

Jan MONIETA*

**BADANIE ZUŻYCIA WYBRANYCH ELEMENTÓW
OKRĘTOWYCH ŚREDNIOOBROTOWYCH
SILNIKÓW O ZAPŁONIE SAMOCZYNNYM
ZASILANYCH PALIWAMI POZOSTAŁOŚCIOWYMI**

**WEAR INVESTIGATIONS OF SELECTED ELEMENTS
OF MEDIUM SPEED DIESEL ENGINES FEEDED WITH
RESIDUAL FUELS**

Słowa kluczowe:

silniki okrętowe, wybrane elementy, zużycie eksploatacyjne

Key words:

marine diesel engines, selected elements, operating wear

Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki badań wybranego obiektu, elementów i węzłów tribologicznych w aspekcie procesów zużycia. Obiektami badań były średnio-obrotowe silniki produkowane na licencji firmy Sulzer. Wśród badanych typów silników ten zasilany paliwami pozostałościowymi podlegał intensywnemu zużyciu. Paliwa te zawierają znaczne ilości siarki, wody oraz odznaczają się dużą liczbą Conradsona.

* Akademia Morska, Instytut Eksploatacji Siłowni Okrętowych, ul. Wały Chrobrego 1-2, 70-500 Szczecin, Polska.

Badania zużycia prowadzono w naturalnych warunkach eksploatacji. Opisano także warunki, w których eksploatowane były badane silniki, gdzie występowały często niesprzyjające warunki tropikalne. Stwierdzono istotne zużycie czopów wału korbowego, tulei cylindrowych, tłoków i głowic.

Intensywne zużycie wynika z konstrukcji silnika, w którym system smarowania tłoków i tulei oraz łożysk wału korbowego nie jest rozdzielony. Badania zużycia prowadzono głównie z zastosowaniem biernej obserwacji, pomiarów geometrycznych, analizy obrazów oraz z zastosowaniem biernych i biernoczynnych eksperymentów diagnostycznych. Problemem w badanych silnikach oprócz intensywnego zużycia materiałów metalowych było tworzenie się osadów. Celem badań była również identyfikacja rodzajów zużycia.

WPROWADZENIE

Starzenie fizyczne to procesy zachodzące w materiałach części obiektu w wyniku wymuszeń wewnętrznych i zewnętrznych, skutkujące nieodwracalnymi zmianami własności użytkowych elementów [L. 12]. Procesy starzenia i zużycie występują podczas eksploatacji obiektu technicznego, wpływają destrukcyjnie na ich stan techniczny i przyczyniają się do uszkodzeń. Rozróżnia się starzenie fizyczne i moralne.

Zmiana stanu technicznego silnika spalinowego jest wynikiem zużycia powierzchniowego i objętościowego oraz uszkodzeń. Intensywność zużycia zależy od czynników wymuszających jak: stałe lub zmienne obciążenie cieplne i mechaniczne, jakość rozpylania paliwa, tarcie zewnętrzne i w poszczególnych układach tribologicznych. Tarcie zewnętrzne według normy PN-91/M-04301 dotyczy ciał znajdujących się w bezpośrednim styku powierzchniowym. Wpływ czynników wymuszających zależy od: zapotrzebowania przez odbiorniki mocy silnika spalinowego; własności fizykochemicznych mediów (paliwa, oleju smarującego, wody chłodzącej i powietrza); wymaganego czasu na wykonanie zadań.

Zmiana własności stereometrycznych i fizykochemicznych warstwy wierzchniej elementów maszyn powoduje zmianę ich własności użytkowych, tzn. tribologicznych, zmęczeniowych, antykorozyjnych, elektrycznych, cieplnych i innych. W materiałach przy wymuszeniach mechanicznych, cieplnych, chemicznych lub ich kombinacji powstają zmiany odwracalne i nieodwracalne powodujące występowanie w nich naprężeń.

OBIEKT BADAŃ

Badaniami objęto silniki 6AL20H napędu prądnic na statkach morskich. Są to silniki 4-suwowe o zapłonie samoczynnym, rzędowe, nienawrotne chłodzone wodą, z bezpośrednim wtryskiem paliwa, doładowane za pomocą turbosprężarki i chłodzeniem powietrza doładowującego. Silniki wyposażone są w tłoki

chłodzone olejem. Kanał wlotu powietrza i kanał wylotu spalin wyprowadzone są po tej samej stronie głowicy cylindrowej.

