



فصلنامه علمی - پژوهشی تحقیقات موتور



تارنمای فصلنامه: www.engineersearch.ir

تحلیل خرابی استوانه موتور دیزل دریایی

مهدی رضائی^{1*}، مهدی روزبان²

¹ شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو، تهران، ایران me_rezaei@ip-co.com

² شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو، تهران، ایران m_roozban@ip-co.com

* نویسنده مسئول

اطلاعات مقاله

چکیده

تاریخچه مقاله:

دریافت: 30 آذر 1394

پذیرش: 29 بهمن 1394

کلیدواژه‌ها:

موتور دیزل سنگین

استوانه بوش تر

ترک

تحلیل خرابی

موتورهای دیزل دریایی از خانواده موتورهای دیزل سنگین و دارای توان قوی هستند. استوانه این موتورها که غالباً از نوع بوش تر است، به وسیله سیال خنک کاری احاطه می شود و سیال خنک کاری نیز حرارت خود را به آب دریا می دهد. احتراق داخل استوانه و برهم کنش بین سیال خنک کاری و استوانه در بیرون، پدیده های فیزیکی و شیمیایی مختلفی در این استوانه ها بوجود می آورد. ایجاد و رشد ترک در استوانه موتورهای دیزل سنگین امری محتمل است و عوامل مختلفی مانند ازدیاد تنش حرارتی، پدیده حفره زایی و یا خوردگی دارد که منجر به باز کردن موتور و تعویض استوانه می شود. در این مقاله ایجاد و رشد ترک در استوانه یک موتور دیزل دریایی خورجینی شکل 12 استوانه بررسی می شود. نتایج نشان می دهند که افزایش دمای سیال خنک کاری موجب تسریع خستگی حرارتی استوانه و ایجاد ترک در آن شده است و عوامل خوردگی و پدیده حفره زایی، رشد ترک را تشدید کرده است.

تمامی حقوق برای انجمن علمی موتور ایران محفوظ است.



1. مقدمه

احاطه می‌کند. برای دفع حرارت سیال خنک‌کاری، از مبدل آب خنک استفاده شده که به وسیله آب دریا خنک می‌شود. در موتور مورد بررسی، استوانه شماره 1 سمت چپ موتور دچار ترک طولی شده و سیال خنک‌کاری از طریق آن به داخل نفوذ کرده است. در بررسی سطح خارجی استوانه، پدیده حفره‌زایی در دامنه وسیعی مشاهده می‌شد که در شکل 1 این خرابی‌ها نشان داده شده است.

جدول 1: مشخصات موتور

12	تعداد استوانه
130	قطر داخلی استوانه (میلی‌متر)
750	سرعت کمینه (rpm)
2700	سرعت بیشینه (rpm)
1200	توان بیشینه (اسب بخار)
1 : 15,4	نسبت تراکم

پدیده حفره‌زایی در سایر استوانه‌های موتور نیز مشاهده می‌شود اما در این استوانه‌ها ترک ایجاد نشده است. با توجه به وقوع خرابی در ساعات کم کارکرد موتور، علت آن می‌تواند ناشی از نقصی در طراحی، مواد یا کاربری موتور باشد. در این مقاله با بررسی هر یک از این عوامل، به ریشه‌یابی خرابی پرداخته می‌شود.

2. پدیده حفره‌زایی

پدیده حفره‌زایی با تشکیل حباب‌های هوا در سیال و برخورد آنها به سطوح جسم جامد بوجود می‌آید. در موتورهای احتراق داخلی و در مرحله احتراق، یک موج ضربه‌ای به دیواره استوانه وارد می‌شود. ارتعاش استوانه در اثر موج وارد شده موجب تغییر فشار سیال خنک‌کاری در سطح خارجی استوانه می‌شود. در نتیجه حباب‌هایی در سیال خنک‌کاری تشکیل می‌شود که با برخورد آنها به سطح استوانه، حباب می‌ترکد و در اثر آن مقداری سیال با انرژی زیاد وارد سطح اندکی شده و حفره کوچکی در سطح خارجی استوانه ایجاد می‌کند. از آنجا که صلیب استوانه‌های بوش تر کمتر از بوش‌های خشک است این پدیده در موتورهای دیزل سنگین بیشتر روی می‌دهد و افزایش نسبت تراکم در آنها، پدیده حفره‌زایی را بیشتر می‌کند.

