده، در شبیه‌سازی رفتار چرخه به چرخه آن مشخص می‌گردد.

در ضمن، براساس انتظار قبلی، کرنش مومسان (عرض منحنی واماندگی روی خط میانگین تنش صفر) در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد کمتر از دماهای گرم است. این کرنش مومسان در دماهای ۲۰۰ و

با توجه به شکل ۸، دما در بین دو دریچه، بیشینه است و این منطقه از لحاظ دما، بحرانی است. پس از تحلیل حرارتی، جزئی از بستار که گرم‌ترین دما را دارد، به عنوان جزء بحرانی انتخاب می‌شود. در شکل ۹، نمودار تغییرات دما در این جزء برحسب زمان مشاهده می‌گردد که نشان‌دهنده یک چرخه روشن و خاموش شدن موتور است.

دمای بدست آمده در تحلیل حرارتی برای چرخه پایدار در کل بستار، ورودی تحلیل حرارتی- مکانیکی در نرم‌افزار ABAQUS است. با اعمال این بارگذاری چرخه به چرخه حرارتی و مقید کردن بستار، بارگذاری حرارتی مکانیکی به صورت غیرهم‌فاز به بستار اعمال می‌شود. براین اساس، توزیع تنش فون میسز^۱ در انتهای چرخه تعادل، در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود. همان‌گونه که مشخص است، بیشینه مقدار تنش نیز همانند دما، بین دو دریچه رخ داده است. این نتیجه با آزمونهای تجربی مطابقت دارد. بستار ترک خورده در موتورهای دیزل مشابه، در شکل ۱۱ نشان داده شده است. شایان ذکر است که مقدار بیشینه تنش فون میسز برابر با ۱۴۸،۱ مگاپاسکال (به صورت کششی) و مقدار کمینه تنش فون میسز، تقریباً برابر با صفر است.



شکل ۹: نمودار تغییرات دما بر حسب زمان، در جزء بحرانی بستار با بیشینه دما در تحلیل حرارتی

جدول ۱: ثوابت مادی همبسته آلومینیوم در الگوی ارتجاعی- مومسان لزج دولایه (بخش رفتار ارتجاعی- مومسان)

دما (°C)	رفتار ارتجاعی		رفتار مومسان		
	E (GPa)	ν (-)	k (MPa)	Q (MPa)	b (-)
۲۵	۶۹,۱	۰,۳۰	۸۲	۱۵	۲۰,۰
۲۰۰	۵۹,۹	۰,۳۰	۴۸	۵	۱,۵
۲۵۰	۵۳,۰	۰,۳۰	۶۱	-۱۷	۱,۰

جدول ۲: ثوابت مادی همبسته آلومینیوم در الگوی ارتجاعی- مومسان لزج دولایه (بخش رفتار مومسان)

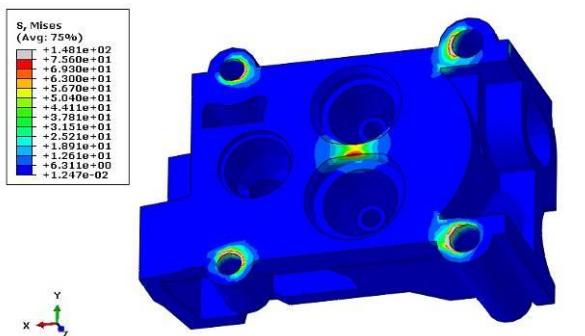
دما (°C)	رفتار مومسان					
	C_1 (MPa)	γ_1 (-)	C_2 (MPa)	γ_2 (-)	C_3 (MPa)	γ_3 (-)
۲۵	۱۲۵۹۸	۱۳۰۷	۲۴۸۶۵	۱۳۳۲	۴۶۸۹۰	۱۲۶۷
۲۰۰	۲۵۰۲۳	۲۶۸۶	۱۶۱۲۵	۲۱۷۲۰	۶۹۵۴	۳۳۰
۲۵۰	۵۶۹۲	۴۰۸	۸۸۴۸	۳۶۹۰	۳۵۱۳۲	۳۸۹۴

