

Zbigniew Korczewski\*

## IDENTYFIKACJA USZKODZEŃ TŁOKÓW SILNIKÓW OKRĘTOWYCH METODAMI ENDOSKOPOWYMI W EKSPLOATACJI

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono wybrane zagadnienia diagnostyki endoskopowej przestrzeni roboczych okrętowych tłokowych silników spalinowych. Przybliżono podstawy teoretyczne procesu powstawania uszkodzeń tłoków układów cylindrowych w aspekcie identyfikacji i genezy znanych i rozpoznawalnych stanów niezdatności eksploatacyjnej. Zaprezentowano wyniki badań endoskopowych dotyczące uszkodzeń tłoków, które najczęściej występowały w procesie eksploatacji wybranych typów silników okrętowych.

**Słowa kluczowe:** diagnostyka techniczna, badanie endoskopowe, okrętowy tłokowy silnik spalinowy, uszkodzenia tłoków

### Wstęp

Badanie wizualne powierzchni, tworzących przestrzenie robocze okrętowych tłokowych silników spalinowych z zastosowaniem specjalistycznych wzierników tzw. endoskopów to obecnie niemal podstawowa metoda diagnostyki technicznej [4]. Struktura powierzchniowa materiału konstrukcyjnego widoczna jest podczas badań jak przez lupę, zazwyczaj z pewnym powiększeniem, co umożliwia wykrycie, rozpoznanie i ewentualną ocenę ilościową występujących defektów i wad materiałowych, które zazwyczaj nie generują obserwowalnych zmian wartości parametrów diagnostycznych. Badanie endoskopowe wyłączono z ruchu silnika pozwala natychmiast ocenić stopień zużycia i zanieczyszczenia jego elementów konstrukcyjnych. Tłoki układów cylindrowych, stanowiąc newralgiczny element silnika, o największej częstości występowania uszkodzeń, charakteryzują się wysoką podatnością diagnostyczną

### 1. Fizyka uszkodzeń eksploatacyjnych

Tłok, jako ruchome dno komory spalania układu cylindrowego silnika stanowi element konstrukcyjny narażony na największe obciążenia mechaniczne i cieplne. Oddziaływanie na materiał konstrukcyjny denka tłoka ciśnieniami osiagającymi 20 MPa i temperatury do 800 K [10] powoduje, że w zakresie ustalonych obciążeń maksymalnych i intensywnych (forsownych) zmian częściowego obciążenia mogą nastąpić na tyle istotne deformacje kształtu i zmiany

---

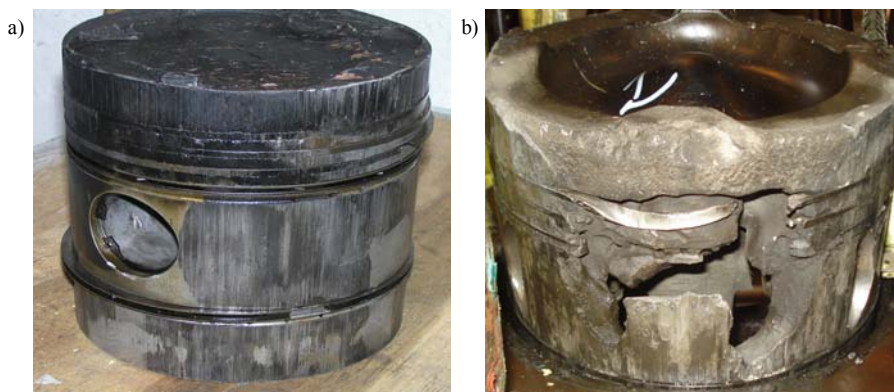
\* *Katedra Silowni Okrętowych, Wydział Oceanotechniki i Okrętownictwa, Politechnika Gdańska, z.korczewski@gmail.com*

właściwości wytrzymałościowych materiału konstrukcyjnego tłoka, że w wyniku ich rozwoju następują zwykle jego poważne uszkodzenia pierwotne, które nieuchronnie prowadzą do rozległych uszkodzeń wtórnych układu tłokowo-korbowego i całego silnika.

W zależności od miejsca i charakteru występowania uszkodzeń układ konstrukcyjny tłoka można podzielić na następujące elementy:

- denko tłoka – pęknięcia, odkształcenia plastyczne, przegrzanie i przepalenie,
- część pierścieniowa – pęknięcia, zatarcia, wyłamanie półek pierścieni,
- część prowadząca (nośna\*) – korozja, pęknięcia, zatarcia,
- piasta sworzni tłokowego – zatarcie i pęknięcia piasty, pęknięcia, wykruszenia rowków pierścieni ustalających sworzni.

Natomiast ze względu na możliwości bezpośredniego wykrycia tych uszkodzeń metodami endoskopowymi to są one ograniczone tylko i wyłącznie do denka tłoka. Dlatego, o możliwych przyczynach uszkodzeń zlokalizowanych w pozostałych elementach tłoka można wnioskować dopiero po jego zdemontowaniu z silnika (ewentualnie po zdemontowaniu bloku cylindrowego), z powodu uszkodzeń zlokalizowanych na gładzi tulei cylindrowej – rys. 1.