گاهی شدت حفره‌زایی به حدی است که موجب تجمع حفرات در سطح خارجی استوانه می‌شود که به آن پدیده pitting نیز گفته می‌شود (شکل 2). پس از ایجاد پدیده pitting، معمولاً خوردگی از داخل حفرات آغاز شده و با سرعت بیشتری به سمت داخل استوانه پیش می‌رود تا استوانه سوراخ شده و سیال خنک‌کاری به داخل آن نفوذ کند. از این رو می‌توان گفت که منشأ پدیده حفره‌زایی، تنها بارهای مکانیکی است و با پدیده خوردگی که در اثر واکنش‌های شیمیایی روی می‌دهد فرق دارد [5 و 6].

استوانه موتورهای دیزل سنگین در معرض خستگی کم چرخه است که طی فرایند روشن و خاموش کردن موتور ایجاد می‌شود. در استوانه‌های بوش تر، خستگی کم چرخه با خوردگی همراه است و این امر شرایط را بدتر می‌کند.

از این رو احتمال خوردگی تنش و خوردگی خستگی در نواحی تمرکز تنش مانند شیارها و شکاف‌های هم‌بندی بیشتر می‌شود. اگرچه در این استوانه‌ها تخریب کامل مشاهده نشده است اما اندازه (وسعت) ایجاد ترک یا خوردگی بگونه‌ای است که با یک تعمیر کم هزینه برطرف نمی‌شود. از این رو همه استوانه‌ها در این گونه تعمیرها تعویض می‌شود [1].

بررسی‌های انجام شده در تحلیل خرابی و ترک خوردگی استوانه‌های موتور دیزل دریایی، اغلب تمرکز تنش در قسمت شیارها یا مشکلات موادی را در این خرابی مؤثر می‌دانند [1 و 2]. در این کارها علاوه بر بررسی ریز ساختار موادی استوانه، از روش شبیه‌سازی اجزای محدود، تنش استوانه استخراج شده و نقاط تمرکز تنش بهبود یافته است. چمنی و همکاران [3] با استفاده از تحلیل اجزای محدود استوانه موتور دیزل سنگین، نقاط تنش بحرانی استوانه را استخراج کردند. نتیجه کار آنها نشان می‌داد که قسمت‌های پخ‌دار سطح خارجی استوانه، بیشترین تنش را در استوانه دارد.

اسپادفور و همکارانش [4] با تحلیل خرابی استوانه یک موتور دیزل سنگین که در مولد برق استفاده می‌شد نشان دادند که افزایش دمای احتراق نیز می‌تواند منجر به ازدیاد تنش استوانه و خرابی آن گردد. کانگ ژو و همکارش [5]، استوانه موتورهای دیزل سنگین که بدلیل پدیده حفره‌زایی¹ دچار خرابی شده بودند را بررسی کرده و دلایل این پدیده را استخراج نمودند.

از آنجا که پدیده حفره‌زایی در موتورهای دیزل سنگین بسیار رایج است و در ادامه در مورد آن بحث خواهد شد، کار آنها در بررسی خرابی این نوع استوانه می‌تواند مرجع مفیدی باشد.

در یک موتور دیزل سنگین دریایی و در ساعت 90 از کارکرد موتور، آب به داخل مسیر روغن موتور نفوذ کرد و موجب خاموشی موتور شد. بررسی بیشتر نشان می‌داد که آب از داخل یکی استوانه‌ها نفوذ کرده و حرکت سمبه را مختل کرده است. پس از باز کردن بستار² یک ترک طولی در این استوانه مشاهده شد. با توجه به اینکه خرابی در ساعت‌های کم کارکرد موتور ایجاد شده است، لازم بود علاوه بر تعمیر موتور، ریشه این خرابی بررسی گردد. موتور مورد بررسی از نوع موتورهای دیزل چهار زمانه پاشش مستقیم است که بصورت V شکل بود و دارای 12 استوانه است. سایر مشخصات موتور در جدول 1 آمده است.