جدول ۳: ثوابت مادی همبسته آلومینیوم در الگوی ارتجاعی- مومسان لزج دولایه (بخش رفتار لزج)

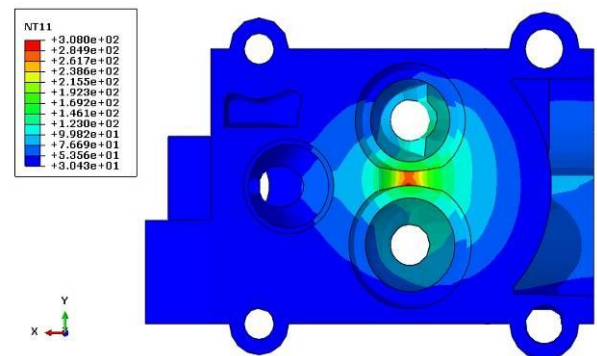
دما (°C)	رفتار لزج		
	A (MPa ⁻ⁿ sec. ⁻¹)	n (-)	f (-)
۲۵	۲×10^{-۵}	۱,۶۷	۰,۲۰
۲۰۰	۹×10^{-۶}	۱,۶۷	۰,۱۵
۲۵۰	۸×10^{-۷}	۱,۶۷	۰,۰۵

۲-۴) تنش‌های حرارتی- مکانیکی بستار

با استفاده از ثوابت مادی بدست آمده (با تطابق الگوی رفتاری ماده و صحه‌گذاری بر آزمون‌های خستگی کم بسامد در دماهای مختلف)، تحلیل حرارتی- مکانیکی بستار صورت گرفت. نتایج تحلیل حرارتی (شامل توزیع دمای بستار) در شکل ۸ نشان داده شده است.

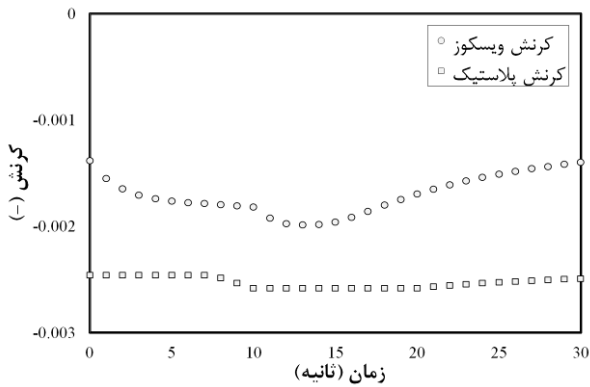


شکل ۱۰: توزیع تنش فون میسز (بر حسب مگاپاسکال) در بستار تحت بارگذاری حرارتی- مکانیکی

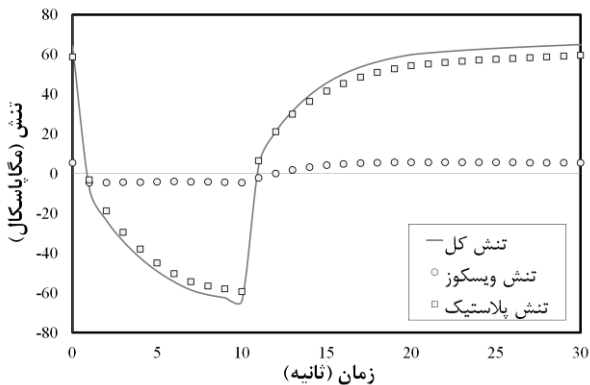


شکل ۸: توزیع دما (بر حسب درجه سانتیگراد) در بستار تحت بارگذاری حرارتی (در حالت بیشینه دما)

