

تحلیل تنش‌های تماسی و رفتار غیرخطی لایه‌ی بستار چند لایه فولادی به کمک روش اجزای محدود

محسن قاسمی*

کارشناس ارشد مهندسی مکانیک (خودرو)، دانشگاه علم و صنعت ایران

کارشناس مرکز تحقیقات موتور ایران خودرو (ایپکو)
m_ghasemi@ip-co.com

دکتر علیرضا نورپور

استادیار دانشگاه علم و صنعت ایران
noorpoor@iust.ac.ir

*نویسنده مسوول / پذیرش اولیه مقاله: ۱۳۸۸/۵/۲۴ پذیرش نهایی: ۱۳۸۸/۱۱/۲۰
شماره مقاله: ۸۸۱۰۹

چکیده

لایه‌ی بستار چندلایه فولادی به طور گسترده در آب‌بندی موتورهای احتراق داخلی استفاده می‌شود. بنابراین اثر متقابل بین بدنه موتور، لایه‌ی بستار و بستار از نظر عملکردی بسیار مهم می‌باشد. برای جلوگیری از فرار گاز از استوانه‌ها در همه شرایط عملکردی موتور، هم نیروی کششی مناسب پیچ‌ها و هم طراحی درست لایه‌ی بستار جزء موارد مهم در افزایش بازده آب‌بندی لایه‌ی بستار می‌باشند. در این تحقیق از روش اجزای محدود برای بررسی اثر متقابل بین بدنه موتور، لایه‌ی بستار و بستار استفاده شده است. بعلاوه هم توزیع فشار تماسی بر روی لایه‌ی بستار برای بررسی آب‌بندی و هم تنش‌های بستار و بدنه موتور در محل تماس آنها با لایه‌ی بستار در شرایط عملکردی مختلف مانند هم‌بندی سرد^۱، هم‌بندی گرم^۲، روشن کردن سرد^۳، احتراق^۴، سرد شدن موتور تا ۲۰+°C و سرد شدن موتور تا ۲۵°C محاسبه شده‌اند. نتایج حاصل از حل عددی به کمک حسگر کاغذی ورق فوجی و آزمون حرارتی صحنه‌گذاری شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که توزیع فشار آب‌بندی بر روی لایه‌ی بستار به طور گسترده‌ای وابسته به نیروی پیش‌بار پیچ‌ها می‌باشد. بعلاوه مکان ضعیف‌ترین فشار تماسی بر روی لایه‌ی بستار در نتیجه بار حرارتی تغییر می‌کند.

عوامل بسیاری روی نرخ نشستی لایه‌ی تأثیر می‌گذارند که از جمله آنها سختی مواد و تنش‌ها در محل تماس سطوح هم‌بندی می‌باشند [۳]. شبیه‌سازی عددی، مهندس را قادر می‌سازد تا تأثیر بارگذاری‌های مختلف و شرایط عملکردی متفاوت بر روی لایه‌ی را بررسی کند. این امر احتمال طراحی اولیه لایه‌ی بستار را به صورت موفقیت آمیز، افزایش می‌دهد [۴].

هر دو مورد طراحی و توسعه موتور خودروها دارای فرآیندهای پیچیده‌ای هستند. برای رسیدن به بهترین عملکرد موتور در هر شرایط عملکردی تعداد زیادی از ابزارهای تحلیلی و روش‌های آزمایشگاهی برای بدست آوردن عوامل بهینه موتور، استفاده می‌شوند. نتایج محاسبات عددی بیانگر توزیع فشار تماسی بر روی لایه‌ی و فرار گازها از موتور است که نه تنها بر بازده خروجی و قدرت موتور تأثیر می‌گذارد، بلکه بر آلودگی محیط نیز

کلیدواژه‌ها: بستار، لایه‌ی بستار، آب‌بندی، نیروی پیش‌بار پیچ، فشار تماسی

۱- مقدمه

لایه‌های بستار چندلایه در حال حاضر به‌طور گسترده در موتورهای احتراق داخلی بکار برده می‌شوند. لایه‌ها از چندین لایه فلزی نازک تشکیل شده‌اند که جنس آنها فولاد ضدزنگ می‌باشد [۱]. لایه‌ی بستار خوب باید بتواند آب‌بندی محفظه احتراق، راهگاه مایع خنک‌کاری و روغن را در محدوده وسیعی از عملکرد موتور بخوبی انجام دهد. برای تحقق این امر باید مطمئن شد که توزیع فشار درستی در تمام سطوح آب‌بندی بویژه بر روی لایه‌ی و محدوده بین استوانه‌ها برقرار است [۲].

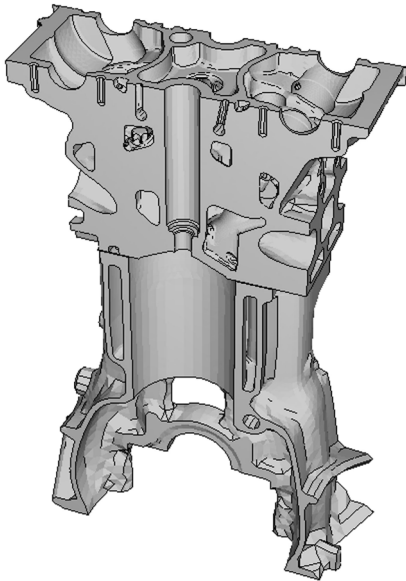
1- Cold Assembly
2- Hot Assembly
3- Cold Start

4- Firing
5- Cool Down to 20°C
6- Cool Down to 25°C

بررسی آب‌بندی، رفتار لایه‌بستر چندلایه فولادی و رفتار تنش کرنش بستر و بدنه موتور در محل تماس آنها با لایه تحت شرایط بارگذاری مختلف انجام شده است. نتایج این تحقیق می‌تواند به عنوان منبعی برای طراحی لایه‌بستر چندلایه استفاده شود.

۲- الگوی اجزای محدود

شبیه‌سازی هندسه بستر، لایه و بدنه موتور در برنامه Pro/E انجام شده است. الگوی بدنه موتور استفاده شده متعلق به موتور ملی با پرخوران که نقشه یک چهارم آن در شکل ۱ مشخص می‌باشد.



شکل ۱ نقشه هندسی یک چهارم موتور

Initial thickness	Application
1 layer 0.32-0.40 mm	Gasoline engines with low demands and stresses
2 layers 0.48-0.63 mm	Gasoline engines with higher demands and stresses
0.48-0.68 mm	Gasoline engines with higher demands and stresses
0.40-0.50 mm	Gasoline engines with lower demands and stresses
3 layers 0.50-0.80 mm	Gasoline engines with lower demands and stresses
0.60-0.75 mm	Gasoline engines with high demands and stresses
0.65-0.90 mm	Gasoline engines with higher demands and stresses
0.80-1.85 mm	Diesel engines with low demands and stresses
0.70-1.60 mm	Diesel engines with low demands and stresses
4 layers 1.30-2.10 mm	Diesel engines with higher demands and stresses
5 layers 1.20-2.45 mm	High-end diesel and gasoline engines with high demands and stresses

شکل ۲ انواع لایه‌ها در لایه‌بستر چند لایه [۱۷]

مؤثر هستند. بنابراین تضمین هم‌بندی صحیح بستر، لایه و بدنه موتور به صورت قابل اطمینان در روش‌های تحلیلی و آزمون بسیار مهم می‌باشد [۵]. علاوه کاهش زمان و هزینه در فرآیند توسعه موتورهای جدید باید در نظر گرفته شود. همچنین برای محاسبه تنش‌های حرارتی در سطوح آب‌بندی، تحلیل انتقال حرارت باید قبل از تحلیل تنش برای بدست آوردن توزیع دما در ساختار موتور، انجام شود. به علت سطح مشترک بین بستر و لایه و همچنین سطح مشترک بین بستر و پیچ‌ها، اندرکنش تماسی بوجود می‌آید. از روش اجزای محدود برای حل کردن مسائل وابسته به سطوح تماس با هندسه پیچیده استفاده می‌شود.