خنک‌کاری دیواره خارجی استوانه‌های این موتور به وسیله محلول آب مقطر و ضدیخ انجام می‌شود و این محلول سطح خارجی استوانه را

² Cylindrehead¹ Cavitation

علاوه بر موارد ذکر شده، تشکیل حباب‌ها از انتقال حرارت مناسب استوانه جلوگیری کرده و موجب افزایش تنش حرارتی آن می‌شود. از این رو برای جلوگیری از پدیده حفره‌زایی، باید عواملی که موجب بروز یا تشدید این خرابی می‌شود را شناسایی کرده و تا حد امکان برطرف نمود. برخی از این عوامل عبارتند از:

الف) لقی نامناسب بین استوانه و بدنه موتور³ که در ارتعاش استوانه مؤثر است.

ب) نامناسب بودن محلول سیال خنک‌کاری استفاده شده از لحاظ افزودنی‌های ضد یخ، ضد جوش و ضد خوردگی

ج) کم بودن فشار سامانه خنک‌کاری موتور بدلالی از جمله نشتی یا کم بودن سطح سیال

د) عدم تنظیم دمای کارکرد موتور که در این ساط سیال خنک‌کاری و فشار آن تأثیر دارد [6].

در شکل 1.ب سطح خارجی استوانه مورد بررسی نشان داده شده است. اگرچه آثار پدیده حفره‌زایی بر روی این سطح کاملاً مشهود است اما در بررسی سطح مقطع شکست آثاری از نفوذ حفرات به سمت داخل مشاهده نشد. علاوه بر این شدت پدیده حفره‌زایی و تجمع حفرات در قسمتی است که ترک ندارد. آثار خوردگی نیز در سطح خارجی استوانه مشهود است اما ر شد و پید شروی ترک با این پدیده نبوده است. بنابراین عامل اصلی ر شد ترک در استوانه، حفره‌زایی و خوردگی نیست و این عوامل می‌تواند تشدید کننده خرابی باشد.

3. بررسی موادی

به منظور بررسی موادی استوانه، ابتدا ترکیب شیمیایی آن با استفاده از روش طیف سنجی نوری⁴ از نمونه برش خورده آن استخراج گردید. در جدول 2 ترکیب شیمیایی استوانه مورد بررسی آورده شده است. مقایسه ترکیب شیمیایی با مراجع مرتبط [7] نشان می‌دهد که جنس استوانه نزدیک چدن خاکستری Alloy Grade G4000-G12H21 است که در آن دو عدد آخر درجه آهن و سختی را نشان می‌دهد. برخی از خواص این چدن عبارت است از [7]:

- ضریب الاستیسیته = 100 GPa
- تنش تسلیم = 250 MPa
- تنش کشش نهایی = 300 MPa

در استاندارد SAE J431 کاربرد این ماده برای ساخت استوانه بوش تر، بستار و میل بادامک موتورهای دیزل سنگین یاد شده است [7]. این ماده نسبت به چدن خاکستری غیرهمبسته‌ای دارای خواص خستگی حرارتی - مکانیکی بهتر و عمر خستگی آن بیشتر است. از آنجا که استوانه موتور تحت تنش‌های حرارتی - مکانیکی متناوب است، انتخاب



الف. ترک طولی (از رنگ برای وضوح ترک استفاده شده است)



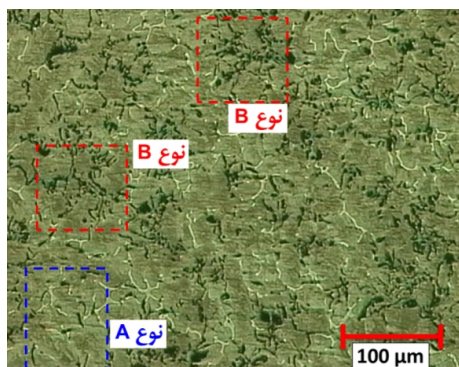
ب. پدیده حفره‌زایی در سطح خارجی استوانه
شکل 1: خرابی‌های استوانه مورد بررسی



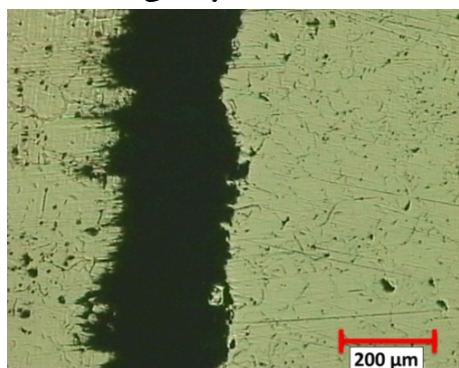
شکل 2: پدیده pitting ناشی از حفره‌زایی در سطح خارجی استوانه
[6]

