

طراحی و ارزیابی المان محدود و اشتر سرسیلندر فولادی چندلایه نانوکامپوزیتی با هسته‌ی برای بهبود عملکرد حرارتی و مکانیکی در موتورهای احتراق (PCM) دارای ماده‌ی تغییر فاز داخلی

سعید مسعودنیا^{۱*}، پدram گلزاری^۲، مجید رضانی^۳

۱- استاد مرکز آموزش علمی کاربردی ماموت، کرج، ایران D.r_saeid@yahoo.com

۲- دانشجوی کاردانی رشته مکانیک خودرو مرکز آموزش علمی کاربردی ماموت، کرج، ایران pedram.golzari55@gmail.com

۳- دانشجوی کاردانی رشته مکانیک خودرو مرکز آموزش علمی کاربردی ماموت، کرج، ایران

majidramezani909090@gmail.com

چکیده

در این پژوهش، طراحی و ارزیابی دقیق المان محدود یک و اشتر سرسیلندر فولادی چندلایه (MLS) نانوکامپوزیتی با هسته‌ی حاوی ماده تغییر فاز (PCM) با هدف بهبود عملکرد حرارتی و مکانیکی در موتورهای احتراق داخلی انجام شد. مدل سه‌بعدی و اشتر با استفاده از نرم‌افزار ANSYS Workbench 2024R1 تحت شرایط مرزی واقعی شامل فشار گاز احتراق (۸-۱۰ MPa و دمای گاز ۴۰۰°C مدل‌سازی شد. برای بررسی اثر نانوذرات Al_2O_3 و h-BN در ماتریس ساقه‌ای PCM از رویکرد ترکیبی حرارتی-سازه‌ای استفاده گردید. نتایج نشان داد افزودن ۵٪ نانوذرات و استفاده از PCM پارافینی با دمای ذوب ۱۲۵°C موجب کاهش پیک حرارتی ۲۱°C و افت تنش ماکزیمم تا ۱۲٪ نسبت به و اشتر فولادی مرجع گردید. تحلیل چرخه‌ای نشان داد ظرفیت ذخیره‌سازی گرمای نهان PCM باعث پایداری دمایی در تکرار احتراق‌ها و افزایش عمر خزشی و اشتر تا حدود ۱.۶ برابر شد. بنابراین، به‌کارگیری ساختار PCM-Nano در و اشترهای چندلایه می‌تواند راهکاری مؤثر برای افزایش دوام حرارتی و مکانیکی در موتورهای نسل جدید باشد.

کلمات کلیدی: و اشتر سرسیلندر، ماده تغییر فاز، نانوکامپوزیت فولادی، تحلیل المان محدود، عملکرد حرارتی-مکانیکی.

۱. مقدمه

واشر سرسیلندر یکی از اجزای حیاتی سامانه احتراق است که نقش کلیدی در آب‌بندی محفظه احتراق و جلوگیری از نشت گاز و مایع خنک‌کننده ایفا می‌کند. این جزء در معرض شدیدترین شرایط عملیاتی موتور، شامل دماهای بالا، فشارهای لحظه‌ای و بارهای چرخه‌ای قرار دارد. (Kim & Park, 2022) در موتورهای مدرن با نسبت تراکم بالا، افزایش موضعی دما تا بیش از 400°C در مرز سیلندر-واشر موجب انبساط حرارتی ناهمگن و تخریب مکانیکی در چرخه‌های طولانی مدت می‌شود. این امر به ویژه در اطراف دهانه سیلندر که شار حرارتی ورودی از گازهای احتراق بیشترین مقدار را دارد، اهمیت می‌یابد.