ویلسون و پرسون^۱ راه‌حلی برای تحلیل اجزای محدود ارائه کردند [۶]. علاوه چنان و توبا^۲ [۷] و اُتبا^۳ [۸] روش ویلسون و پرسون را توسعه دادند و از این روش بهینه شده برای حل برخی مسائل تماسی استفاده کردند. در فرآیندهای آب‌بندی مسائل مکانیکی، تماس حرارتی نیز باید مورد توجه باشد. رفتار تماس حرارتی را بسیاری از محققان در گذشته مطالعه کرده‌اند. هُوارد^۴ انتقال حرارت را از سطحی که تماس نوسانی با هم دارند مطالعه کرد [۹]. فلتچر و مدهاسودانا^۵ به طور خلاصه سازوکار حل و معادله‌های وابسته به تماس حرارتی را معرفی کردند [۱۰].

میجاروآورا^۶ مسائل فیزیکی را در زمینه سازوکار تماسی بررسی کردند [۱۱]. روچوسکا و بالندرا^۷ ضریب رسانایی حرارتی بین دو سطح در حال تماس اندازه گرفتند [۱۲]. زانگ و کونگ^۸ روش جدیدی از شبیه‌سازی مقاومت تماس حرارتی ارائه کردند [۱۳]. بلیتسچکو و نیل^۹ روش‌های عددی را با قاعده پین بال^{۱۰} برای بررسی سریع دامنه تماس توسعه دادند. از قاعده پین بال می‌توان برای ساده‌سازی روش‌های جستجو برای تماس و تخمین نفوذ استفاده نمود [۱۴].

از دیدگاه مسائل تماسی، رفتارهای هدایت حرارتی بین بدنه موتور و اجزای دیگر به‌طور گسترده‌ای با تحلیل اجزای محدود بررسی شده است. چیان^{۱۱} الگوی اجزای محدود ساختار موتور را با دو میل بادامک و ۱۶ دریچه ارائه کرد. آنها همچنین از روش‌های محاسبات مؤثر که در برنامه Msc/Nastran وجود دارد، برای پیش‌بینی نتایج تحلیل حرارتی و تحلیل تنش کرنش در شرایط بارگذاری و عملکردی مختلف استفاده کردند [۱۵].

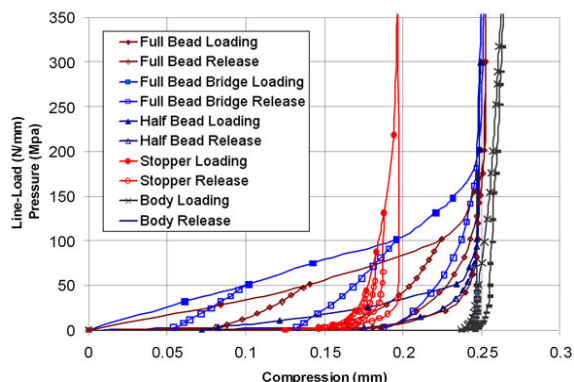
نیروی پیش‌بار پیچ‌ها بازده آب‌بندی لایه را بین بستر و بدنه موتور ابقاء می‌کند. بنابراین اعمال صحیح نیروی پیش‌بار پیچ‌ها در شبیه‌سازی عددی بسیار مهم می‌باشد. مُتنگومری^{۱۲} شش نوع دیدگاه مختلف برای شرح دادن نیروی پیش‌بار پیچ‌ها تهیه کرد [۱۶].

مورد دیگری که بر روی بازده آب‌بندی لایه تأثیر می‌گذارد، رفتار مواد لایه می‌باشد. راب^{۱۳} پاسخ به پدیده غیرخطی بودن لایه را بوسیله یک الگوی ساده و با یک درجه آزادی در برای ضخامت لایه و به کمک عناصر تحلیلی برنامه ABAQUS و منحنی فشار بر حسب جایجایی بدست آمده از آزمایش، تحلیل کرد. بدین ترتیب نیاز به حافظه برای تحلیل، به مقدار چشمگیری کاهش می‌یابد.

در این تحقیق از برنامه اجزای محدود تجاری ABAQUS برای شبیه‌سازی عددی استفاده شده است. این تحقیق بر پایه نظریه تماس و تنش‌های حرارتی به منظور

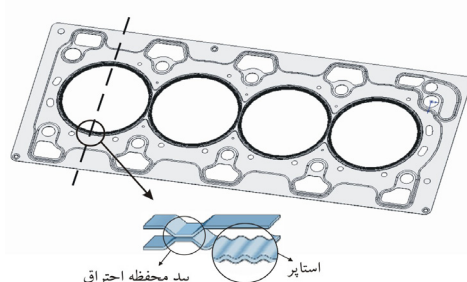
1- Wilson and person
2 - Chan and tuba
3 - Ohte
4 - Howord
5 - Fletcher and medhasudana
6 - Mijar and arora
7 - Rosochowska&Balendra

8 - Zhang&Cong
9 - Belytschko&Neal
10 - Pinbal
11 - Chyuan
12 - Montgomery
13 - Roub



شکل ۴ مشخصات مواد لایه‌ی بستار (رفتار لایه‌ی)

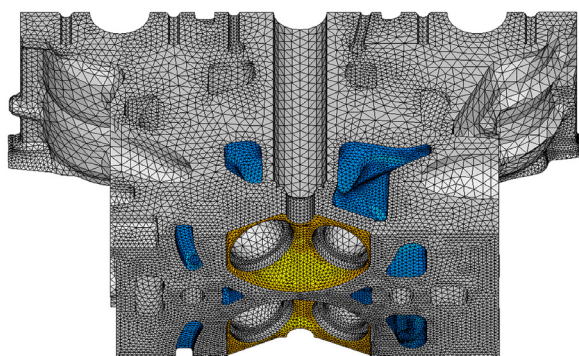
در لایه‌ی بستار چندلایه فولادی برجستگی‌ها و فرورفتگی‌های فلزی به صورت متقابل برهم فشرده شده‌اند و سطح آبندی را بوجود آورده‌اند. این عناصر به دلیل خاصیت فنری قوی، نیروی بسته شدن پیچ‌ها را به طور مستقیم به نیروی آبندی تبدیل می‌کند و بدین ترتیب منجر به کاهش اتلاف نیروی پیچ‌ها می‌شوند. انواع لایه‌ها در لایه‌ی بستار چندلایه در شکل ۲ و لایه‌ی بستار دولایه فولادی با شبکه‌بندی^۱ بکار رفته در آن که در این تحقیق استفاده شده، در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳ لایه‌ی بستار دو لایه‌ی فولادی

۴- فرضیات کلی

- ۱- رفتار مواد در لایه‌ی به دلیل نوع طراحی و هندسه آن به صورت غیرخطی و در بستار و بدنه موتور به صورت خطی است.
 - ۲- ضریب انعطاف‌پذیری مواد وابسته به دما است.
 - ۳- پیش‌بار ناشی از جا زدن نشیمنگاه و راهنمای دریچه برای محاسبه تنش‌های اولیه در بستار در نظر گرفته شده است.
 - ۴- تمرکز تنش ناشی از انحنایها و سوراخ‌ها وجود دارد.
 - ۵- از کل ساختار موتور شامل بدنه، لایه‌ی، بستار، نشیمنگاه و هادی دریچه برای ایجاد شرایط واقعی و شبیه‌سازی برهم‌کنش بین بدنه، لایه‌ی و بستار در تحلیل انتقال حرارت و تنش استفاده شده است.
 - ۶- از فرض تقارن استفاده شده و یک‌چهارم بدنه موتور به دلیل کاهش زمان محاسبات در نظر گرفته شده است.
- شکل‌های ۵-۸ نقشه‌ی اجزای محدود یک‌چهارم موتور را بعد از اینکه به قدر کافی اصلاح شده است، نشان می‌دهد.