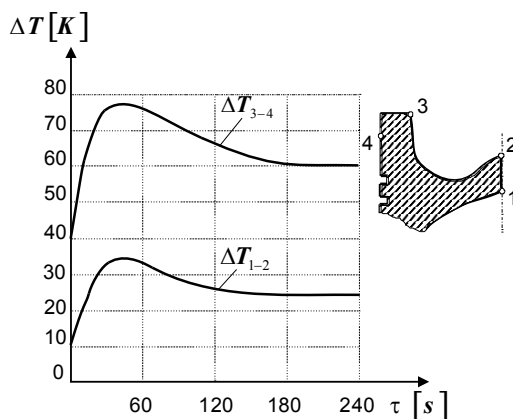
**Rys. 1.** Uszkodzenia części pierścieniowej i prowadzącej tłoka, a) tłok ze śladami zatarcia w części pierścieniowej i prowadzącej, rozkucie półek pierścieni, b) zniszczony tłok silnika

Najczęstszą przyczyną uszkodzenia tłoków są zakłócenia funkcjonowania układu zasilania silnika paliwem i powietrzem, szczególnie podczas jego rozruchu. Prowadzi to zazwyczaj do stukowego (detonacyjnego) spalania paliwa, które charakteryzuje bardzo duża szybkość rozprzestrzeniania się płomienia w komorze spalania (nawet kilkanaście razy większa niż przy normalnym spalaniu).

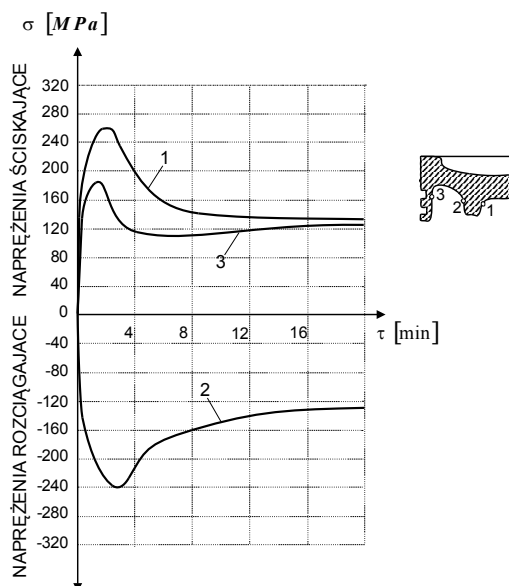
Następuje intensywny wzrost pulsacji ciśnienia i temperatury czynnika roboczego i w konsekwencji wzrost cieplnego i mechanicznego obciążenia elementów komory spalania, w szczególności tłoka [6]. W rezultacie wzrastających gradientów temperatury w strukturze konstrukcyjnej tłoka (rys. 2) pojawiają się jego cykliczne deformacje i wzrost naprężeń cieplnych (rys. 3), które znacznie przekraczają wartości odpowiadające stanom pracy ustalonej silnika (nawet dwukrotnie) [3].

\* Przenosi siłę normalną na gładź cylindra





Rys. 2. Zmiany wartości gradientów temperatury w materiale konstrukcyjnym tłoka silnika szybkoobrotowego wykonanego ze stopu aluminium podczas wzrostu obciążenia [3]



Rys. 3. Zmiany wartości naprężeń cieplnych w materiale konstrukcyjnym tłoka wolnoobrotowego silnika okrętowego MAN Diesel & Turbo typu K6Z57/80 podczas forsownego wzrostu obciążenia (30 sekundowe dojście do maksymalnej dawki paliwa i osiągnięcie nominalnej prędkości obrotowej wału korbowego po 150 sekundach) [3]

Przy czym szczególnie newralgicznym rejonem tłoka, z punktu widzenia stanu naprężeń cieplnych, jest jego wewnętrzna powierzchnia, gdzie ma miejsce największe nagromadzenie materiału (rejon piast sworznia tłokowego) [3, 10]. Naprężenie cieplne denka tłoka, w przypadku wysokodoładowanych silników okrętowych (średnie ciśnienie użyteczne powyżej 2 MPa), mogą osiągać porównywalne wartości w stosunku do naprężeń wewnętrznych od sił gazowych [10].

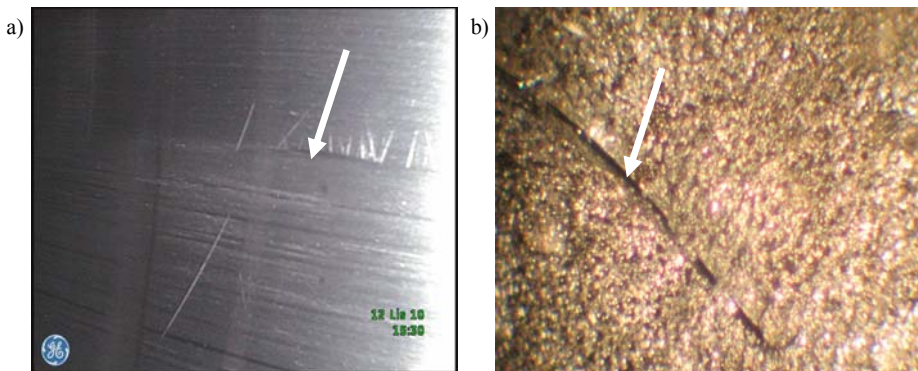
## 2. Endoskopowy obraz uszkodzeń

Na wyposażeniu bazy diagnostycznej Katedry Siłowni Okrętowych Politechniki Gdańskiej znajduje się wideoendoskop cyfrowy firmy EVEREST typu XLG3 wyposażony w głowicę pomiarową umożliwiającą identyfikację jakościową i ilościową wykrytych defektów powierzchniowych metodą „Cienia” – rys. 4. Szczegółową charakterystykę wideoendoskopu wraz z metodyką realizacji diagnostycznych badań endoskopowych silników okrętowych zawierają publikacje [1, 2, 4, 12].