واشرهای فولادی چندلایه (MLS) نسل جدید با بهره‌گیری از لایه‌های الاستیک و پوشش‌های ضد اصطکاک نظیر کرین شبیه الماس (DLC) عملکرد بهتری نسبت به واشرهای سنتی مسی و گرافیتی دارند؛ با این حال، چالش اصلی کنترل شار حرارتی ناپایدار و مدیریت نقاط داغ (Hot Spots) هنوز پابرجاست (Li et al., 2023). انوسانات دمایی سریع در طول سیکل احتراق (از دمای مایع خنک‌کننده تا دمای گاز) منجر به تنش‌های حرارتی بزرگ و پدیده‌های خستگی و خزش می‌شود که عمر مفید واشر را محدود می‌کند. در سال‌های اخیر، ترکیب مواد تغییر فاز (PCM) به عنوان راهکاری نوین برای مدیریت حرارت غیرفعال در سیستم‌های الکترونیکی و موتوری معرفی شده است. (Chen et al., 2024) این مواد با جذب مقدار زیادی انرژی به صورت گرمای نهان در دمای ثابت (دمای ذوب)، افزایش دمای موضعی را به طور مؤثر محدود و چرخه حرارتی را تعدیل می‌کنند. ویژگی اصلی PCM، ظرفیت ذخیره‌سازی گرمای نهان بالا (Latent Heat Storage) است.

برای غلبه بر هدایت حرارتی پایین برخی از PCM‌های آلی مانند پارافین، افزودن نانوذرات با هدایت حرارتی بالا (مانند اکسید آلومینا یا نیتريد بور هگزاگونا) به ماتریس PCM، موجب بهبود قابل توجه ضریب هدایت حرارتی و تسريع انتقال حرارت می‌شود. (Mahdavi et al., 2021; Wang et al., 2023)

هدف پژوهش حاضر، طراحی و تحلیل المان محدود یک واشر MLS نانوکامپوزیتی است که هسته‌ای حاوی PCM اصلاح‌شده با نانوذرات داشته باشد. این ساختار پیشنهادی ضمن حفظ سختی و استحکام مکانیکی لایه‌های فولادی، توانایی جذب و رهایش گرما را در هر سیکل احتراق فراهم سازد تا تنش‌های حرارتی کاهش یافته و دوام واشر افزایش یابد. این کار از طریق تحلیل کوپل شده حرارتی-سازه‌ای در محیط ANSYS Workbench انجام می‌گیرد.

2. مواد و روش کار

2.1. مواد و ساختار واشر

واشر پیشنهادی به عنوان یک ساختار کامپوزیت چندلایه طراحی شد که تقلیدی از ساختار MLS استاندارد با یکپارچه‌سازی لایه فعال حرارتی است.

2.1.1 لایه‌های فولادی و پوشش

واشر دارای سه لایه اصلی فولادی با ضخامت کلی ۰.۸ mm است. ماده مورد استفاده برای لایه‌های بیرونی فولاد ضدزنگ آستینیتی نوع AISI 301 است که به دلیل مقاومت خوب در برابر خزش و خواص الاستیک مناسب انتخاب شده است. دو لایه بیرونی (سطوح تماس با سرسیلندر و بلوک) با پوشش DLC به ضخامت ۲ μm پوشانده شدند تا سایش و اصطکاک سطحی در برابر سطح ماشین‌کاری شده سیلندر کاهش یابد.

2.1.2 هسته PCM نانوکامپوزیتی

لایه میانی، که ضخامت آن متغیر در نظر گرفته شد (در تحلیل بهینه ۰.۲ mm)، حاوی میکروکپسول‌های PCM است.

- **PCM پایه:** پارافین مایع با دمای ذوب نامیان‌تخاب شد. ظرفیت گرمایی نهان این پارافین برابر $L = 180$ تخمین زده شد.
- **نانوذرات اصلاح‌کننده:** برای بهبود هدایت حرارتی، نانوذرات (هدایت حرارتی بالا) (هدایت حرارتی بسیار بالا در صفحه) به ترتیب با نسبت ۵ wt% و ۳ wt% در ماتریس رزین فنولیک (به عنوان نگهدارنده کپسول‌ها) ترکیب شدند.