شکل ۵ نقشه‌ی شبکه‌بندی شده‌ی بستار

۳- مشخصات مواد

مشخصات مواد بکار رفته در اجزای موتور مطابق جدول ۱ می‌باشد. مشخصه‌ی مواد لایه‌ی بستار که به صورت غیرخطی می‌باشد در شکل ۴ نشان داده شده است. این رفتار غیرخطی از طریق آزمون فشار بدست می‌آید. بدین صورت که هر کدام از شبکه‌بندی بکار رفته در لایه‌ی چندلایه تحت فشار قرار می‌گیرد و منحنی فشار بر حسب جابجایی (فشرده‌گی) آن به‌دست می‌آید. به دلیل نوع طراحی، هندسه لایه‌ی و شبکه‌بندی به‌کار رفته در آن، رفتار بدست آمده به صورت غیرخطی می‌باشد.

جدول ۱ مشخصات مواد

	بستار	بدنه	نشیمنگاه دریچه	هادی دریچه
E	۷۳/۵۹ (۲۰-۲۵۰ °C)	۱۲۰	۲۰۱/۱۸۵ (۲۰-۳۵۰ °C)	۱۱۴
ν	۰,۳	۰,۲۸	۰,۲۸	۰,۲۱
σ_y [UTS]	۱۵۰ [۲۴۵] (۲۰ °C)	[۲۵۰] ۱۷۰	-	-
k	۱۴۰	۴۸,۵	۲۵,۲	۲۳,۸/۲۱,۹۵ (۲۰-۴۰۰ °C)
α	۲۲/۲۳ (۲۰-۳۰۰ °C)	۱۱	۱۱/۱۱,۵ (۲۰-۴۰۰ °C)	۱۱,۲/۱۳,۱ (۲۰-۴۰۰ °C)

هر یک از متغیرهای جدول مطابق تعاریف زیر می‌باشند:

$$E: [\text{MPa} \times 10^2] \text{ ضریب انعطاف پذیری}^۱$$

$$\nu: \text{ضریب پواسون}^۲$$

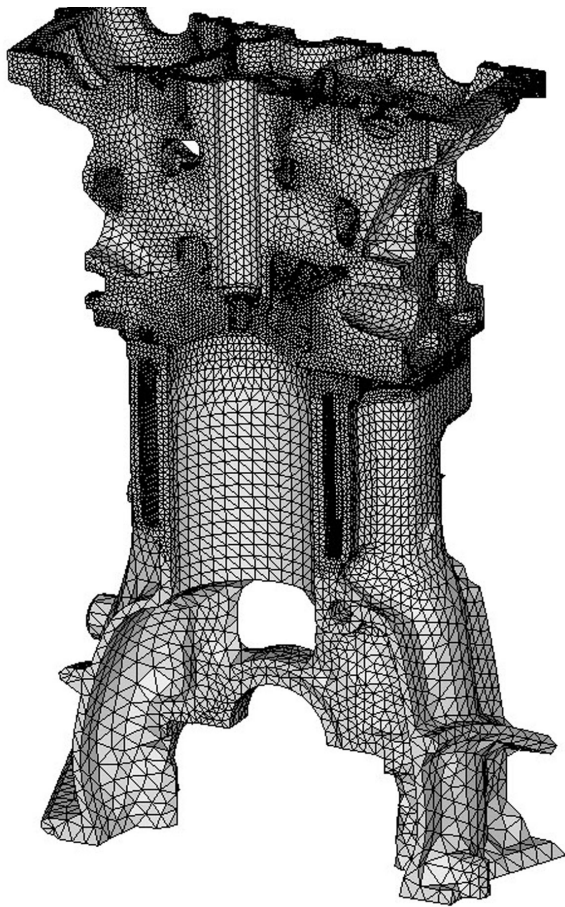
$$\sigma_y: [\text{MPa}] \text{ حد تسلیم}^۳$$

$$k: [\text{W/mK}] \text{ ضریب هدایت (رسانایی)}^۴$$

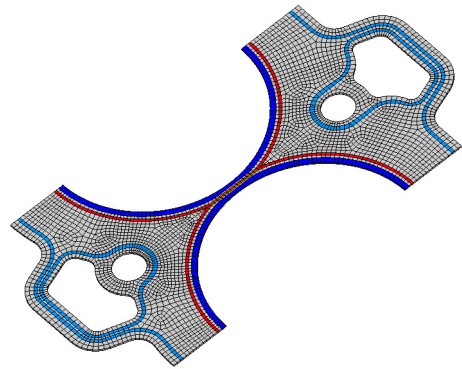
$$\alpha: [10^{-6} - 10^{-5}/\text{K}] \text{ ضریب انبساط حرارتی}^۵$$

1- Elements
2- Young's Modulus(Elasticity)
3- Poisson Ratio

4- Yield Limit
5- Conductivity
6- Thermal Expansion



شکل ۸ نقشه شبکه‌بندی شده یک چهارم موتور



شکل ۶ نقشه شبکه‌بندی شده لایه بستر



شکل ۷ نقشه شبکه‌بندی شده راهگاه مایع خنک‌کاری

بار کامل بدست می‌آید. ضریب انتقال حرارت از اطلاعات آزمایشگاهی و تحلیل الگوی یک‌بعدی بدست آمده است. در این روش دما در حالت واقعی اندازه‌گیری شده و با دمای حاصل از تحلیل مقایسه می‌شود. این روش آنقدر تکرار می‌شود تا نتایج تحلیلی با دمای اندازه‌گیری شده آزمایشگاهی مطابقت داشته باشد. بیشترین دما در بستر در سطح اطراف شمع (شکل ۹) و در بدنه موتور در بالای دیواره استوانه دیده می‌شود (شکل ۱۰).

– صحنه‌گذاری:

برای صحنه‌گذاری بر نتایج عددی از نتایج آزمون حرارتی استفاده شده است (شکل ۱۱).

شکل‌های ۱۲ و ۱۳ محل قرارگیری حسگرها را در منطقه بالای محفظه احتراق و دیواره استوانه نشان می‌دهد.

شکل ۱۴ مقایسه بین دمای بدست آمده از طریق آزمون حرارتی و شبیه‌سازی عددی را در سطح محفظه احتراق نشان می‌دهد.

شکل ۱۵ مقایسه بین دمای بدست آمده از طریق آزمون حرارتی و شبیه‌سازی عددی را در دیواره استوانه نشان می‌دهد.