Statki z badanymi silnikami często eksploatowane były w strefach tropikalnych. Warunki tropikalne określono jako: ciśnienie atmosferyczne 1000 hPa, temperatura powietrza przed sprężarką $t_0 = 318$ K, temperatura wody chłodzącej morskiej $t_{wJ} = 305$ K. Silniki te pracowały często z małym obciążeniem i przy częstych jego zmianach. Warunki pracy silnika okrętowego w procesach przejściowych zależą nie tylko od właściwości silnika, ale od właściwości siłowni i zespołu napędowego, dlatego charakterystyki nastawy paliwowej i mocy czynnej wyznaczano indywidualnie dla każdego statku [L. 10, 11].

Powietrze trafiające do komory spalania również oddziałuje na warunki pracy jej elementów. Wilgoć oraz sole zawarte w powietrzu i wodzie morskiej intensyfikują procesy korozyjne.

ZUŻYCIE W SYSTEMACH TRIBOLOGICZNYCH SILNIKA SPALINOWEGO

Zużycie elementu obiektu to trwałe, niepożądane zmiany jego stanu zachodzące w czasie eksploatacji, prowadzące do stopniowego wyczerpania potencjału użytkowego obiektu. Zużycie elementów silnika spalinowego zależy od rodzaju ich smarowania. W tłokowych silnikach spalinowych występuje zazwyczaj jednocześnie kilka rodzajów zużycia zależnie od węzła tribologicznego i wymuszeń zewnętrznych, a najczęściej występuje zużycie [L. 1, 2, 10]: ścierne, adhezyjne, zmęczeniowe, korozyjne, kawitacyjne, erozyjne i ciepłne. Niektóre z postaci zużycia Z oddziałują wzajemnie, więc ogólne równanie zużycia układu tribologicznego można napisać w postaci:

$$Z = Z_s - Z_a - Z_z - Z_k - Z_{kw} - Z_e - Z_c - Z_{az} - Z_{ak} - Z_{as} - Z_{zk} - Z_{ks} - Z_{kkw} - Z_{ekw} - Z_{zkw} - Z_{akz} - Z_{ask} - \dots \quad (1)$$

gdzie zużycie: Z_s – ścierne, Z_a – adhezyjne, Z_z – zmęczeniowe, Z_k – korozyjne, Z_{kw} – kawitacyjne, Z_e – erozyjne, Z_c – ciepłne, Z_{az} – adhezyjno-zmęczeniowe, Z_{ak} – adhezyjno-korozyjne, Z_{as} – adhezyjno-ścierne, Z_{zk} – zmęczeniowo-korozyjne, Z_{ks} – korozyjno-ścierne, Z_{kkw} – korozyjno-kawitacyjne, Z_{ekw} – erozyjno-kawitacyjne, Z_{zkw} – zmęczeniowo-kawitacyjne, Z_{akz} – adhezyjno-korozyjno-zmęczeniowe, Z_{ks} – korozyjno-ścierne, Z_{ask} – adhezyjno-ścierno-korozyjne.

Zużycie korozyjne przyspiesza zużycie zmęczeniowe, a zużycie adhezyjne może zająć po usunięciu warstw tlenkowych. Jednak w tłokowych silnikach spalinowych dominują następujące rodzaje zużycia [L. 10]:

$$Z = Z_s - Z_a - Z_k - Z_z \quad (2)$$

gdzie oznaczenia jak we wzorze (1).

Dlatego w dalszej części opisano stwierdzone elementarne dominujące procesy zużycia w przykładowych istotnych elementach silnika.

ZUŻYCIE ŚCIERNE

Występuje ono wówczas, gdy w obszarze tarcia jest ścierniwo, a oddzielanie cząstek następuje w wyniku mikroskrawania, rysowania i/lub bruzdowania. Intensywność zużycia i ogólna postać funkcji opisującej zużycie może mieć postać [L. 10]:

$$J_s = \frac{Z_s}{S} = Wr(v + C)N \lg \frac{HB_m}{HB_s} = f(N, v, HB_m, HB_s, r, D, C_s, C_w) \quad (3)$$

gdzie:

- S – droga tarcia,
- W – współczynnik charakteryzujący zużycie,
- r – promień ścierniwa,
- v – prędkość ślizgania,
- C_t – stała,
- N – obciążenie zewnętrzne,
- HB_m – twardość bardziej miękkiego materiału współpracującego,
- HB_s – twardość ścierniwa,
- D – średnica części trącej,
- C_s, C_w – stężenie ścierniwa i wody.