⁴ OES

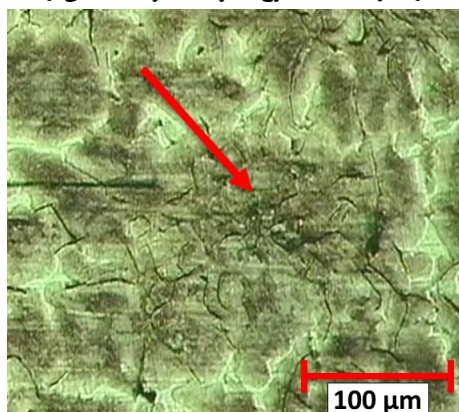
³ Engine block



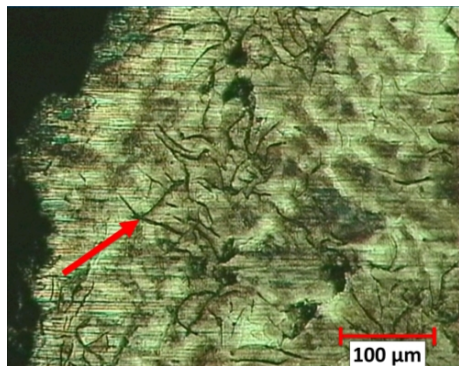
الف. ریزساختار گرافیت نوع A و B. زمینه پرلیتی فریتی شامل فسفیدهای یوتکتیکی



ب. اندازه گرافیت‌های نوع A و B، 5 و 6 تخمین زده شد.



ج. تمرکز گرافیت‌ها بصورت رزبرگی



د. مقطع شکست و ریزترک‌های اطراف آن
شکل 3: مقطع شکست استوانه

این همبسته با افزودن عناصری نظیر نیکل، مس و مولیبدنیوم مناسب کاربرد مورد نظر می‌شود.

جدول 2: ترکیب شیمیایی استوانه

نمونه	Cr	Ni	Mo	Cu	Fe
استوانه	0,35	0,68	0,1	0,37	پایه
G 4000	-	-	-	-	پایه

نمونه	C	Si	Mn	P	S
استوانه	3,35	1,86	0,82	0,4	0,07
G 4000	-3,4 3,15	1,8-2,1	0,7-1	0,4-0	0,075

برای بررسی دقیق مقطع ترک، استوانه برش داده شده و به وسیله میکروسکوپ فلزنگاری شد. با توجه به تصاویر میکروسکوپی می‌توان گفت که ریزساختار قطعه بیان‌گر چندن خاکستری با زمینه پرلیتی - فریتی با بیش از 85 درصد پرلیت بوده که شامل فسفید یوتکتیک و کاربیدهای ریز است. گرافیت‌های آزاد از نوع A و B است (شکل 3.الف) و اندازه آنها 5 و 6 است که این اندازه برای استحکام قطعه نسبتاً مناسب است (شکل 3.ب).

درصد فسفیدهای یوتکتیک در نزدیکی سطح شکست زیاد است و همین مسئله باعث تردی قطعه در این ناحیه می‌شود که می‌تواند سبب ایجاد ترک ترد در اثر بارهای مکانیکی - حرارتی شود.

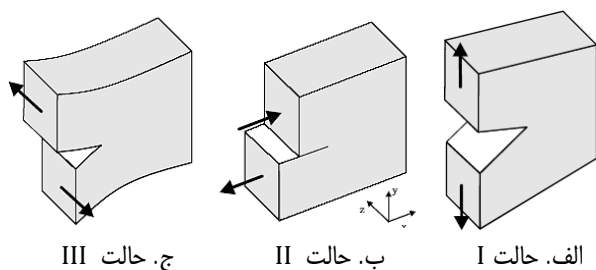
علاوه بر این توزیع گرافیت‌های آزاد بیشتر بصورت رزبرگی⁵ است تا نوع A. شکل 3.ج تجمع رزبرگی گرافیت‌های آزاد را نشان می‌دهد. مطابق پیشنهاد شرکت پژو برای استوانه‌های موتور، خواص مکانیکی مورد نیاز زمانی تأمین می‌شود که گرافیت‌ها از نوع A با اندازه 4 و 5 باشد [8]. همین مسئله در کاهش خواص مکانیکی در نواحی ترک ایجاد شده تأثیر می‌گذارد. علاوه بر این در نزدیکی ترک استوانه، ریزترک‌های متعددی مشاهده شد که نشان می‌دهد شروع ترک از این ریزترک‌ها می‌تواند باشد (شکل 3.د).