۵- تحلیل انتقال حرارت

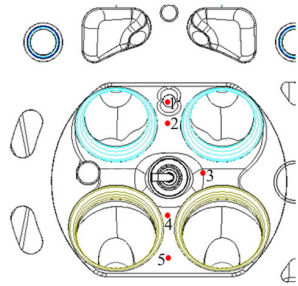
۸۰ درصد تنش‌های ایجاد شده در بدنه موتور، تنش‌های حرارتی می‌باشد. لذا لازم است برای بدست آوردن توزیع دمای درست در ساختار بدنه موتور، تحلیل انتقال حرارت انجام شود. بنابراین قبل از تحلیل تنش باید تحلیل انتقال حرارت اجرا شود. از توزیع دمای بدست آمده به عنوان شرط مرزی حرارتی در تحلیل تنش استفاده شده است. تحلیل انتقال حرارت در بحرانی‌ترین شرایط عملکردی موتور (حالی که گرمترین دما در بدنه موتور ایجاد می‌شود) یعنی بار کامل و قدرت بیشینه انجام می‌شود. بر طبق اصل بقای انرژی، معادله گرما در شرایط پایا و بدون منبع حرارت در این تحلیل بدین صورت است:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial^2 X} + \frac{\partial^2 T}{\partial^2 Y} + \frac{\partial^2 T}{\partial^2 Z} = 0 \quad (1)$$

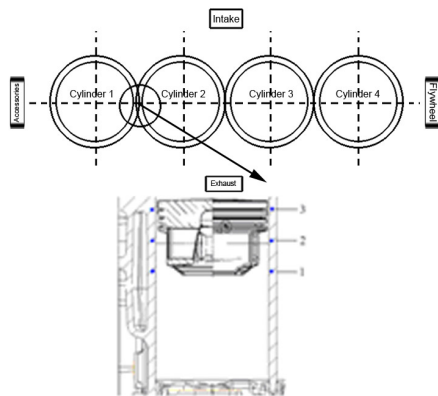
– شرایط مرزی:

شرایط مرزی حرارتی شامل شرط مرزی جابجایی از طرف محفظه احتراق، راهگاه مایع خنک‌کاری و روغن، درگاه ورودی و خروجی و همچنین ضریب رسانایی بین دو سطح جامد در پیچه و نشیمنگاه آن می‌باشند.

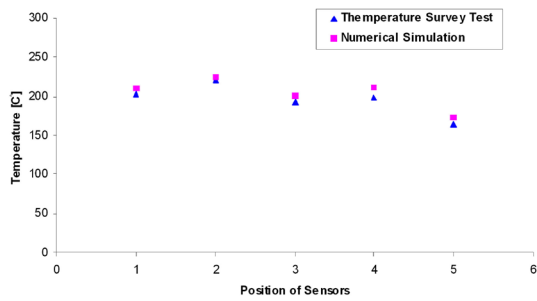
اطلاعات شرایط مرزی حرارتی از منابع صنعتی و اطلاعات آزمایشگاهی در شرایط



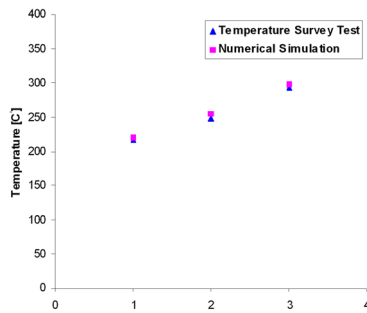
شکل ۱۲ محل قرارگیری حسگرها در بالای محفظه احتراق



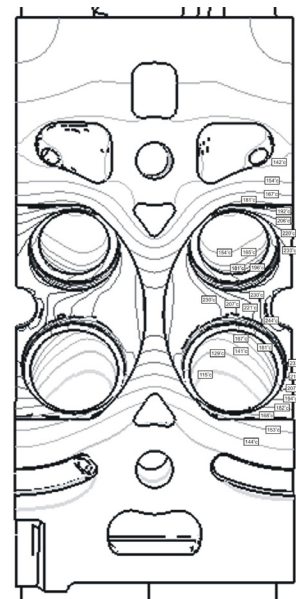
شکل ۱۳ محل قرارگیری حسگرها در دیواره استوانه



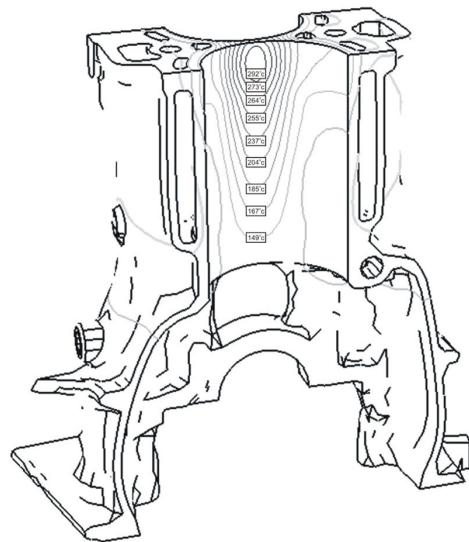
شکل ۱۴ مقایسه دمای به دست آمده از طریق آزمون و حل عددی در سطح محفظه احتراق



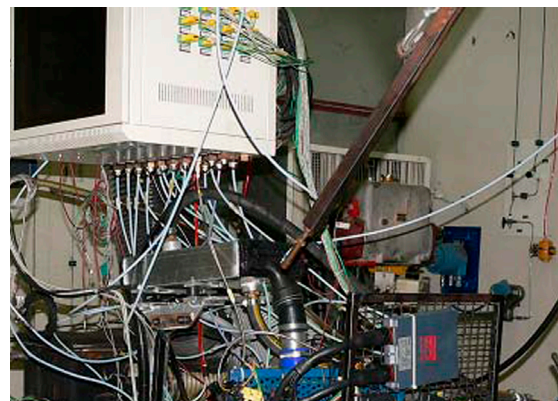
شکل ۱۵ مقایسه دمای به دست آمده از طریق آزمون و حل عددی در دیواره استوانه



شکل ۹ توزیع دما در بستار



شکل ۱۰ توزیع دما در بدنه موتور



شکل ۱۱ اتاق آزمون مجهز برای آزمون حرارتی

۶- تحلیل تنش

از قانون کلی هوک معادلات کرنش سه بعدی شامل کرنش حرارتی بدین صورت است:

$$\varepsilon_x = [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)]/E + \alpha \Delta T \quad (۲)$$

$$\varepsilon_y = [\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)]/E + \alpha \Delta T \quad (۳)$$

$$\varepsilon_z = [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)]/E + \alpha \Delta T \quad (۴)$$

$$\gamma_{xy} = \tau_{xy}/G \quad (۵)$$

$$\gamma_{yz} = \tau_{yz}/G \quad (۶)$$

$$\gamma_{zx} = \tau_{zx}/G \quad (۷)$$

- بارگذاری‌ها:

بر طبق بارگذاری‌های کاربردی که از انواع مختلف منابع علوم مکانیک سرچشمه می‌گیرد، بارگذاری‌های موجود در این تحلیل به سه دسته تقسیم می‌شوند و بوسیله اصل برهم‌نهی برای شبیه‌سازی فرآیند عملکرد مختلف موتور بکار می‌روند. نتایج نهایی تحلیل تنش، ترکیبی از این سه مرحله بارگذاری می‌باشند.

الف- بارگذاری همبندی:

درصد زیادی از بارگذاری به‌کار رفته در موتور بارگذاری حاصل از همبندی است. این موضوع اساساً اشاره به پیش‌بار پیچ‌ها دارد و تأثیر بسیار مهمی بر جلوگیری از فرار گاز از استوانه‌ها دارد. به عبارت دیگر علاوه بر طراحی لایه، بازده آب‌بندی لایه به صورت خیلی مهمی به صحت و درستی پیش‌بار پیچ‌ها بستگی دارد. برای اینکه لایه، آب‌بندی درستی داشته باشد، پیش‌بار پیچ‌ها باید محدوده‌ای معادل ۴۶-۵۴ کیلونیوتن داشته باشند.