**Rys. 4.** Widok ogólny wideoendoskopu pomiarowego firmy EVEREST typu XLG3 [12]

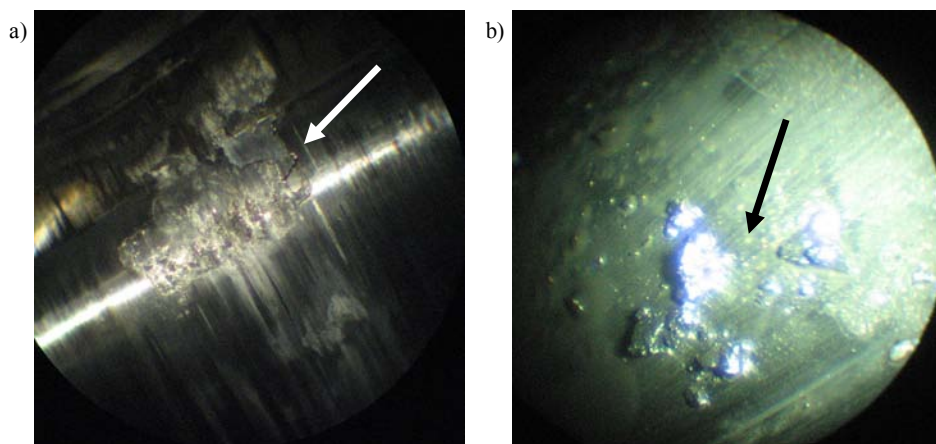
Skutkiem znacznego, lokalnego przegrzania denka tłoka, aż do przekroczenia granicy plastyczności materiału konstrukcyjnego, jest jego miejscowe spęczenie. Jeżeli wzrost temperatury denka tłoka jest tylko chwilowy może to skutkować również chwilowym przycieraniem, a nawet zakleszczaniem korony tłoka w gładzi cylindrowej – rys. 5a [5].



**Rys. 5.** Endoskopowy obraz mechanicznych i ciepno-zmęczeniowych konsekwencji zacierania tłoka w tulei cylindrowej, a) gładź tulei cylindrowej – ślady tarcia części prowadzącej tłoka, b) denko tłoka – pęknięcie zmęczeniowe

Inną konsekwencją tego zjawiska jest zmęczenie niskocyklowe denka tłoka, aż do wystąpienia pęknięć, związane z cyklicznymi naprężeniami ściskającymi i rozciągającymi materiału konstrukcyjnego – rys.5b. Są one wynikiem cyklicznego, odpowiednio: przegrzewania i rozszerzania się materiału oraz jego stygnięcia i kurczenia się, w trakcie realizacji cyklu roboczego silnika.

Jeżeli wzrost temperatury denka tłoka jest na tyle duży, że układ chłodzenia silnika nie jest w stanie przejąć strumienia ciepła od elementów konstrukcyjnych komory spalania następuje trwały wzrost wymiarów zewnętrznych korony tłoka, który zmienia warunki smarowania węzła ciernego tłok – tuleja. W takiej sytuacji, ze względu na „sprzyjające” warunki zaistnienia zużycia adhezyjnego II-ego rodzaju, niszczenia warstwy wierzchniej materiału konstrukcyjnego tłoka (wykonanego ze stopu aluminium), które polega na miejscowym szczieniu wierzchołków powierzchni trących tłoka i tulei cylindrowej oraz odrywaniu cząstek aluminium i ich rozmywania na gładzi cylindrowej – rys.6a. Często powierzchnia obszarów nawalcowania nie obejmuje całego obwodu tulei, co przy niewielkiej grubości nawalcowania świadczy zazwyczaj, że nastąpiło jedynie krótkotrwałe przekroczenie temperatury płynięcia materiału korony tłoka. Prawidłowa praca pierścieni, które po obniżeniu temperatury denka tłoka i poprawie warunków smarowania, „zdejmują” nawalcowany na powierzchni tulei materiał tłoka, skutkuje niestety intensywnym wzrostem ilości opiłków aluminiowych w układzie smarowania silnika – rys.6b.

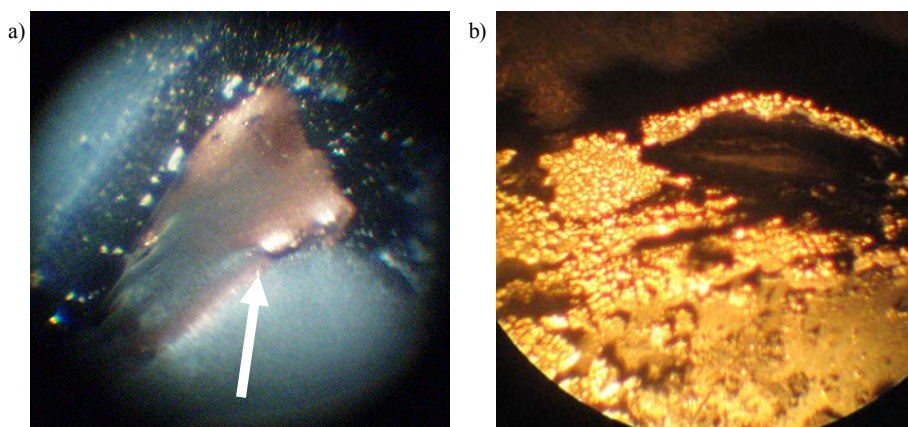


**Rys. 6.** Endoskopowy obraz skutków zużycia adhezyjnego tłoka ze stopu aluminium, a) gładź tulei cylindrowej – ślady nawalcowania warstwy materiału tłoka (stop aluminium), b) gładź tulei cylindrowej – opiłki metaliczne (stop aluminium)