بنابراین در مجموع بررسی موادی استوانه و مقطع شکست نشان می‌دهد که استوانه از نظر موادی و ریزساختار مطابق استاندارد است اما تجمع رزبرگی گرافیت‌های آزاد که در ریزساختار سطح شکست مشاهده شد، در کاهش استحکام استوانه تأثیر داشته است. در بررسی مقطع شکست نیز ریزترک‌هایی وجود دارد که می‌تواند منشأ شکست باشد و از جمله دلایل ایجاد این ترک‌ها بدلیل مغایرت ریزساختار در ناحیه ترک خوردگی است.

⁵ Rosette type

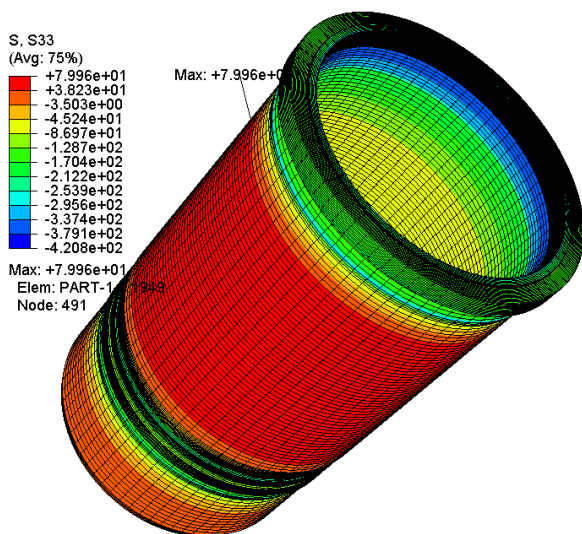
با مشخصات تعیین شده، استوانه در نرم افزار ABAQUS [9] شبیه سازی گردید. برای این منظور با فرض خنک کاری یکنواخت محیط استوانه، از تحلیل تقارن محوری می توان استفاده نمود. در نقاطی که استوانه با بدنه موتور در تماس است، بدنه موتور را می توان به صورت جسم صلب شبیه سازی کرد.

از نتایج شبیه سازی انجام شده، تنش های محیطی (σ_{θ})، شعاعی (σ_r) و محوری (σ_z) قابل استخراج است. تنش محیطی σ_{θ} نقش مهمی در شروع رشد ترک دارد و با توجه به اینکه ترک ایجاد شده در طول استوانه و این مؤلفه تنش بر آن عمود است، افزایش آن موجب پیشروی ترک می شود و بارگذاری ترک به وسیله آن از نوع حالت I است. از سوی دیگر σ_r حالت II و σ_z حالت III بارگذاری ترک را در استوانه مورد بررسی ایجاد می کند. در شکل 5 حالت های بارگذاری ترک نشان داده شده است.



شکل 5: حالت های بارگذاری ترک

مقایسه تنش های شعاعی، محیطی و محوری از نتایج شبیه سازی اجزای محدود نشان می دهد که در موضع ترک ایجاد شده، تنش محیطی (σ_{θ}) در مقایسه با سایر تنش ها، تنش غالب و بارگذاری اصلی در ترک ایجاد شده از نوع حالت I است. در شکل 6 توزیع تنش محیطی برای استوانه نشان داده شده است.



شکل 6: توزیع تنش محیطی در استوانه (برحسب MPa)

4. تحلیل تنش به روش اجزای محدود

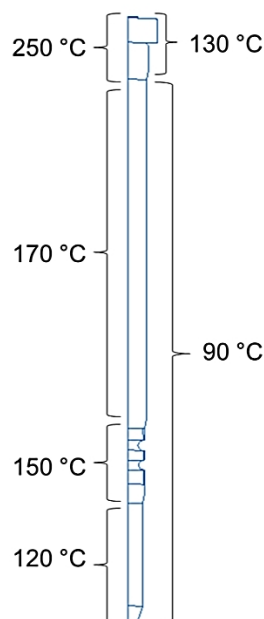
همان طور که در قسمت های قبل ذکر شد، بررسی سطح مقطع ترک های ایجاد شده در استوانه نشان می دهد که رشد و شروع خرابی بدلیل حفره زایی یا خوردگی نبوده است و این عوامل می توانست تشدید کننده خرابی باشد.