ب- بارگذاری حرارتی:

درصد زیادی از تنش‌های ایجاد شده در موتور، تنش‌های حرارتی می‌باشند. بنابراین سهم عمده بارگذاری‌های به‌کار رفته در موتور، بارگذاری حرارتی می‌باشد. در مورد بارگذاری حرارتی، دماهای بدست آمده در گره‌ها از تحلیل حرارتی، در تحلیل تنش به همه گره‌های متناظر برای محاسبه تنش و کرنش حرارتی در ساختار بدنه موتور اختصاص داده می‌شوند.

ج- بارگذاری حاصل از فشار گاز:

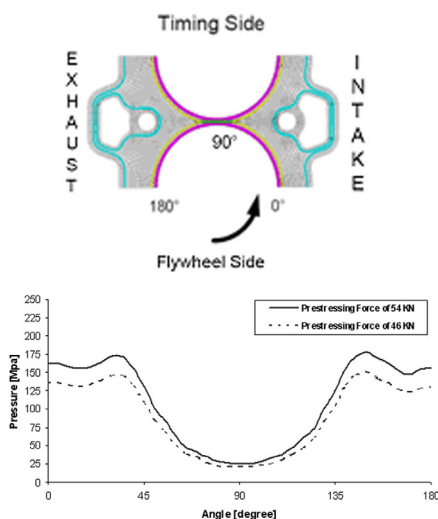
فشار گاز در نتیجه احتراق حاصل از جرقه شمع به‌وجود می‌آید و بر سطح محفظه احتراق اعمال می‌شود. البته بزرگی فشار گاز با توجه به مدت زمان هر چرخه تغییر می‌کند. برای شبیه‌سازی بحرانی‌ترین حالت، از بیشینه فشار گاز در تحلیل استفاده شده است.

- مراحل مختلف تحلیل تنش:

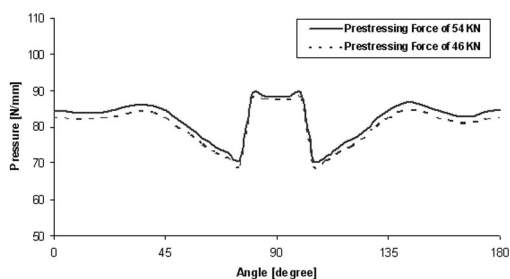
الف- همبندی سرد:

آب‌بندی لایه در خودرو بدون حرکت به صورت خالص مورد توجه است. بنابراین منبع بارگذاری در این مورد نیروی پیش‌بار پیچ‌ها می‌باشد. البته در این مرحله تنش‌های

حاصل از جازدن نشیمنگاه و راهنمای دریچه نیز در مدنظر است. نتایج نشان می‌دهد که ضعیف‌ترین فشار تماسی روی لایه بر روی واسط در تیغه بین دو استوانه و بیشترین فشار تماسی در نزدیکی محل پیچ‌ها بر روی واسط می‌باشد. علاوه بر این، ضعیف‌ترین فشار تماسی بر روی واسط از ۲۵،۳ مگاپاسکال به ۲۰،۶ مگاپاسکال (شکل ۱۶) و بر روی ورق محفظه احتراق از ۷۰،۵ مگاپاسکال به ۶۹ مگاپاسکال (شکل ۱۷) تقلیل می‌یابد؛ هنگامی که نیروی پیش‌بار پیچ از ۵۴ کیلونیوتن به ۴۶ کیلونیوتن کاهش یابد.



شکل ۱۶ توزیع فشار تماسی بر روی واسط در حالت همبندی سرد

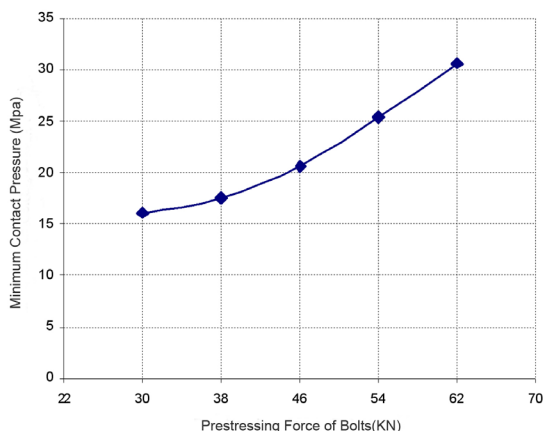


شکل ۱۷ توزیع فشار تماسی بر روی ورق محفظه احتراق

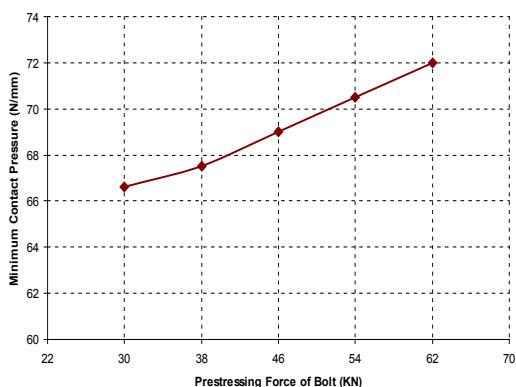
بیشینه تنش‌های فشاری حاصل از برهم‌کنش بدنه، لایه و بستار به دلیل نیروی فنی بزرگ اعمال شده از طرف عناصر لایه بر سطوح آب‌بندی، در نزدیکی پیچ‌ها می‌باشد. البته این مقادیر کمتر از حد تسلیم مواد می‌باشند. برای صحت‌گذاری بر نتایج عددی، در این قسمت از ورق حساس به فشار فوجی استفاده شده است. این ورق به صورت یک حسگر کاغذی می‌باشد که بین بستار و لایه یا بین بدنه موتور و لایه قرار می‌گیرد و با بستن پیچ‌های بستار توزیع فشار ایستایی بر روی لایه به‌دست خواهد آمد.

توزیع فشار بر روی ورق فوجی با خطوط پر قرمز رنگ نشان داده می‌شود. چگالی رنگ در مناطق پرفشار بیشتر و در مناطق کم فشار کمتر است.

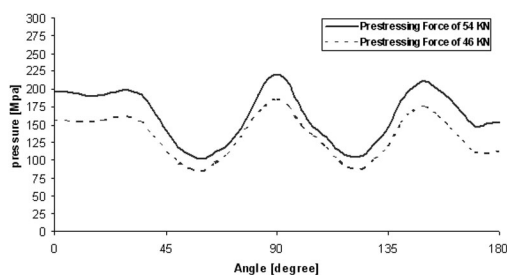
کاهش نیروی پیش‌بار پیچ از ۵۴ کیلونیوتن به ۴۶ کیلونیوتن فشار آب‌بندی کاهش می‌یابد.



شکل ۱۹ کمترین فشار تماسی بر روی واسط در نیروهای پیش‌بار مختلف پیچ

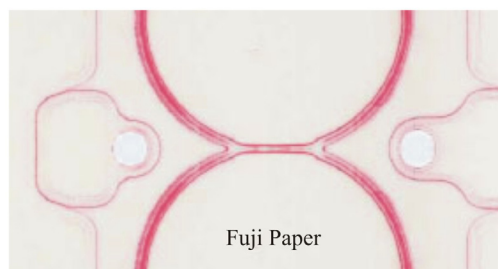
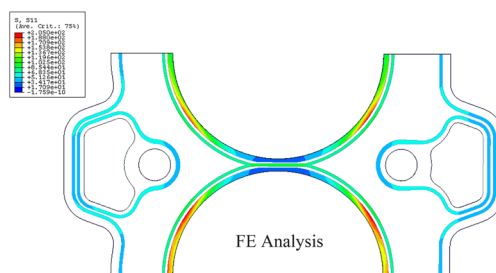


شکل ۲۰ کمترین فشار تماسی بر روی ورق محفظه احتراق در نیروهای پیش‌بار مختلف پیچ



شکل ۲۱ توزیع فشار تماسی بر روی واسط در حالت همبندی گرم

شکل ۱۸ مقایسه بین توزیع فشار را بر روی لایه که از شبیه‌سازی عددی و آزمون ورق فوجی بدست آمده، نشان می‌دهد.