Przedstawiony przebieg powstania uszkodzenia jest najbardziej prawdopodobny w sytuacji, kiedy silnik pracuje na biegu luzem lub na obciążeniach częściowych. W takich warunkach zmieniają się szczególnie niekorzystnie warunki pracy układu zasilania silnika paliwem, mającego bezpośredni wpływ na przebieg procesu spalania w cylindrze. Zgodnie z obowiązującymi zasadami eksploatacji silników okrętowych, jak i wymaganiami technologicznymi producentów, parametry regulacyjne układu wtryskowego tj.: dawkę paliwa

i geometryczny początek tłoczenia ustala się dla warunków obciążenia nominalnego. Jednak w przypadku pracy na obciążeniach częściowych zwiększa się znacznie nierównomierność dawkowania pomp wtryskowych, co oznacza, że do niektórych cylindrów dostarczana jest dawka paliwa wielokrotnie większa niż dawka zapotrzebowana, optymalna dla zadanego obciążenia silnika. W przypadku silników wielocylindrowych sytuacja ta jeszcze się pogarsza, bowiem w niektórych cylindrach, pomimo dostarczenia paliwa, nie dochodzi do jego samozapłonów. Podanie więc, większej niż zapotrzebowana dawki paliwa, czy to w wyniku nierównomierności dawkowania, czy też w wyniku gromadzącego się paliwa przy wypadaniu samozapłonów, prowadzi również do spalania detonacyjnego z omówionymi powyżej konsekwencjami\*.

Bardzo często, wraz z występowaniem spalania detonacyjnego, następuje wzrost zwłoki samozapłonu, któremu, w sytuacji przesunięcia spalania poza GMP, towarzyszy intensywny wzrost temperatury wszystkich elementów komory spalania (w szczególności tłoka). Przeniesienie procesu spalania paliwa na suw rozprężania (pracy), przy niecałkowitym i niezupełnym charakterze tego procesu, skutkuje zwiększeniem ilości powstających osadów nagaru na powierzchniach ograniczających komorę spalania. Gruba warstwa nagaru na denku tłoka (rys.7b), powstająca szczególnie intensywnie przy pracy rozregulowanego silnika z obciążeniami częściowymi, pogarsza w sposób istotny warunki przepływu ciepła prowadząc w konsekwencji do przegrzania denka tłoka – rys. 7a.



**Rys. 7.** Endoskopowy obraz przegrzanego denka tłoka, a) denko tłoka – miejscowe przegrzanie materiału konstrukcyjnego, b) denko tłoka – gruba warstwa nagaru

Inną przyczyną przegrzania tłoka jest niedostateczne chłodzenie obszaru pierwszego pierścienia uszczelniającego. Jeżeli czas pomiędzy uruchomieniem, zasprężeniem i pełnym obciążeniem silnika okrętowego zgodny jest z wymaganiami producenta, to przy drożnym, poprawnie funkcjonującym układzie chłodzenia, silnik powinien być w ustalonym sta-

\* *Dodatkową konsekwencją detonacyjnego spalania paliwa w cylindrach silnika jest często złamanie pól pierścieniowych (najczęściej między I i II pierścieniem uszczelniającym, a także uszkodzenia mechaniczne w układzie korbowym.*



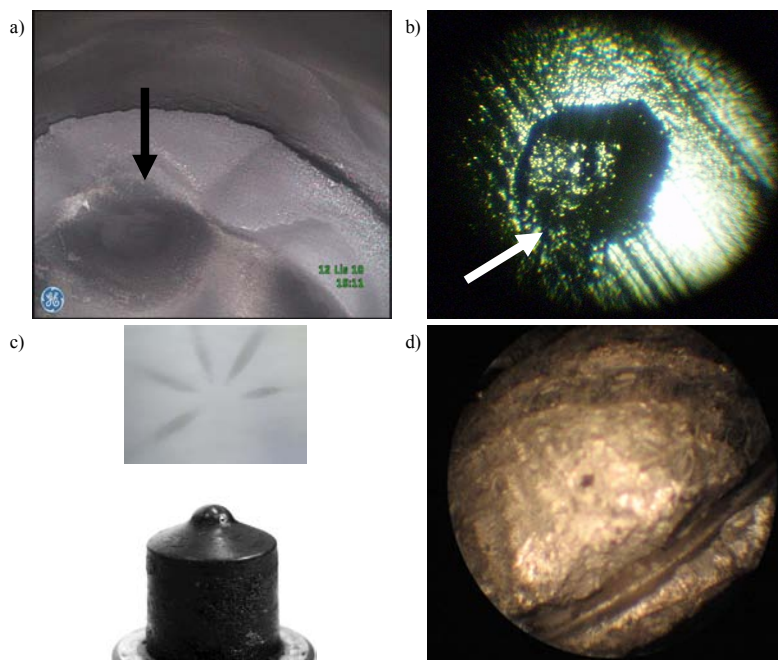
nie ciepłym, co oznacza, że układ chłodzenia powinien „nadażać” z odbiorem strumienia ciepła od zespołu tłok – pierścienie – tuleja cylindrowa (TPC).