¹ Von-Mises stress



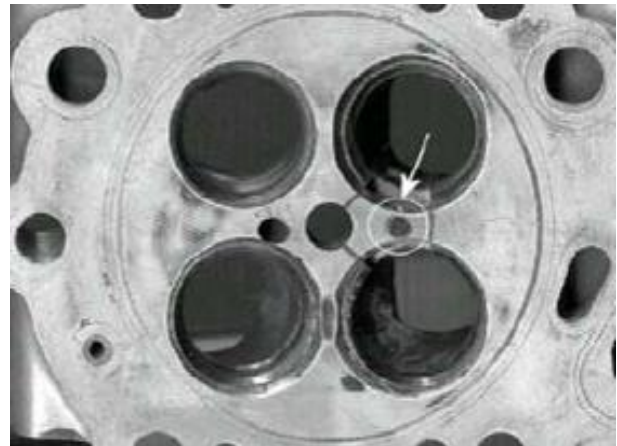
شکل ۱۲: نمودار انواع کرنش بر حسب زمان، در جزء بحرانی بستار



شکل ۱۳: نمودار انواع تنش بر حسب زمان، در جزء بحرانی بستار

۶ نتیجه گیری

در این مقاله، تنش در بستار موتور دیزل تحت بارهای حرارتی و مکانیکی به روش اجزای محدود محاسبه شد. برای این منظور، از الگوی ارتجاعی-لزج مومسان دولایه استفاده گردید که ثوابت مادی آن برای همبسته آلومینیوم از طریق آزمون‌های خستگی کم بسامد در دماهای مختلف بدست آمد. نتایج صحنه‌گذاری نشان می‌دهد که الگوی ارتجاعی-مومسان لزج دولایه، دقت مناسبی برای تخمین رفتار وامانی همبسته آلومینیوم دارد. نتایج تحلیل اجزاء محدود بستار نیز، نشان می‌داد که اگرچه کرنش لزج، مقدار کمتری نسبت به کرنش مومسان دارد اما قابل صرف‌نظر کردن نمی‌باشد. بیشینه دما و تنش در ناحیه بین درپچه‌ها رخ می‌داد که با محل ترک‌های ایجاد شده روی بستار، مطابقت دارد. برای جلوگیری از ایجاد این گونه ترک‌ها، به عنوان راه‌حلی کاربردی، پیشنهاد می‌شود که در کنار تغییر طراحی بستار (با تغییر ضخامت و هندسه ماده در قسمت بحرانی و یا تغییر سامانه خنک‌کاری آن بخش)، از پوشش‌های سفلین می‌توان علاوه بر بهبود عملکرد احتراقی موتور، عمر خستگی بستار را نیز بهبود بخشید، چراکه از انتقال حرارت جلوگیری می‌کنند.



شکل ۱۱: بستار ترک خورده در موتور دیزل [۱۷،۲۶]

محل ترک خوردگی در ناحیه بین درپچه‌ها می‌باشد. این ناحیه، معمولاً به دلیل ضخامت کمتر ماده و دمای بیشتر آن (به علت عدم دسترسی برای خنک‌کاری مناسب آن ناحیه)، دارای بیشترین مقدار تنش است و لذا در این ناحیه نیز، بستار ترک می‌خورد.

نمودارهای کرنش و تنش در سه حالت مومسان، لزج و کل، در جزء بحرانی، بر حسب زمان، بترتیب، در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ رسم شده‌اند. نتایج در شکل ۱۲ نشان می‌دهد که کرنش‌های لزج و مومسان در بستار به شکل فشاری‌اند. تغییرات کرنش مومسان در طول زمان، تقریباً خطی است اما کرنش لزج، با افزایش دما، افزایش می‌یابد و با کاهش دما، کم می‌شود. مقدار کرنش مومسان از مقدار کرنش لزج نیز، بیشتر است و تقریباً دو برابر آن می‌باشد. لذا همان‌گونه که در شکل ۱۳ مشخص است، تنش لزج مقدار کمی دارد و عملاً قسمت بیشتر تنش، وابسته به تنش مومسان است.

در بیشینه دما (ثانیه دهم، هنگام روشن بودن موتور)، تنش‌ها کاملاً فشاری است که به علت فشار احتراق می‌باشد. پس از آن، با خاموش شدن موتور و کاهش تدریجی دما، تنش‌ها به شکل کششی نشان داده شده است. علت آن نیز، وجود بارهای همبندی همچون پیچ‌های بستار می‌باشد. با توجه به مقادیر بدست آمده برای کرنش لزج، به طور کلی می‌توان گفت که این مقادیر، قابل صرف‌نظر کردن در شبیه‌سازی بستار نمی‌باشند.