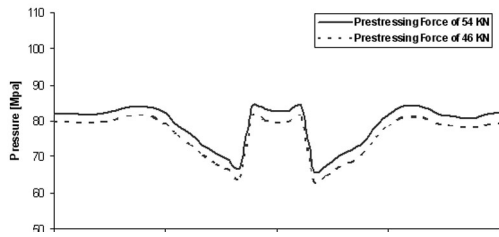
شکل ۱۸ مقایسه توزیع فشار آب‌بندی محاسبه شده به کمک تحلیل اجزای محدود و ورق فوجی

گرادینان توزیع فشار و مقادیر آن در تحلیل عددی و ورق فوجی هم‌خوانی بسیار خوبی باهم دارند. نیروی پیش‌بار پیچ در عملکرد آب‌بندی سهم عمده‌ای دارد. تأثیر نیروی پیش‌بار پیچ در عملکرد فشار آب‌بندی در شکل‌های ۱۹ و ۲۰ نشان داده شده است. همانطور که در شکل‌ها مشخص است، کمترین فشار تماسی بر روی واسط و ورق محفظه احتراق با افزایش نیروی پیش‌بار پیچ به طرز چشمگیری افزایش پیدا می‌کند.

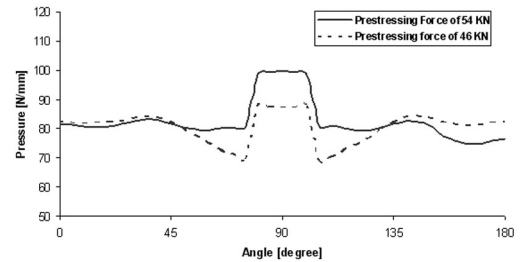
ب- هم‌بندی گرم:

این نوع بارگذاری براساس نیروی پیش‌بار پیچ‌ها و بارگذاری حرارتی از طرف محفظه احتراق، سامانه خنک‌کاری و روغن‌کاری می‌باشد. در این بارگذاری، از توزیع دمای محاسبه شده در گره‌ها از تحلیل انتقال حرارت، استفاده شده است. این مرحله بدین علت انجام شده تا نشان داده شود که بیشترین تنش‌ها و همچنین بیشترین فشار تماسی بر روی لایه به دلیل بار حرارتی می‌باشد. موقعیت ضعیف‌ترین فشار تماسی در طول هم‌بندی سرد، در نتیجه تأثیر تنش‌های حرارتی و نرخ انبساط حرارتی بیشتر بستار نسبت به قطعات دیگر به بیشترین مقدار خود می‌رسد. به عبارت دیگر تنش حرارتی درست می‌تواند برای بهبود بازده آب‌بندی لایه بکار رود. توزیع فشار تماسی بر روی واسط و ورق محفظه احتراق در شکل‌های ۲۱ و ۲۲ نشان داده شده‌اند.

همانطور که در شکل‌ها مشخص است فشار آب‌بندی در تیغه بین دو استوانه که در هم‌بندی سرد کمترین مقدار را داشت، به طرز چشمگیری افزایش یافته است. البته با



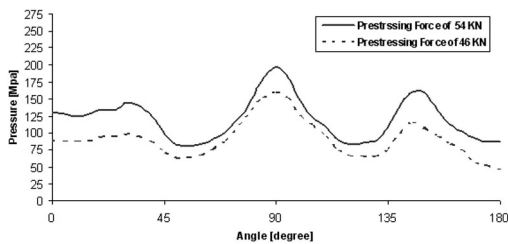
شکل ۲۳ توزیع فشار تماسی بر روی ورق محفظه احتراق در حالت همبندی گرم



شکل ۲۴ توزیع فشار تماسی بر روی ورق محفظه احتراق در حالت روشن کردن سرد

ج- روشن کردن سرد:

شرایط عملکرد در روشن کردن سرد به توسط ترکیب بارگذاری همبندی و فشار گاز داخل استوانه شبیه‌سازی می‌شود. توزیع فشار تماسی بر روی لایه کاملاً مانند حالت همبندی سرد می‌باشد اما از آنجایی نیروی فشار گاز برخلاف نیروی پیش بار پیچ‌ها است؛ مقادیر فشار آب‌بندی نسبت به حالت همبندی سرد به طرز چشمگیری کاهش یافته است. توزیع فشار برای دو نیروی پیش بار پیچ ۵۴ کیلونیوتن و ۴۶ کیلونیوتن بر روی واسط و ورق محفظه احتراق در شکل‌های ۲۳ و ۲۴ نشان داده است.

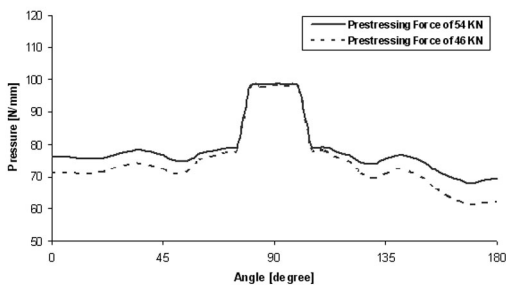


کمترین فشار تماسی در این حالت به دلیل اعمال نیروی فشار گاز که با نیروی پیش‌بار پیچ‌ها متضاد است بر روی واسط در نیروی پیش بار پیچ ۵۴ کیلونیوتن از ۲۳،۳ مگاپاسکال به ۱۳ مگاپاسکال و بر روی ورق محفظه احتراق از ۷۰،۵ مگاپاسکال به ۶۶ مگاپاسکال تقلیل یافته است. همچنین در نیروی پیش‌بار پیچ ۴۶ کیلونیوتن کمترین فشار تماسی بر روی واسط از ۲۰،۶ مگاپاسکال به ۹،۲ مگاپاسکال و بر روی ورق محفظه احتراق ۶۹ مگاپاسکال به ۶۳ مگاپاسکال کاهش یافته است.

شکل ۲۵ توزیع فشار تماسی بر روی واسط در حالت احتراق

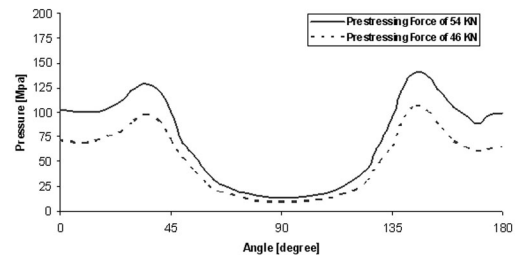
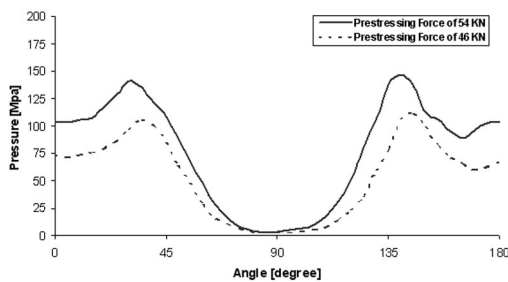
د- احتراق:

شرایط عملکرد در این حالت ترکیبی از تمام بارگذاری‌ها شامل بارگذاری حرارتی و بارگذاری حاصل از فشار گاز می‌باشد. بیشترین تنش‌های موجود در بستر و بدنه موتور، تنش‌های فشاری است. در این حالت باید بررسی شود تا تنش‌های فشاری ایجاد شده در کف بستر که در نتیجه عکس‌العمل عناصر فیزی لایه به وجود می‌آید از حد تسلیم تجاوز نکند. توزیع فشار آب‌بندی و ضخامت عملکرد لایه در این حالت مانند همبندی گرم است اما به دلیل نیروی فشار گاز اعمال شده، فشار آب‌بندی در این حالت نسبت به حالت همبندی گرم کاهش یافته است.