Jednak w wyniku, na przykład nadmiernych osadów węglanów wapnia ( $\text{CaCO}_3$ ) i magnezu ( $\text{MgCO}_3$ ), tzw. kamienia kotłowego, powstających w przestrzeniach chłodzących silnika w wyniku termicznego rozkładu wodorowęglanów wapnia i magnezu zawartych w wodzie, może dojść do całkowitej lub miejscowej utraty drożności układu chłodzenia. Nie bez znaczenia pozostaje wpływ nadmiernych drgań przenoszonych na konstrukcje silnika od śruby napędowej okrętu. Mogą one intensyfikować proces odrywania się warstw kamienia kotłowego z powierzchni wewnętrznych kanałów chłodzących, które dławią przepływ czynnika chłodzącego. Rozległy charakter uszkodzeń tłoków, zwłaszcza znaczne ubytki (poprzez dyfuzję wysokotemperaturową) materiału korony tłoka świadczą o długotrwałym oddziaływaniu wysokich temperatur. Istotna jest również lokalizacja największych uszkodzeń tłoka, które w takim przypadku występują na kierunku oddziaływania siły normalnej, czyli w naturalnym kierunku odprowadzenia strumienia ciepła od tłoka. Rozległe uszkodzenia w tym rejonie tłoka świadczą o utracie możliwości efektywnego odprowadzenia ciepła poprzez pierwszy pierścień uszczelniający do tulei cylindrowej. W przypadku chwilowego przeciążenia silnika momentem obrotowym, występuje inny obraz zużycia – w tym przypadku korona tłoka, przy poprawnie działającym wtryskiwaczu, rozszerza się równomiernie i obszar zużycia na powierzchni tłoka jest również równomierny na jego obwodzie, a całe zjawisko zużycia adhezyjnego zachodzi przy znacznie niższej temperaturze. Widoczne są wówczas wyraźne bruzdy i nawalcowania, zarówno na tłoku, jak i tulei cylindrowej. Natomiast przy nieprawidłowo działających wtryskiwaczach, np. w wyniku utraty szczelności rozpylacza i utraty drożności jego otworów rozpylających (rys. 8c), niecałkowite spalanie paliwa w cylindrach silnika skutkuje zwiększeniem intensywności powstających osadów nagaru zmywanych z gładzi cylindrowej olejem smarowym.

Jednak część nagaru gromadząca się w rowkach pierścieniowych tworzy szczelną, trudno usuwalną warstwę osadu, w której stopniowo unieruchamiają się pierścienie tłokowe. Tracą one zdolność sprężystego przylegania do gładzi cylindrowej, w konsekwencji następuje utrata szczelności komory spalania i przedmuch gorących spalin wzdłuż gładzi cylindrowej do skrzyni korbowej, co skutkuje spalaniem filmu olejowego i całkowitym unieruchomieniem pierścieni tłokowych (rys. 9). W takiej sytuacji dochodzi bardzo szybko do rozległych zatarć w części prowadzącej tłoka. Inną przyczyną unieruchomienia pierścieni tłokowych jest przedostanie się do rowków pierścieniowych opiłków metalicznych stanowiących produkt zużycia adhezyjnego tłoka i gładzi cylindrowej, którego pierwotne przyczyny opisano w punkcie 2 niniejszego opracowania.

Często spotykanym uszkodzeniem denka tłoka jest bezpośrednie uderzenie o jego powierzchnię grzybków zaworowych, końcówki wtryskiwacza oraz urwanych części konstrukcyjnych umieszczonych w dole płyty głowicy cylindrowej. Z reguły takie uszkodzenia tłoków cylindrowych nie eliminują ich z dalszej eksploatacji, pod warunkiem, że ich charakter i rozmiary mieszczą się w granicach tolerancji eksploatacyjnych wyznaczonych przez konstruktorów silnika. Obecność płytkich wgniecień na powierzchni korony denka tłoka, o rozmiarach i kształcie grzybków zaworowych (rys. 10a,b), świadczy o uderzeniach tłoka o zawory, w wyniku wykasowania luzu między otwartymi zaworami a denkiem tłoka,





**Rys. 8.** Endoskopowy obraz uszkodzeń denka tłoka spowodowanych skokowanym paliwem w otworach rozpylacza, a) denko tłoka – ślady dopalania paliwa, b) denko tłoka – wytopiony otwór, c) końcówka rozpylacza – nagar w rejonie otworów rozpylających oraz obraz rozpylania paliwa na bibule stanowiska kontrolnego, d) stopiony tłok z widoczną pozostałością rowka pierścieniowego

znajdującego się w GMP po suwie wylotu. Pierwotną przyczyną takich uderzeń może być rozregulowanie faz rozrządu lub zawisanie trzonka zaworowego w prowadnicy\*, ale również nadmierne luzy w układzie korbowym np. w wyniku zużycia piasty sworznia tłokowego\*\*, panewek łożyskowych etc. Wtórą konsekwencją takich uderzeń jest przeniesienie obciążeń uderzających na pozostałe elementy układu rozrządu zaworowego: krzywki, popychacze, dźwignie zaworowe etc, które również mogą ulec rozległym uszkodzeniom.

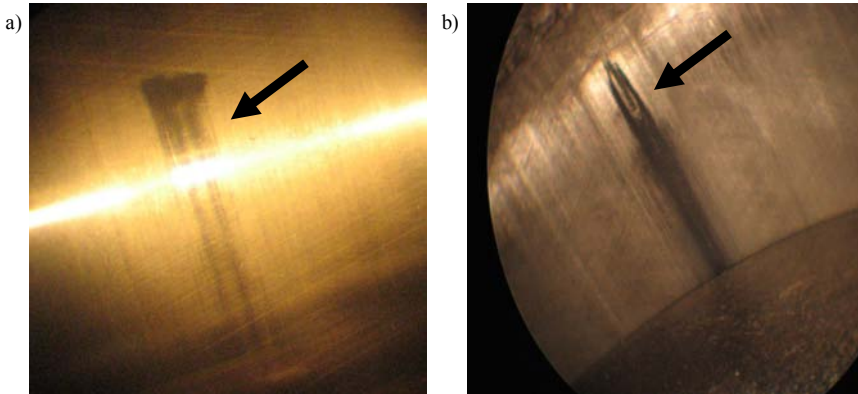
W niektórych rozwiązaniach tłoków wykonywane są celowo podtoczenia o kształcie grzybków zaworowych na koronach denek tłoków, jednak są one znacznie głębsze i mają za zadanie wyeliminowanie możliwości powstawania mechanicznych uszkodzeń trzonków zaworowych (i ich wtórnych konsekwencji w postaci rozległych uszkodzeń układów cylindrowych) w przypadku rozregulowania rozrządu zaworowego. Jednak ma to sens tylko wówczas, gdy głębokość podtoczenia jest większa od skoku zaworowego.