- [11] T. Takahashi, K. Moizumi, M. Lida, K. Sasaki, S. Ohnuki, Effect of thermal fatigue phenomena of aluminum alloy by artificial ageing, SAE International, Paper No. 2002-01-0584, 2002
- [12] T. Takahashi, T. Nagayoshi, M. Kumano, K. Sasaki, Thermal plastic-elastic creep analysis of engine cylinder head, SAE International, Paper No. 2002-01-585, 2002
- [13] T. Takahashi, Y. Sugimura, K. Sasaki, Thermal plastic-elastic analysis in consideration of metallurgical microstructure, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 126, pp. 25-32, 2004
- [14] J.J. Thomas, L. Verger, A. Bignonnet, S.M. Borret, Thermo-mechanical design in the automotive industry, SAE International, Paper No. 2002-01-0659, 2002
- [15] J.J. Thomas, L. Verger, A. Bignonnet, E. Charkaluk, Thermo-mechanical design in the automotive industry, Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, Vol. 27, pp. 887-895, 2004
- [16] X. Su, M. Zubeck, J. Lasecki, C.C. Engler-Pinto Jr., C. Tang, H. Sehitoglu, J. Allison, Thermal fatigue analysis of cast aluminum cylinder heads, SAE International, Paper No. 2002-01-0657, 2002
- [17] F. Zieher, F. Langmayr, A. Jelatancev, K. Wieser, Thermal mechanical fatigue simulation of cast iron cylinder heads, SAE International, Paper No. 2005-01-0796, 2005
- [18] B. Barlas, D. Massinon, P. Meyer, G. Cailletaud, I. Guillot, G. Morin, A phenomenological model for fatigue life prediction of highly loaded cylinder heads, SAE International, Paper No. 2006-01-0542, 2006
- [19] S. Trampert, T. Gocmez, S. Pischinger, Thermo-mechanical fatigue life prediction of cylinder head in combustion engines, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 130, pp. 012806.1-10, 2008
- [20] G.H. Farrahi, M. Rezvani Rad, M. Azadi, Coating thickness effect on stress distribution of coated cylinder head considering residual stress, The Journal of Engine Research, Vol. 26, pp. 49-57, 2012
- [21] M. Rezvani Rad, M. Azadi, G.H. Farrahi, Thermal barrier coating effect on stress distribution of a diesel engine cylinder head, Student Conference on Mechanical Engineering, Paper No. STU2013-1533, 2013
- [22] F. Zahedi, M. Azadi, Low cycle fatigue life analysis of magnesium alloy diesel engine cylinder head, 20th Annual International Conference on Mechanical Engineering, Paper No. ISME2012-2063, 2012
- [23] M. Azadi, A. Mafi, M. Roozban, F. Moghaddam, Failure analysis of a cracked gasoline engine cylinder head, Journal of Failure Analysis and Prevention, Vol. 12, pp. 286-294, 2012

تشکر و قدردانی

نویسندگان مراتب تشکر و قدردانی خود را از شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو (ایپکو) برای حمایت مالی صورت گرفته در اجرای آزمون‌های خستگی، اعلام می‌دارند. همچنین، نویسندگان از همکاران خود در دانشگاه لئوبن اتریش نیز تشکر می‌نمایند.