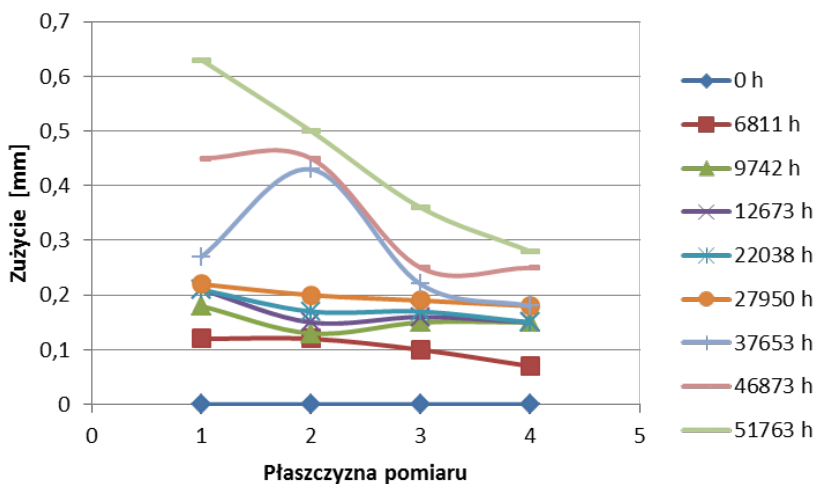
Zużyciu ściernemu ulegają przede wszystkim tuleje cylindrowe. Tuleja cylindrowa jest obciążona składową normalną siłą gazowej i masowej tłoka, która w czasie obiegu zmienia wielokrotnie zwrot. Odształcenia tulei mogą powstawać zarówno w fazie montażu silnika, pod wpływem napięcia śrub głowicowych, zwłaszcza nierównomiernego, powodującego deformację tulei, jak i podczas jej eksploatacji. Tuleje ulegają również zużyciu korozyjnemu, adhezyjnemu, pęknięciom powierzchniowym i objętościowym.

Wyniki pomiarów zużycia w dwóch płaszczyznach wzdłuż osi tulei i w 4 płaszczyznach prostopadłych do osi, w zależności od miary ich eksploatacji (czasu pracy), przedstawiono na **Rys. 1**. Maksymalne zużycie pojawia się w górnej części, w obszarze styku pierwszego pierścienia uszczelniającego z gładzią cylindra w ZZ tłoka, a wynosi 0,0124 mm/1000 h pracy.

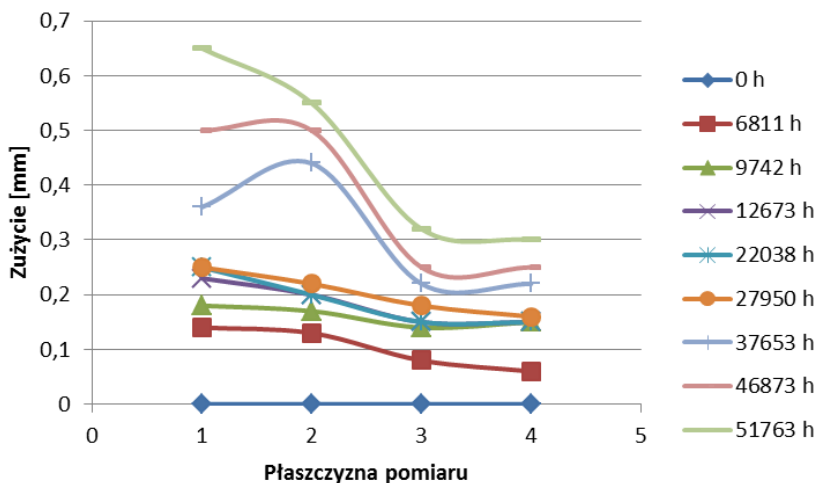
Zużycie ścierne stwierdzono także na czopach wału korbowego skutkujące potrzebą ich szlifowania lub jego wymianą (**Rys. 2**). Czopy korbowe posiadały błędy kołowości, a czopy główne były porysowane i bruzdowane przez zanieczyszczenia. Oceny stanu czopów dokonano za pomocą pomiarów geometrycznych. Dodatkowo wykonano pomiary estymat amplitudowych przyspieszeń

drgań [L. 12] na wysokości wału korbowego przed i po obsłudze okresowej kapitalnej przy tym samym obciążeniu (Rys. 3).