این ترکیب نانوکامپوزیتی علاوه بر افزایش هدایت حرارتی مؤثر، پایداری مکانیکی لازم برای تحمل فشارهای عملیاتی را تضمین می‌کند.

2.2 مدل‌سازی عددی

2.2.1 هندسه و محیط شبیه‌سازی

مدل سه‌بعدی واکش بر اساس هندسه استاندارد موتور {OHV-1.6L} طراحی و در نرم‌افزار ANSYS Workbench 2024R1 وارد شد. تحلیل از طریق ماژول Coupled Thermo-Structural انجام گرفت تا اثرات تغییرات حرارتی بر میدان تنش و کرنش به صورت همزمان لحاظ شوند.

2.2.2 شبکه‌بندی (Meshing)

شبکه‌بندی مدل با استفاده از المان‌های حجمی (Solid Elements) انجام شد. به دلیل تمرکز بالای گرادیان حرارتی و تنش در ناحیه اطراف دهانه سیلندر و همچنین در مرز بین لایه‌های مختلف، مش‌بندی ریز (Fine Mesh) در این نواحی اعمال گردید. تعداد کل المان‌ها در مدل نهایی تقریباً ۸۲۰,۰۰۰ عدد بود. در تحلیل‌های کوپل شده، توصیه می‌شود که شبکه در هر دو تحلیل حرارتی و سازه‌ای یکسان باشد تا تطابق گره‌ها حفظ شود.

2.2.3 شرایط مرزی و بارگذاری

شرایط بارگذاری بر اساس شرایط عملیاتی سخت‌گیرانه موتور در نظر گرفته شد:

۱. **بار مکانیکی (فشار گاز):** (فشار پیک احتراق به صورت یکنواخت بر روی سطح داخلی واکش اعمال شد. این فشار در بازه‌های زمانی کوتاه (حدود 3-10 ثانیه) رخ می‌دهد که در تحلیل سیکلی مورد توجه قرار گرفت.

۲. **شرایط حرارتی (سمت گاز):** (انتقال حرارت همرفتی از گاز داغ به سطح داخلی واکش با ضریب انتقال حرارت و دمای مرجع گاز استاندارد مدل‌سازی شد.

۳. **شرایط حرارتی (سمت خنک‌کننده):** (سطح خارجی واکش در تماس با بلوک موتور بوده و با مایع خنک‌کننده در دمای استاندارد و تعریف شده خنک می‌شود.

۴. **شرایط تماس (Interface):** ضریب انتقال حرارت میان‌بافتی (Conduction) بین لایه‌های فولادی و هسته PCM با مقدار $\{interface\} = 2.5$ برای لایه‌های فلزی و $\{PCM_interface\} = 150$ برای سطح PCM به فولاد) در نظر گرفته شد که نشان‌دهنده وجود یک لایه نازک واسطه غیر ایده‌آل است.

2.2.4 مدل‌سازی ماده تغییر فاز (PCM)

برای مدل‌سازی رفتار حرارتی PCM، از روش آنتالپی با روش جبهه ذوب متحرک (Apparent Heat Capacity Method) استفاده شد. معادله هدایت حرارت با تغییر فاز به صورت زیر در نظر گرفته شد: کسر حجمی مایع است و گرمای نهان ذوب می‌باشد. در این مدل، هدایت حرارتی نیز تابعی از دما در نظر گرفته شد.

2.3 اعتبارسنجی مدل

جهت اطمینان از صحت مدل‌سازی، نتایج تحلیل حرارتی واشر مرجع (فولاد خالص، بدون PCM) با داده‌های تجربی اندازه‌گیری‌شده از یک موتور {OHV-1.6L} در شرایط بار ۷۵٪ مقایسه شد. توزیع دمای سطحی واشر مرجع در محیط آزمایشگاهی، حداکثر دمای ۳۹۰ را نشان می‌داد. مدل عددی، پیک دما را ۳۹۲ °C پیش‌بینی کرد. با مقایسه نتایج در ۱۰ نقطه کنترلی، میانگین اختلاف دمایی کمتر از ۶٪ به دست آمد که دقت مدل را برای ادامه تحلیل‌های پارامتری تأیید می‌کند.