از این رو لازم است که استوانه از نظر بارها و تنش های وارد شده بررسی گردد. یکی از مهم ترین بارهای وارد شده به استوانه های بوش تر، بار حرارتی است. نتایج شبیه سازی اجزای محدود بر روی استوانه یک موتور دریایی V 12 مشابه نشان می دهد که تنش های ناشی از حرارت، 15 برابر بیشتر از بارهای مکانیکی (احتراقی) است [1].

بنابراین با صرف نظر فشار گازهای احتراق، می توان تحلیل اولیه ای از تنش های وارد بر استوانه را بدست آورد. برای این منظور داشتن توزیع دما در داخل استوانه و همچنین دمای سیال خنک کاری لازم است. دمای داخل استوانه از نتایج بررسی که بر روی موتور دیزل دریایی V 12 مشابه در مرجع [1] انجام شده است استخراج گردید.

از آنجا که در این تحلیل هدف بررسی تأثیر افزایش دما بر روی استوانه است، این تقریب تا حد زیادی قابل قبول است. دمای سیال خنک کاری در حالت کارکرد تمام بار موتور، 90 C است و از روی دما سنج نصب شده بر روی موتور به دست می آید. اگرچه این دما در نزدیکی بستر موتور خوانش می شود اما دمای سیال اطراف استوانه نیز نزدیک آن است.

در شکل 4 توزیع دمای استوانه بر روی مقطع آن نشان داده شده است.



شکل 4: توزیع دمای استوانه

محدود نشان می‌دهد که تنش غالب موضع ترک، تنش محیطی (σ_{θ}) است که بیشینه آن در نقاط در معرض پدیده حفره‌زایی روی می‌دهد. علاوه بر این با افزایش 10 C دمای سیال خنک‌کاری، تنش ون‌میسز در موضع ترک به میزان 5 MPa افزایش خواهد داشت و این امر می‌تواند در خستگی حرارتی استوانه و رشد ترک در آن مؤثر باشد و در کنار این عامل، خوردگی و حفره‌زایی نیز موجب تشدید رشد ترک در استوانه می‌شود. در بررسی موتور مشخص شد که انسداد مبدل خنک‌کننده سیال خنک‌کاری به وسیله املاح دریا، می‌تواند عامل این افزایش دما باشد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله مراتب تشکر و قدردانی خود را از شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو (ایپکو) به دلیل حمایت از این تحقیق اعلام می‌دارند.