a)



b)



Rys. 1. Wykres warstwowy zużycia ścianki przykładowej tulei cylindrowej silnika w kierunku $D - R$ (dziób – rufa) a) i w kierunku $L - P$ (lewa burta – prawa burta) b)

Fig. 1. The stratified graph wears of wall exemplary cylinder liner of engine in the direction $D - R$ (bow – stern) a) and $L - P$ (port side – starboard side)



Rys. 2. Nadmiernie zużyty czop wału korbowego – widoczne rysy i bruzdy oraz stwierdzono błędy niekołowości

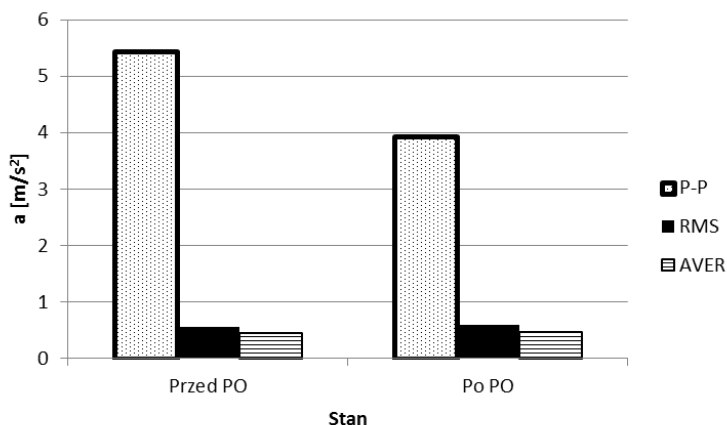
Fig. 2. Unacceptably worn of crank pin – visible scratches and furrow, and found have been identified of circularity errors

ZUŻYCIE NA SKUTEK POWSTAWANIA OSADÓW

Jedną z podstawowych przyczyn stanu niezdatności jest gromadzenie się osadów [L. 9, 10, 11]. Po zakończeniu wtrysku część paliwa pozostaje w przestrzeni pod stożkiem iglicy i podczas spalania oraz rozprzestrzeniania się płomienia kontaktuje się z gorącymi gazami w komorze spalania. Część paliwa, w wyniku swoich cech i niekorzystnych warunków, zamienia się w twarde kokosowe osady o złożonym składzie. Procesowi temu może towarzyszyć zawieszenie iglicy rozpylacza, powodując niezamknięcie przez tę iglicę gniazda, przez co następuje wypływ strugi paliwa. Wpływa to na wzrost temperatury spalin i osadzenie się nagaru na ściankach komory spalania.

W końcowej fazie procesu wtrysku, tuż przed opadnięciem iglicy, przedłuża się wypływ paliwa. Jednocześnie przez otworki rozpylacza przedostają się gazy z cylindra silnika. Przy małych prędkościach obrotowych silnika spaliny, niewłaściwym rozpylaniu i małych temperaturach sprężania czynnika w cylindrze, krople paliwa nie ulegają spalaniu całkowitemu. Łatwo parujące frakcje ulegają spalaniu, a pozostają ciężkie frakcje o silnych wiązaniach międzycząsteczkowych, które przy utlenianiu tworzą asfalteny i smoły o dużej lepkości przylegające do powierzchni metalowych. Gromadzące się na ściankach komory spalania osady pod wpływem dużych temperatur przechodzą w nagar i koks. Przy wzroście temperatury osłabiają się więzi osadów, które

odpadają i unoszone są z gazami wylotowymi lub dostają się na powierzchnie tarcia, będąc ścierniwem.



Rys. 3. Wartości estymat amplitudowych przyspieszeń drgań na wysokości wału korbowego przed i po przeglądzie okresowym

Fig. 3. The values of estimates amplitude of vibration acceleration measured on the height of the crankshaft before and after the periodical survey

Problemy związane ze spalaniem paliw pozostałościowych występowały również w badanych silnikach pomocniczych, które często pracują z bardzo małymi obciążeniami. Powstawanie osadów jest powiązane z budową chemiczną paliwa i z obecnością związków aromatycznych w paliwie.

Przykład tłoka silnika pokrytego dużą ilością osadów pokazano na **Rys. 4**. Badania mas i obrazów osadów na elementach układu zasilania przedstawiono w pracach [L. 3, 4, 5].