\* Podstawy teoretyczne zjawiska obszernie opisano w monografii Autora pt.: „Endoskopia silników okrętowych” AMW Gdynia 2008.

\*\* Dotyczy to zakłóceń pracy sworznia pływającego (obracającego się zarówno w łbie korbowodu jak i w piastach) polegające na jego zakleszczeniu w łbie korbowodu, co prowadzi do nadmiernego zużycia piasty.







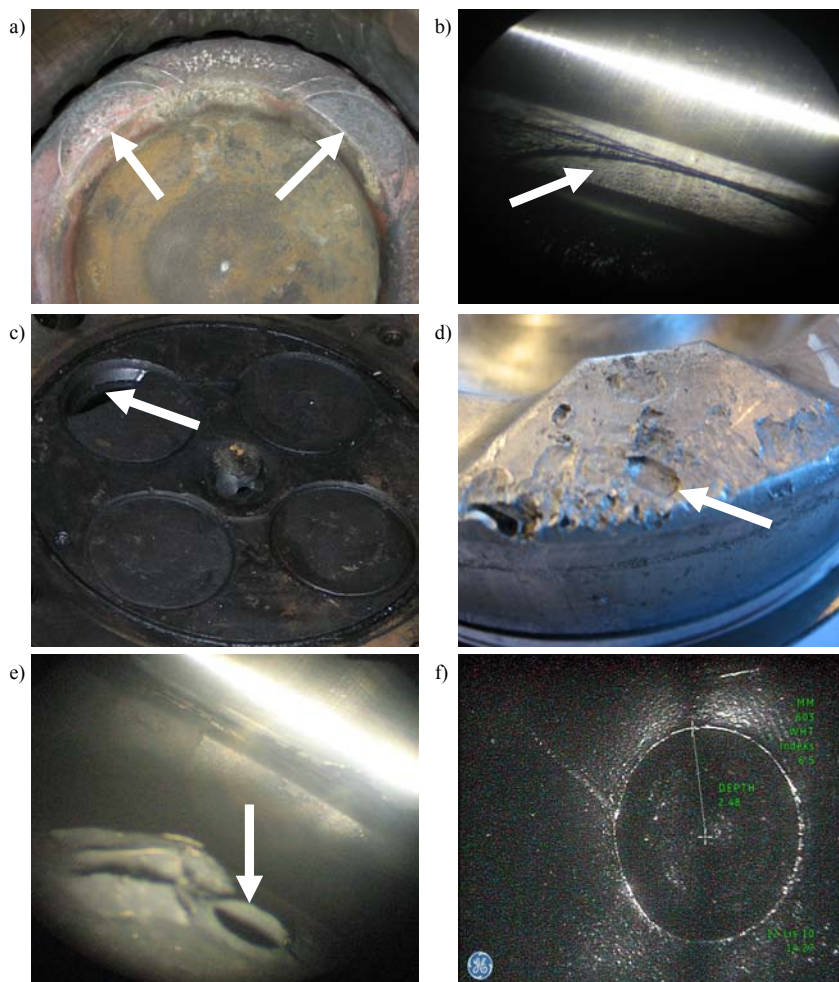
**Rys. 9.** Endoskopowy obraz unieruchomienia pierścieni tłokowych w rowkach oraz przedmuchu spalin do skrzyni korbowej przez nieszczelne pierścienie tłokowe, a) gładź tulei cylindrowej – ślady zakleszczania pierścienia tłokowego w tulei cylindrowej, b) gładź tulei cylindrowej – ślady przedmuchu spalin do skrzyni korbowej

Stosunkowo często spotykanym uszkodzeniem tłoka są jego deformacje mechaniczne spowodowane wpadnięciem do komory spalania części zaworu (najczęściej wylotowego) np. wyłamanego grzybka zaworowego (rys. 10c.d). W czasie pracy zaworu wylotowego przesuwa się on na trzonku w prowadnicy, która ulega nieodwracalnemu zużyciu ściernemu [4, 7]. Proces ten przebiega w warunkach wysokich temperatur trzonka, którego dodatkowym zadaniem jest odprowadzenie ciepła z grzybka zaworowego. W rezultacie dochodzi do nadmiernego zwiększenia luzu promieniowego między prowadnicą a trzonkiem zaworu, które w każdym przypadku prowadzi do niepożądanego przekoszenia zaworu, zwłaszcza, że obciążony jest on składową poprzeczną od nacisku dźwigni lub krzywki rozrządu, a w następstwie przekoszenia – do utraty szczelności cylindra (spadku ciśnienia sprężania), erupcji gazów, przepływów zwrotnych, wycieków oleju smarowego z pary precyzyjnej trzonek-prowadnica, aż do intensywnego zużywania się całego węzła zaworowego. Zjawisko to może przebiegać szczególnie intensywnie w przypadku zasilania silnika olejem opałowym o znacznej zawartości siarki. Znane są przypadki całkowitego wypalenia zaworu, jako wtórnej konsekwencji znacznego zużycia prowadnicy zaworowej [8, 10, 11]. W skrajnym wypadku może również dojść do pęknięcia trzonka zaworowego, jego wpadnięcia do przestrzeni cylindrowej i uszkodzeń wtórnych układu TPC, włącznie z pęknięciem tłoka. Obserwowalnym symptomem zużytych prowadnic zaworowych są często okopcone sprężyny zaworowe, co świadczy o utracie szczelności komory spalania.