فهرست علائم

σ_r	تنش شعاعی
σ_{θ}	تنش محیطی
σ_z	تنش محوری

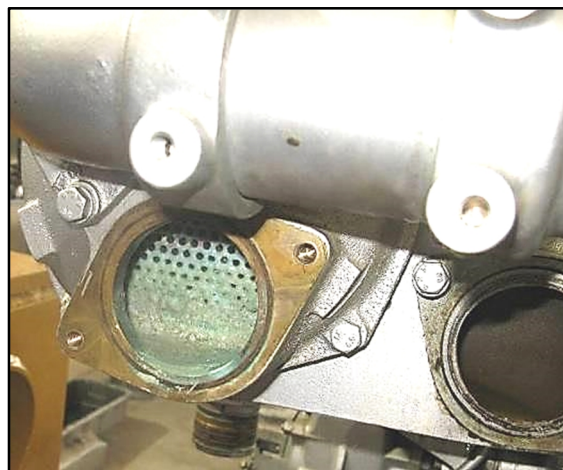
مراجع

- [1] C. M. Branco, V. Infantea, A.S. Britoa and R.F. Martinsb, A failure analysis study of wet liners in maritime diesel engines, *Engineering Failure Analysis*, 9 (2002) 403-421.
- [2] W. Hormaza, L. Mateus, A. Maranon, Failure analysis of a cylinder sleeve from a turbocharged diesel engine, *Engineering Failure Analysis*, 16 (2009) 1355-1365.
- [3] A. Chamani, A. Malakizadi and S. N. Shahangian, Thermal and mechanical stress analysis of the liner of a heavy duty diesel engine, 5th International Conference on Internal Combustion Engines, 1386.
- [4] F. J. Espadafor, J. B. Villanueva, M. T. Garcia and E. C. Trujillo, Analysis of a diesel generator cylinder failure, *Engineering Failure Analysis*, 17 (2010) 913-925.
- [5] Y. Kang Zhou and F.G. Hammitt, Cavitation Damage of Diesel Engine Wet Cylinder Liners, SAE Technical Paper Series 900437, 1990.
- [6] B. Waldhauer, U. Schilling, S. Schnaibel, J. Szopa, Piston damages - Recognising and rectifying, MSI Motor Service International GmbH, 2005.
- [7] SAE J431, Automotive gray iron castings standard, SAE International, 2000.
- [8] PSA PEUGEOT-CITROEN Standard NO. B51 1110, Structural cast irons: Metallurgical requirements, 2004.
- [9] ABAQUS user manual, ver. 6.10.1, Abaqus Inc., 2010.

همان طور که در شکل 6 مشاهده می‌شود، نقطه بیشینه تنش محیطی نزدیک نواحی در معرض پدیده حفره‌زایی است که در شکل 1 ب نشان داده شد. به منظور بررسی اثر افزایش دمای سیال خنک‌کاری بر روی تنش استوانه، دمای سیال خنک‌کاری به 100 C افزایش داده شد.

نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود نشان می‌دهد این تغییر موجب افزایش 5 MPa در تنش ون‌میسز سطح مورد بررسی از استوانه خواهد شد. همان طور که در قسمت 3 ذکر شد، تنش تسلیم چدن استوانه مورد بررسی، نزدیک 250 MPa است که در این صورت تنش ون‌میسز استوانه در قسمت ترک از 106,6 MPa به 111,7 MPa خواهد رسید و این امر شرایط بحرانی را در استوانه و در طولانی مدت ایجاد کرده و موجب تشدید خستگی حرارتی استوانه می‌شود.

بررسی دیگر قطعات موتور نشان می‌داد که مبدل‌های خنک‌کننده سیال خنک‌کاری، تا حدود 50 در صد به وسیله املاح آب دریا مسدود شده است (شکل 7). این مشکل می‌تواند موجب عدم خنک‌کاری مطلوب سیال موتور و افزایش دمای آن و در نتیجه افزایش دمای استوانه شود. از سوی دیگر بالا رفتن تنش حرارتی در کنار خوردگی و حفره‌زایی موجب تشدید رشد ترک در استوانه می‌شود.



شکل 7: انسداد قسمتی از مبدل خنک‌کننده سیال خنک‌کاری

5. نتیجه‌گیری

استوانه موتورهای دیزل دریایی غالباً از نوع بوش تر است که در معرض خرابی‌هایی مانند خوردگی، حفره‌زایی و ترک‌های حرارتی هستند. در بررسی استوانه یک موتور دیزل دریایی V شکل 12 استوانه، خرابی‌های خوردگی و حفره‌زایی مشهود بود اما رشد ترک در این استوانه در نقاطی دور از این خرابی‌ها مشاهده شد.

در بررسی موادی استوانه، تجمع رزبریگی گرافیت‌های آزاد در ریزساختار سطح شکست مشاهده شد که این امر می‌تواند در کاهش استحکام استوانه تأثیر داشته باشد. تحلیل تنش در استوانه به روش اجزای



Failure analysis of marine diesel engine liner

M. Rezaei^{1*}, M. Roozban²

¹*Iran Khodro Power train Company, Tehran, Iran, me_rezaei@ip-co.com*

²*Iran Khodro Power train Company, Tehran, Iran, m_roozban@ip-co.com*

*Corresponding Author

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 20 December 2015

Accepted: 17 February 2016

Keywords:

heavy duty diesel engine

wet liner

crack

failure analysis

ABSTRACT

Marine diesel engines are in the heavy duty diesel engines group with high output power. These engines have wet liner sleeve that cooling water surrounded it. The cooling heat transferred to space water. The engine combustion in one side and cooling water and liner interaction at other side create different physical and chemical phenomena. Liner cracking and fracture is probable phenomenon and have different reasons such as over thermal stresses, cavitation or corrosion. These failures cause to general engine overhaul and liner replacing. This paper presents the study of liner cracking of V12 marine diesel engine. The results have shown that the increasing of the cooling water temperature accelerates the liner fatigue and cracking. Liner corrosion and cavitation have additional effects on this failure.



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