References

- [1] L. Remy, J. Petit, Temperature-fatigue interaction, Elsevier Science Ltd and ESIS, 2002
- [2] M. Mokhtari Shirazabad, S.M.A. Boutorabi, M. Azadi, M. Nikravan, An investigation of high cycle fatigue behavior of magnesium alloy for cylinder head application, The Journal of Engine Research, Vol. 24, pp. 29-35, 2011
- [3] M. Azadi, M. Baloo, G.H. Farrahi, S.M. Mirsalim, A review of thermal barrier coating effects on diesel engine performance and components lifetime, International Journal of Automotive Engineering, Vol. 3, No. 1, pp. 305-317, 2013
- [4] M. Azadi, G.H. Farrahi, G. Winter, W. Eichseder, Experimental fatigue lifetime of un-coated and coated aluminum alloy under isothermal and thermo-mechanical loadings, Ceramics International, Vol. 39, pp. 9099-9107, 2013
- [5] M. Azadi, Effects of strain rate and mean strain on cyclic behavior of aluminum alloys under isothermal and thermo-mechanical fatigue loadings, International Journal of Fatigue, Vol. 47, pp. 148-153, 2013
- [6] M. Azadi, G.H. Farrahi, G. Winter, W. Eichseder, The effect of various parameters on out-of-phase thermo-mechanical fatigue lifetime of A356.0 cast aluminum alloy, International Journal of Engineering Transactions C: Aspects, Vol. 26, No. 12, pp. 873-883, 2013
- [7] M. Azadi, M. Mokhtari Shirazabad, Heat treatment effect on thermo-mechanical fatigue and low cycle fatigue behaviors of A356.0 aluminum alloy, Materials and Design, Vol. 45, pp. 279-285, 2013
- [8] G.H. Farrahi, M. Azadi, G. Winter, W. Eichseder, 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, DOI: 10.1111/ffe.12078, 2013
- [9] F. Koch, F. Maassen, U. Deuster, M. Loeprecht, H. Marckward, Low cycle fatigue of aluminum cylinder heads - Calculation and measurement of strain under fired operation, SAE International, Paper No. 1999-01-0645, 1999
- [10] F.J. Maassen, Simulation of endurance and thermo cycle testing for highly loaded HSDI diesel cylinder head, SAE International, Paper No. 2001-01-3226, 2001

[25] ABAQUS/CAE (v6.4), User's Manual, 2002

[26] T. Takahashi, K. Sasaki, Low cycle thermal fatigue of aluminum alloy cylinder head in consideration of changing metrology microstructure, Procedia Engineering, Vol. 2, pp. 767-776, 2010

[24] A. Deshpande, S.B. Leen, T.H. Hyde, Experimental and numerical characterization of the cyclic thermo-mechanical behavior of a high temperature forming tool alloy, ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 132, No. 5, pp. 1-12, 2010



The Journal of Engine Research

Journal Homepage: www.engineersearch.ir



Finite element analysis of thermal and mechanical stresses in diesel engine cylinder head using two-layer elastic-viscoplastic model

G.H. Farrahi^{1*}, M. Ghodrati², M. Azadi³

¹Sharif University of Technology, Tehran, Iran, farrahi@sharif.edu

²Sharif University of Technology, Tehran, Iran, ghodrati@mech.sharif.edu

³Irankhodro Powertrain Company (IPCO), Tehran, Iran, m_azadi@ip-co.com

*Corresponding Author, Phone Number: +98-21-66165533

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 15 September 2013

Accepted: 28 September 2013

Keywords:

Finite element analysis
Thermo-mechanical stress
Diesel engine cylinder head
Two-layer elastic-viscoplastic model

ABSTRACT

The objective of this article is to simulate thermal and mechanical behaviors of the diesel engine cylinder heads. The finite element analysis was performed using the ABAQUS software. Thus, to identify the material behavior, results of low cycle fatigue tests at various temperatures (stress-mechanical strain hysteresis curves at the mid-life cycle) were used and material constants of a two-layer elastic-viscoplastic model were extracted. Fatigue experiments were performed under the strain-controlled tensile-compressive condition on the aluminum-silicon-magnesium alloy (A356.0). Then, by using these material constants at 25, 200 and 250°C, thermal and mechanical stresses of the cylinder head were calculated. Validated results illustrated that the elastic-viscoplastic model has a proper accuracy to predict the hysteresis behavior of the aluminum alloy. Finite elements results showed that the location of cracking was in between valves. In addition, the calculated viscous strain could not be eliminated, although it was less than the plastic strain.

© Iranian Society of Engine (ISE), all rights reserved.