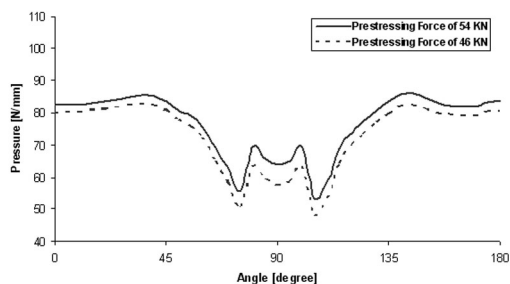
توزیع فشار تماسی بر روی واسط و ورق محفظه احتراق در این حالت در شکل‌های ۲۵ و ۲۶ نشان داده شده است.

شکل ۲۶ توزیع فشار تماسی بر روی ورق محفظه احتراق در حالت احتراق

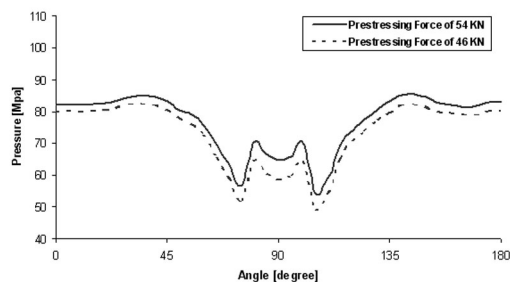


شکل ۲۷ توزیع فشار تماسی بر روی واسط در حالت سرد شدن موتور تا ۲۰°C

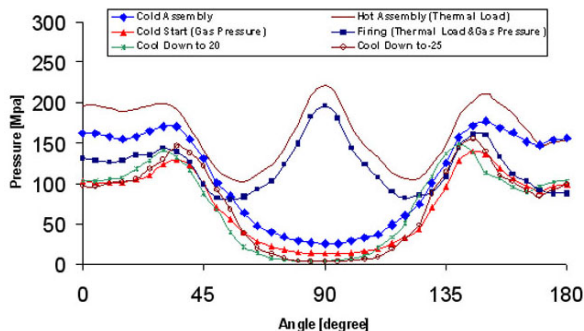
شکل ۲۸ توزیع فشار تماسی بر روی واسط در حالت روشن کردن سرد



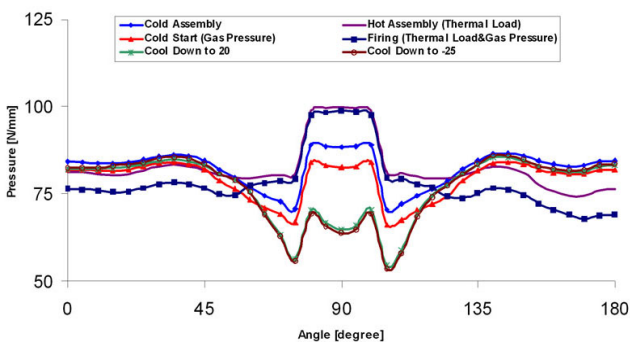
شکل ۳۰ توزیع فشار تماسی بر روی ورق محفظه احتراق در حالت سرد شدن موتور تا -25°C



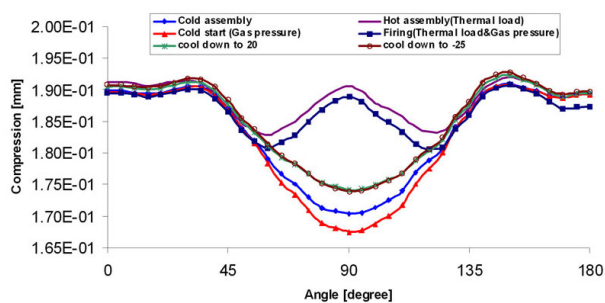
شکل ۲۸ توزیع فشار تماسی بر روی ورق محفظه احتراق در حالت سرد شدن موتور تا 20°C



شکل ۳۱ مقایسه توزیع فشار تماسی بر روی واسط در شرایط بارگذاری مختلف در نیروی پیش بار پیچ ۵۴ کیلو نیوتن



شکل ۳۲ مقایسه توزیع فشار تماسی بر روی ورق محفظه احتراق در شرایط بارگذاری مختلف در نیروی پیش بار پیچ ۵۴ کیلو نیوتن



شکل ۳۳ مقایسه فشردگی واسط در شرایط بارگذاری مختلف در نیروی پیش بار پیچ ۵۴ کیلو نیوتن

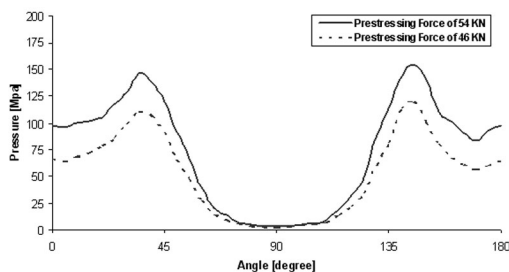
۵- سرد شدن موتور تا 20°C درجه سانتیگراد:

یکی از موارد بحرانی در شرایط آب‌بندی، سرد شدن موتور بعد از شرایط بار حرارتی می‌باشد. در این حالت بستار و سایر قطعات دچار انقباض می‌شود و فشار آب‌بندی بر روی لایه به کمترین مقدار خود می‌رسد. همچنین تنش‌های فشاری در بستار که در مرحله بارگذاری حرارتی به بیشترین مقدار خود رسیده بودند، در این حالت به تنش‌های کششی تبدیل می‌شوند. توزیع فشار آب‌بندی بر روی واسط و ورق محفظه احتراق در شکل‌های ۲۷ و ۲۸ نشان داده شده‌اند.

و- سرد شدن موتور تا -25°C درجه سانتیگراد:

در مواردی به علت دمای زیر صفر محیط این امکان وجود دارد تا دمای بدنه موتور به -25°C درجه سانتیگراد برسد که می‌تواند باعث کاهش بیشتر فشار آب‌بندی شود. نتایج در این قسمت مشابه با حالت قبل می‌باشد اما فشار آب‌بندی در این حالت کمتر از قبل می‌شود. برای دو نیروی پیش بار پیچ توزیع فشار تماسی بر واسط و ورق محفظه احتراق در شکل‌های ۲۹ و ۳۰ نشان داده شده‌اند.

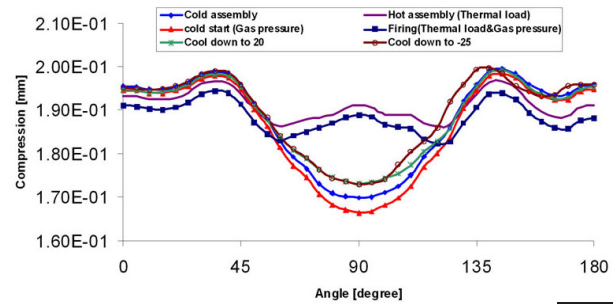
مقایسه بین توزیع فشار تماسی در کلیه بارگذاری‌ها بر روی واسط و ورق محفظه احتراق برای نیروی پیش بار پیچ ۵۴ کیلو نیوتن در شکل‌های ۳۱ و ۳۲ نشان داده شده‌اند. یکی از مواردی که بر روی آب‌بندی و عمر خستگی لایه تأثیر می‌گذارد، میزان بلندشدگی بستار می‌باشد. بلندشدگی بستار از روی تغییرات ضخامت عملکرد لایه بستار سنجیده می‌شود. ضخامت عملکرد لایه در منطقه واسط و ورق محفظه احتراق در نیروی پیش بار پیچ ۵۴ کیلو نیوتن در شکل‌های ۳۳ و ۳۴ نشان داده شده‌اند.