Obecność punktowego wgniecenia na denku tłoka, umiejscowionego w osi wtryskiwacza (rys. 10 e, f) świadczy o uderzeniach mechanicznych tłoka o końcówkę wtryskiwacza w wyniku np. wydłużonego skoku tłoka (odległość pomiędzy denkiem tłoka i końcówką wtryskiwacza w GMP wynosi dla niektórych silników szybkoobrotowych nie więcej niż 3-4 mm). Może to być konsekwencją nadmiernych luzów w układzie korbowym lub intensywnego zużywania się panewek łożyskowych. Inną prawdopodobną przyczyną powstawania tego typu wgnieceń jest nadmierne obniżenie położenia wtryskiwacza osadzonego w gnieździe



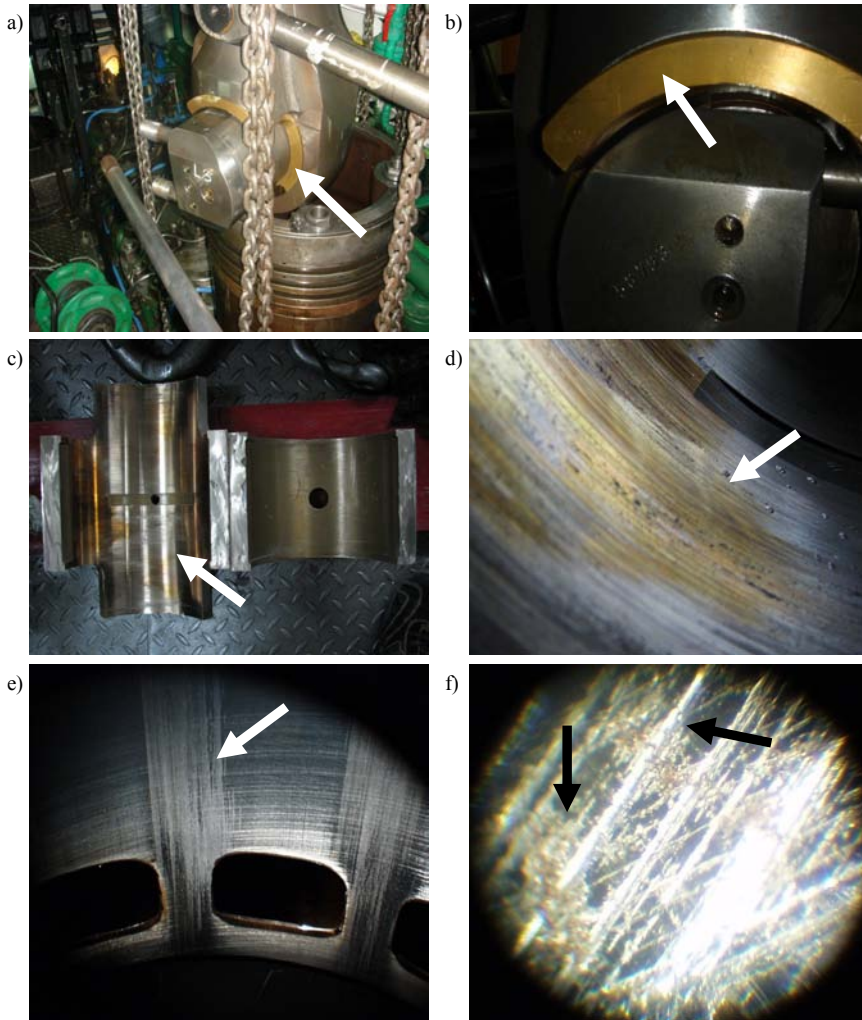
głowicy spowodowane niewłaściwie dobraną podkładką pod wtryskiwacz. W takiej sytuacji należy wyjaśnić pierwotne przyczyny obecności wgnieceń, a niezależnie wymienić wtryskiwacz, gdyż dalsza eksploatacja w takim stanie może doprowadzić do pęknięcia, a nawet wyłamania końcówki wtryskiwacza. Skutkuje to zazwyczaj intensywnym wyciekaniem paliwa do przestrzeni cylindrowych, rozcieńczeniem oleju smarowego paliwem, aż do powstania rozległych uszkodzeń wtórnych w układzie cylindrowym, zagrażających awarią silnika.