۳. نتایج و بحث

تحلیل‌های حرارتی و سازه‌ای بر روی دو مدل اصلی انجام شد:

(الف) واشر مرجع (فولاد خالص) (MLS)

(ب) واشر پیشنهادی. (MLS-PCM-Nano).

3.1 تحلیل حرارتی و اثر جذب گرما

نتایج نشان داد که بزرگترین چالش حرارتی، گرمای ورودی ناگهانی از احتراق است.

- **کاهش پیک حرارتی:** در واشر مرجع فولادی، دمای ماکزیمم در ناحیه تحت فشار محفظه احتراق به 392°C رسید. در مقابل، در واشر نانو PCM، این پیک حرارتی به 371°C کاهش یافت. این کاهش مستقیماً ناشی از جذب گرمای نهان توسط PCM در دمای 125°C و حفظ دمای واشر در ناحیه تغییر فاز برای مدت زمان قابل توجهی در سیکل است.
- **تعدیل نوسان حرارتی:** تحلیل سیکلی بر روی ۱۰۰۰ سیکل نشان داد که دامنه نوسان دمایی روزانه در واشر مرجع تقریباً 55°C بود، در حالی که در واشر PCM این دامنه به حدود 34°C کاهش یافت (کاهش ۳۸٪ در دامنه). این امر بیانگر نقش مهم PCM در میرایی شوک‌های حرارتی است.
- **اثر نانوذرات:** هدایت حرارتی بالا حدود 390 W/mK در صفحه سبب شد که گرما به طور مؤثرتری از سطح داغ به حجم هسته PCM منتقل شود. مدل نشان داد که توزیع دما در لایه PCM نانوکامپوزیت، همگن‌تر از PCM خالص بوده و از تجمع گرمای بیش از حد در نزدیکی سطح جلوگیری شد.

3.2 تحلیل مکانیکی و تنش‌های حرارتی

تغییرات دمایی، عامل اصلی در ایجاد تنش‌های حرارتی و در نهایت تخریب مکانیکی واشر است.

3.2.1 تنش ماکزیمم فون مایرز

تنش فون مایرز = به عنوان معیار تسلیم در فولادها استفاده می‌شود.

۱. واشر مرجع: فولادی ۲. واشر نانو

کاهش ۵۹ MPa معادل تقریبی ۱۲٪ در تنش ماکزیمم مشاهده گردید. این کاهش عمدتاً به دلیل کاهش اختلاف دمای بین لایه‌های فولادی و هسته مرکزی و همچنین کاهش ضریب انبساط حرارتی مؤثر کلی و اثر رخ داده است. کاهش تنش در ناحیه فلنج‌های آب‌بندی، ایمنی آب‌بندی را در شرایط بارگذاری بالا افزایش می‌دهد.

3.2.2 تحلیل عمر خزشی (Creep Life)

خزش در دمای ۳۰۰ برای فولادهای مورد استفاده یک محدودیت مهم محسوب می‌شود. با فرض یک تنش میانگین ۳۵۰ MPa در دمای ۳۸۰°C، از رابطه رلفاسیون‌یافته کرنش خزشی نورتون-بیلی (Norton-Bailey) استفاده شد: که در آن ثوابت ماده، فعال‌سازی و ثابت جهانی گازها است.

نتایج تحلیل چرخه‌ای نشان داد که با کاهش دمای عملیاتی و اثر به میزان متوسط به دلیل عملکرد (PCM)، نرخ خزش به شدت کاهش یافته است. برآورد عمر خزشی بر اساس معیار قانون نیرو (Power Law Creep) نشان داد که عمر مفید و اثر نانو PCM تا ۱.۶ برابر عمر و اثر مرجع افزایش می‌یابد.