ODDZIAŁYWANIA CHEMICZNE ORAZ ZUŻYCIE KOROZYJNE I PRZEZ UTLENIANIE

Zużycie chemiczne powoduje przyspieszenie innych postaci zużycia lub tworzenia się nowych substancji, których usuwanie jest łatwiejsze niż materiału podłoża [L. 7, 10, 11]. Zużycie przez utlenianie to zużycie powierzchni trących się ciał na skutek procesu tworzenia i usuwania utlenionej warstwy wierzchniej [L. 8]. Zużycie korozyjne oznacza stratę materiału bez formowania się nowych substancji [L. 11]. Model intensywności zużycia przez utlenianie niesmarowanych powierzchni ślizgowych podali m.in. Tenwick i Earles w postaci:

$$J_u = \frac{Z_u}{S} = \frac{1}{3} \frac{NC_1}{HBv\phi} \exp(-C_2 / RT_s) \quad (4)$$

gdzie:

- Z_u – zużycie przez utlenianie,
- C_1, C_2 – stałe liniowego równania Archeniusa,
- HB – twardość,
- ϕ – stosunek objętości molowej do objętości molowej żelaza,
- R – indywidualna stała gazowa,
- T_s – temperatura bezwzględna w strefie tarcia, pozostałe oznaczenia jak we wzorze (3).



Rys. 4. Osady na tłoku stwierdzone w czasie przeglądu okresowego silnika

Fig. 4. Deposits on the piston found during the overall survey of engine

Ze względu na agresywne środowisko, wynikające ze spalania paliw pozostałościowych, utlenianie i korozja występują znacząco. Wyniki badań tych procesów dla elementów aparatury wtryskowej silnika AL20/24H przedstawiono w pracy [L. 4]. Do badań zastosowano metodę wagową i analizę obrazów.

ZUŻYCIE I USZKODZENIA GŁOWIC CYLINDROWYCH

Eksploracja elementów komory spalania przebiega w bardzo trudnych warunkach, które charakteryzują się dużą temperaturą, zmiennymi i dużymi ciśnieniami paliwa oraz czynnika roboczego w komorze spalania, przy równoczesnym oddziaływaniu strumienia ciepła pochodzącego od płomieni oraz tłoczonego przez jej wnętrze paliwa [L. 7]. Rodzaj i parametry paliwa są najistotniejszymi czynnikami wpływającymi na warunki pracy tych elementów, a mniejszy wpływ mają parametry powietrza w komorze spalania.

Zawory wylotowe należą do najsilniej obciążonych cieplnie elementów silników spalinowych [L. 6]. Rozkład temperatury w zaworze wylotowym wynika z oddziaływania ładunku roboczego i gazów wylotowych oraz odprowadzania ciepła wzdłuż trzonka zaworu i przez przyłgnięciu zaworu do gniazda.

Powierzchnia przylgni zaworu wylotowego z uwagi na dużą temperaturę jest narażona na korozję. Ruch ślizgowy współpracujących elementów powoduje zwiększenie szybkości korozji wskutek ułatwienia dyfuzji przez zdefektowaną warstwę tlenków oraz gdy warstwy tlenkowe osiągną graniczną grubość, delaminację warstwy tlenków. Odspajanie warstwy tlenków prowadzi do przedmuchów zwiększających lokalnie temperaturę, co intensyfikuje proces zużycia grzybka zaworu i gniazda.

Na **Rys. 5** przedstawiono widok głowicy cylindrowej zdemontowanej w czasie obsługi okresowej. Z rysunku wynika, że głowica jest pokryta od strony komory spalania zwęglonymi osadami, a pozostałe powierzchnie są pokryte oleistymi pozostałościami. Umieszczony w środku rozpylacz wtryskiwacza jest osłonięty przylegającymi osadami.



Rys. 5. Widok głowicy cylindrowej od strony komory spalania

Fig. 5. View of the cylindrical head from the side of a combustion chamber

PODSUMOWANIE

Na podstawie przeprowadzonych badań tribologicznych można sformułować pewne uogólnienia.

Stwierdzone dominujące postacie zużycia to zużycie ściernie, tworzenie się osadów oraz utlenianie i korozja. Spowodowane było ono niekorzystnymi warunkami eksploatacji, stosowaniem tanich i złej jakości paliw oraz niedoskonałościami konstrukcji silnika. Identyfikacji rodzajów zużycia dokonał człowiek na podstawie obserwacji.