شکل ۲۹ توزیع فشار تماسی بر روی واسط در حالت سرد شدن موتور تا -25°C

References:

1. Mike Kestly, Guenther Unseld, Alfred Weiss and Josef Ludwig, "MLS Cylinder Head Gasket Wave Stopper", SAE paper 2003-01-0474.
2. Rainald Pohle and Reinz Dichtungs GmbH, "Analysis of the Sealing Behavior of Cylinder Head Gaskets (CHG)", February 1989-890279.
3. Frank Popielas, Colin Chen and Martin Mockenhaupt "MIs Influence on Engine Structure and Sealing Function" Dana Corp. March 2003-2003-01-0484.
4. T. Y. Chen, Jim Zwick, Bhawani Tripathy and Gary Novak, "3D Engine Analysis and MLS Cylinder Head Gaskets Design", SAE paper 2002-01-0663
5. Mark H. Robinson, Gavin P. Whitham, Tanguy Tronel, Stephen A. Schulze, and Application of Advanced Finite Element Techniques to the Design and Development of Automotive Gaskets", SAE paper 1996- 960218.
6. E.A. Wilson and B. Preson, "Finite element analysis of element problems using different displacement", Int. J. Numer. Mech. Eng. 2 (1) (1970) 387-395.
7. S.K. Chan and I.S. Tuba, "A finite element method for contact problems of solid bodies part-I, theory and validation", Int. J. Mech. Sci. 18 (13) (1971) 615-625.
8. S. Ohte, "Finite element analysis of elastic contact problems", Bull. JSME 16 (95) (1973) 797-804.
9. J. R. Howard, "An Experimental Study of Heat Transfer Through periodically Contacting Surfaces", Int. J. Heat Mass Transfer. Vol. 9, pp. 367-372, 1975.
10. C.V. Medhusudana, L.S. Fletcher, "Contact heat transfer, the last decade", AIAA J. 24 (3) (1985) 510-523.
11. A.R. Mijar, J.S. Arora, "Review of formulations for elastostatic frictional problems", Struct. Multidiscip. Optim. 20 (2000) 167-189.
12. M. Rosochowska, R. Balendra, and K. Chodnikiewicz, "Measurements of Thermal Contact Conductance, Journal of Materials Processing Technology", 135, 204-210, 2003
13. X. Zhang and P. Cong, "A New Method for Numerical Simulation of Thermal", International Journal of Heat and Mass Transfer, 47 1091-1098, 2004
14. T. Belytschko M.O. Neal, "Contact-impact by the pinball algorithm with penalty and Lagrangian methods", Int. J. Numer. Mech. Eng. 31 (3) (1991) 547-572.
15. S.W. Chyuan, "Finite element simulation of a twin-cam 16-valve cylinder structure", Finite Elem. Anal. Des. 35 (2000) 199-212.
16. J. Montgomery, "Methods for modeling bolts in the bolted joint", ANSYS User's Conference, 2002.
17. Victor reinz, "sealing system for automotive engines", sv corporate media GM



شکل ۳۴- مقایسه فشردگی ورق در شرایط بارگذاری مختلف در نیروی پیش‌بار پیچ ۵۴ کیلونیوتن

۷- نتیجه گیری

۱- توزیع فشار آب‌بندی بر روی لایه به طرز مهمی به نیروی پیش‌بار پیچ‌ها بستگی دارد که در حقیقت به عنوان منبع بیشینه بارگذاری خارجی بر روی بستار به حساب می‌آیند.

۲- مکان ضعیف‌ترین فشار تماسی در قسمت‌های برجسته لایه می‌تواند در نتیجه تأثیر تنش و کرنش حرارتی انتقال پیدا کند. در این تحقیق، نتایج نشان می‌دهد که بار حرارتی و در نتیجه آن تنش‌های حرارتی بوجود آمده تأثیر بسیار مثبتی در بهبود بازده آب‌بندی لایه دارند.

۳- از آنجائی که نیروی پیش‌بار بکار رفته در پیچ‌ها تحت شرایط عملکرد با نیروی گاز متضاد است، با افزایش فشار گاز امکان فرار گازها وجود دارد. بنابراین یک روش مؤثر برای افزایش ظرفیت آب‌بندی لایه، افزایش بزرگی نیروی پیش‌بار پیچ‌ها بدون تجاوز از حد مقاومت مواد در هر جزء از ساختار موتور می‌باشد.

۴- فشار آب‌بندی بر روی لایه بستار در حالت روشن کردن سرد و سرد شدن موتور بعد از شرایط بار حرارتی به کمترین مقدار خود می‌رسد. به هر حال ساختار لایه در منطقه‌ای که بدترین آب‌بندی را دارد، در طراحی می‌تواند بهبود یابد. به ویژه مناطق برجسته باید بررسی شوند.

۵- در شرایط بارگذاری حرارتی تنش‌های فشاری در ساختار بستار، لایه و بدنه موتور به دلیل متفاوت بودن ضرایب انبساط حرارتی و بزرگ بودن نرخ انبساط حرارتی بستار نسبت به قطعات دیگر، به بیشترین مقدار خود می‌رسد. به ویژه در کف بستار در محل تماس آن با عناصر فنری ورق و واسط که باید دقت شود مقدار این تنش‌ها فراتر از حد تسلیم آلومینیم بکار رفته در بستار نباشد زیرا افزایش مقدار تنش‌ها از حد تسلیم آلومینیم باعث خراب شدن آب‌بندی می‌شود.

Analysis of Contact Stresses and MLS Cylinder Head Gasket Behavior Using Finite Element Method

A.R. Nourpour

Assistant Professor
Automotive Engineering Department
Iran University of Science & Technology
noorpoor@iust.as.ir

M. Ghasemi*

MSc. Student
Automotive Engineering Department
Iran University of Science & Technology (IUST)
m_ghasemi@ip-co.com

Corresponding Authors

Received: Jun. 27,2009

Accepted in Revised From Feb. 01,2010

Article No. 88109

Abstract

Multi-layer steel (MLS) cylinder head gaskets (CHG) are widely used to seal the engine cylinder head. Therefore, The interaction between the engine cylinder head, cylinder block and the cylinder head gasket is very important from technical point of view. To avoid the escaping gas from the engine affecting the overall performance of the engine during operation, both the pre-stressing force of the bolts as well as the gasket design are critical factors in enhancing the efficiency of the sealing of the gasket.

In this paper the finite element method (FEM) is used to investigate the interaction between the cylinder head and the cylinder block. Further more the distribution of the contact pressure on the gasket and the cylinder head and the cylinder block stresses at different condition, such as cold assembly, hot assembly, cold start, firing, engine cooling down to 20°(c) and -25°(c) are calculated. The validation are performed using Fuji paper test and thermal survey test. The results revealed that the sealing pressure on the gasket strongly depends on the pre-stressing force of the bolts. However, the location of minimum contact pressure on the gasket is changed by considering the thermal loading.

Keywords: Gasket, Cylinder head, Pre-stressing of bolts, Sealing, Contact pressure