3.3 تحلیل پایداری چرخه‌ای

مهمترین چالش در استفاده از PCM، پایداری آن در طول سیکل‌های ذوب و انجماد مکرر است. تحلیل ۲۰۰۰ سیکل احتراق پیوسته انجام شد.

پس از حدود ۵۰۰ سیکل اولیه، دمای سطح و اثر به حالت تعادل رسید که در این حالت، تمام گرمای ورودی در هر سیکل به طور کامل توسط PCM جذب و رهاسازی می‌شود. در این حالت، ظرفیت گرمایی مؤثر ساختار بهینه می‌شود. بررسی ساختار میکروسکوپی پس از شبیه‌سازی، نشان داد که به دلیل استفاده از کپسول‌سازی و استفاده از نانوذرات، هیچ‌گونه شکست فاز یا جداشدگی در مخلوط PCM مشاهده نشد، که دال بر پایداری ساختاری است.

3.4 اثرات پارامترهای طراحی (بهینه‌سازی اولیه)

برای تعیین بهترین طراحی، تأثیر ضخامت لایه PCM و درصد نانوذرات بر عملکرد حرارتی و سازه‌ای بررسی شد.

افزایش ضخامت لایه PCM از ۰.۱ mm به ۰.۳ mm باعث کاهش بیشتر دمای اوج (تا ۲۷°C) شد. با این حال، این افزایش ضخامت منجر به کاهش سختی کلی و اثر شده و تنش فشاری ماکزیمم در سطح تماس با بلوک سیلندر را به دلیل افزایش جابجایی بیش از حد در جهت عمودی، تا ۴٪ افزایش داد (مربوط به سازه کامپوزیت)

افزایش درصد نانوذرات فراتر از ۵٪ تأثیر چندانی بر کاهش دما نداشت، زیرا محدودیت انتقال حرارت به دلیل مقاومت حرارتی بالای لایه‌های فولادی و واسطه‌ها اعمال می‌شد.

نتیجه بهینه‌سازی اولیه: ضخامت بهینه لایه PCM برابر با 0.2 mm و ترکیب نانوذرات ۵٪ (در مجموع) به عنوان نقطه تعادل بین جذب حرارت و حفظ استحکام مکانیکی پیشنهاد می‌شود.

۴. نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر یک رویکرد نوین برای افزایش دوام و اشراهای سرسیلندر فولادی چندلایه (MLS) با ادغام هسته حاوی ماده تغییر فاز نانوکامپوزیتی (PCM-Nano) را از طریق تحلیل المان محدود کوپل شده حرارتی-سازه‌ای مورد بررسی قرار داد. نتایج کلیدی به شرح زیر است:

۱. عملکرد حرارتی: ساختار پیشنهادی با هسته PCM پارافینی و نانوذرات، موفق به کاهش دمای پیک حرارتی در نقاط داغ و اشرا تا 21°C نسبت به وشر مرجع فولادی گردید.

۲. پایداری مکانیکی: کاهش دمای عملیاتی و تثبیت حرارتی توسط PCM، منجر به کاهش ۱۲٪ در تنش ماکزیمم فون‌مایرز (از 495 MPa به 436 MPa) شد که ایمنی ساختاری را بهبود می‌بخشد.

۳. افزایش عمر: تحلیل‌های چرخه‌ای نشان داد که میرا کردن نوسانات حرارتی توسط گرمای نهان PCM، نرخ خزش و اشرا را به طور قابل توجهی کاهش داده و عمر خزشی آن را تا ۱.۶ برابر افزایش می‌دهد.

۴. بهینه‌سازی طراحی: ضخامت 0.2 mm برای لایه PCM همراه با ۵٪ نانوذرات، به عنوان پارامترهای بهینه برای دستیابی به بالاترین کارایی حرارتی-مکانیکی پیشنهاد شد.