Badania w warunkach eksploatacji dużych i ciężkich elementów są utrudnione z zastosowaniem przyrządów pomiarowych o dużej dokładności, a łatwiejsze z zastosowaniem do elementów o małych wymiarach i o małej masie. Istnieje również zapotrzebowanie na badania bezdemontażowe z zastosowaniem diagnostyki technicznej, co dla oceny współpracujących elementów jest możliwe.

Intensywne zużycie węzłów tribologicznych istotnych elementów przyczyniło się do znacznych kosztów napraw i wycofania z eksploatacji statków po okresie około 22 lat, podczas gdy starsze statki z silnikami 5ATL25/30 nadal są eksploatowane przez tego armatora. Dla badanych silników stosowanie tańszych paliw pozostałościowych okazało się nieopłacalne, ze względu na duże koszty obsługi okresowych. Obecne wymogi ekologiczne ograniczają w niektórych portach stosowanie paliw pozostałościowych.

LITERATURA

1. Enthoven J., Spikes H.A.: Infrared and visual study of the mechanism of scuffing. *Tribology Trans.* 1996, t. 39, s. 441–447.
2. Hwang J. H.: Effect of microstructural characteristics on the mechanical and wear properties of grey cast iron cylinder liner for marine diesel engine. *CIMAC Congress 2007, Vienna 2011*, s. 1–8.
3. Monieta J.: Identyfikacja rodzajów zużycia rozpylaczy wtryskiwaczy okrętowych silników spalinowych. *Combustion Engines 2009-SC1*, s. 157–163.
4. Monieta J., Kusiak P.: Badanie zużycia przez utlenianie i korozję powierzchni rozpylaczy wtryskiwaczy silników okrętowych. *Problemy Eksploatacji* 2008 nr 1, s. 113–120.
5. Monieta J., Wójcikowski P.: Investigations of carbon deposit of injector nozzles of marine diesel engines. *First International Congress on Combustion Engines. PTNSS Kongres – 2005. The Development of Combustion Engines. Szczyrk 2005*, s. 86, CD, s. 1–6.
6. Romalho A., Kapsa P., Bouvard G., Abry J. C., Yoshida T., Champentier M., Bourgeois M.: Effect of temperatures up to 400°C on the impact-sliding of valve-seat contact: *Wear* 2009 No. 5–6, s. 777–780.
7. Szczerek M., Wiśniewski M.: *Tribologia i tribotechnika*. Wyd. Instytutu Technologii Eksploatacji, Radom 2000.
8. Tagasaki K., Tajima H., Nakashima M., Ishida H.: Verbrennungsprobleme beim Einsatz minderwertiger Schiffsdieselmotoren. *Motortechnische Zeitschrift* 2002 No. 6, s. 484–488.
9. Ullmann J., Geduldung M., Stutzenberger H., Caprotti R., Balfour G.: Investigation into the formation and prevention of internal diesel injection deposits, *SAE Technical Paper No 2008-0100926*.
10. Włodarski J.K.: *Tłokowe silniki spalinowe – procesy trybologiczne*. WKiŁ, Warszawa 1982.
11. Włodarski J.K.: *Stany eksploatacyjne okrętowych silników spalinowych*. Wydawnictwo Uczelniane Wyższej Szkoły Morskiej, Gdynia 2001.

12. Żółtowski B., Cempel C. (red.): Inżynieria Diagnostyki Maszyn, praca zbiorowa, Polskie Towarzystwo Diagnostyki Technicznej, Instytut Technologii Eksploatacji – PIB, Radom 2004.

Summary

The paper presents the results of the selected object, the elements and of tribological systems in the aspect of wear processes. The objects of research were medium speed engines produced under license from Sulzer. Among the tested objects were the types of engines powered by residual fuels subject to intensive wear. These fuels contain significant amounts of sulphur and water and have a large number of Conradson carbon residue.

The wear investigations were performed under natural conditions. The paper also describes the conditions under which the test engines operate, which are often unfavourable tropical conditions. A significant wear of crank pins, cylinder liners, pistons, and cylinder heads were indicated.

Intensive wear results from engine design, in which the lubrication system of pistons and sleeves and bearings of the crankshaft is the same. The wear investigations were carried out by applying passive observation, geometrical measurements, and analysis of images, and with applying passive and passive-active diagnostic experiments. The inspected engines showed intensive wear of metal materials and the formation of deposits. An identification of types of the wear was also a purpose of the research.