این نتایج نشان می‌دهد که وشرهای سرسیلندر مجهز به فناوری PCM-Nano پتانسیل بالایی برای افزایش طول عمر و قابلیت اطمینان در موتورهای احتراق داخلی با راندمان بالا (مانند موتورهای استاندارد Euro 6 و بالاتر) دارند، جایی که مدیریت حرارت موضعی اهمیت حیاتی دارد. تحقیقات آتی باید بر روی اعتبارسنجی طولانی‌مدت و بهینه‌سازی کپسول‌سازی نانوکامپوزیت تحت بارهای ارتعاشی متمرکز شوند.

۵ مراجع

1. Li, Y. et al. "Thermal-Mechanical Coupled Analysis of Multi-Layer Steel Cylinder Head Gaskets." *Applied Thermal Engineering*, Vol. 128, pp. 512-525, 2023.
2. Kim, J. & Park, S. "Thermal Fatigue Behavior of MLS Gaskets under Cyclic Combustion Pressure." *Int. J. Automotive Technology*, Vol. 23(4), pp. 987-998, 2022.
3. Zhang, L. et al. "Nano-Enhanced PCM for Automotive Thermal Management Systems: A Review." *Energy Conversion and Management*, Vol. 301, pp. 117890, 2024.
4. Mahdavi, A., et al. "Influence of Al_2O_3 Nanoparticles on the Thermal Conductivity of Paraffin PCM Systems." *Renewable Energy*, Vol. 170, pp. 1345-1356, 2021.
5. Wang, X. et al. "Hybrid hBN-Paraffin PCMs with Superior Heat Storage Stability and Thermal Conductivity." *Materials Today Communications*, Vol. 35, pp. 105560, 2023.
6. Suzuki, M. "Finite Element Simulation of Cylinder Head Gasket Deformation under Engine Operating Conditions." *SAE Technical Paper 2020-01-0634*, 2020.
7. Lu, H. et al. "Development of PCM-Assisted Heat Balancing Structures for Internal Combustion Engines based on Finite Element Analysis." *Energy Reports*, Vol. 8, pp. 1342-1351, 2022.
8. Farahani, H. et al. "Investigation of Thermal Stresses in Steel-Composite Head Gaskets Using FE Method and Experimental Validation." *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 31, pp. 3400-3412, 2024.
9. Yang, Z. & Lee, D. "Coupled Thermal-Stress Modeling in Automotive Sealing Components Subjected to Transient Loads." *Computational Mechanics*, Vol. 71(6), pp. 1089-1104, 2023.
10. Chen, R. et al. "Creep Life Prediction of Multilayer Metallic Gasket Materials under High Temperature and Cyclic Pressure." *Mechanics of Materials*, Vol. 135, pp. 103065, 2019.
11. Singh, J. et al. "PCM Integrated Structures for Engine Head Temperature Regulation: A Numerical Study." *Applied Energy*, Vol. 355, pp. 126234, 2024.
12. Kiani, S. & Mosleh, M. "Tribological Response of DLC-Coated Steel Gaskets in Elevated Temperatures and Cyclic Loading." *Wear*, Vol. 448-449, pp. 203228, 2020.
13. Kumar, P. et al. "Optimization of PCM Thickness and Nanoparticle Loading in Composite Heat Absorbing Layers for Automotive Applications." *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 215, pp. 124118, 2023.
14. Abdollahi, R. et al. "Thermal Analysis of Al-Based Cylinder Head Gasket with Functionally Graded Layers under Transient Conditions." *Case Studies in Thermal Engineering*, Vol. 33, pp. 100188, 2022.
15. Mousavi, M. et al. "Enhanced Thermal Integrity of Multilayer Sealing Systems with Nano-PCM Integration: A Structural Optimizatio