**Rys. 10.** Endoskopowy obraz uszkodzeń denka tłoka spowodowanych uderzeniami mechanicznymi (bezpośredni kontakt mechaniczny), a) denko tłoka – ślady uderzeń tłoka o zawory (stan po uderzeniu hydraulicznym), b) denko tłoka – ślady uderzeń tłoka o zawór (zawieszenie zaworu w prowadnicy), c) dolna płyta głowicy – wyłamany fragment grzybka zaworowego, d) korona denka tłoka – ślady uderzeń wyłamanego fragmentu grzybka zaworowego, e) denko tłoka – wgniecenie po uderzeniu tłoka o końcówkę wtryskiwacza, f) denko tłoka – pomiar głębokości wgniecenia po uderzeniu tłoka o końcówkę wtryskiwacza metodą „Cienia” (2,48 mm)



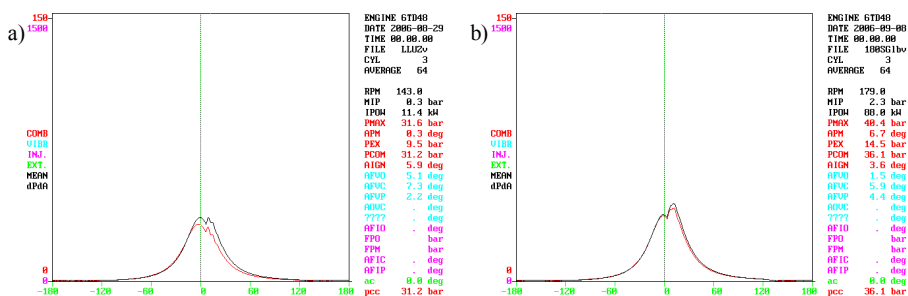
Wyjątkowo rzadko spotykaną postacią uszkodzenia tłoka silnika okrętowego jest zużycie tribologiczne łożyska sworznia tłokowego (rys. 11). Jest ono najczęściej konsekwencją niezachowania prawidłowych luzów montażowych lub zakłóceń procesu smarowania współpracujących powierzchni trących (w wyniku utraty właściwości smarujących nadmiernie zanieczyszczonego lub rozcieńżonego paliwem oleju smarowego, bądź niedrożności wewnętrznych kanałów oleju smarowego).



**Rys. 11.** Endoskopowy obraz uszkodzeń tulei sworznia tłokowego silnika Sulzer 6TD48, a) łożysko sworznia tłokowego – przed demontażem tulei, b) łożysko sworznia tłokowego – tuleja sworznia osadzona w łożysku, c) tuleja sworznia tłokowego – ślady zużycia warstwy wierzchniej dolnej części tulei, d) tuleja sworznia tłokowego – ślady zużycia ściernego warstwy wierzchniej dolnej części tulei, e) gładź tulei cylindrowej – ślady zużycia ściernego warstwy wierzchniej, f) gładź tulei cylindrowej – opiłki brązu wtarte w bruzdy honownicze

Dochodzi do chwilowego zakleszczania się sworznia obracającego się w tulei łożyskowej, czego obserwowalnym symptomem diagnostycznym jest zwiększona obecność zanieczyszczeń metalicznych (na osnowie miedzi) w oleju smarowym silnika. Produkty zużycia ściernego tulei sworznia tłokowego można również łatwo wykryć na drodze badań endoskopowych przestrzeni wewnątrz cylindrowych silnika. Mając złociste zabarwienie są dobrze widoczne na srebrzystej gładzi tulei cylindrowej, jako nawalcowane (wtarte) wypełnienia bruzd po honowaniu tulei (rys. 11f).

Zdecydowanie trudniej identyfikuje się tego typu uszkodzenie łożyska sworznia tłokowego na podstawie indykowania cylindrów. Praktycznie tylko w przypadku bardzo intensywnego rozwoju zużycia ściernego i znacznych ubytków materiału warstwy wierzchniej tulei łożyska, następuje na tyle duże zwiększenie objętości komory spalania, że ma to swoje odzwierciedlenie w rozwarstwieniu linii sprężania na rozwiniętym wykresie indykatorowym (rys. 12a).



**Rys. 12.** Rozwinięty wykres indykatorowy układu cylindrowego numer 3 silnika Sulzer 6TD48, a) w stanie uszkodzenia łożyska sworznia tłokowego, b) w stanie po przeprowadzonej wymianie tulei sworznia tłokowego

Zarejestrowany przebieg zmian ciśnienia w cylindrze jest gazodynamiczną konsekwencją zmian struktury uszkodzonego łożyska sworznia tłokowego silnika Sulzer 6TD48, przedstawionych na rysunku 11. W wyniku dokonanych pomiarów warsztatowych ustalono, że w wyniku zwiększonego luzu promieniowego sworznia tłokowego w tulei nastąpiło blisko dwukrotne zwiększenie wysokości komory spalania – z 6-7 mm (zgodnie z warunkami technologicznymi) do wysokości 11 mm [11]. Analizując charakter zaistniałych deformacji rozwiniętego wykresu indykatorowego oraz ilościowe zmiany wartości parametrów diagnostycznych można wnioskować, że wzrost objętości komory spalania układu cylindrowego nr 3 spowodował spadek ciśnienia sprężania w tym układzie oraz wzrost jego rozrzutu, w stosunku do wartości uśrednionej dla silnika, do wartości 10,8 % (po przeprowadzonej naprawie zarejestrowano wartość 1,9% – rys.12b). Natomiast rozrzut obciążeń (oceniany według zmian średniego ciśnienia indykowanego) spowodowany nadliwą pracą uszkodzonego układu cylindrowego wynosił około 78% dla minimalnego zakresu pracy silnika\*. Są to wartości znacznie zawyżone, świadczące o silnym niezrównoważeniu sił gazowych w cylindrach, działających z jednej strony na układ korbowy (poprzez tłok), z drugiej zaś – na

\* W wyniku zwiększonej ilości zanieczyszczeń metalicznych w oleju smarowym ograniczono możliwość maksymalnego obciążania silnika.

głowicę i blok cylindrowy (poprzez tuleję cylindrową i głowicę). Niezrównoważone siły gazowe potęgują destrukcyjne oddziaływanie na konstrukcję silnika niezrównoważonych sił bezwładności pochodzących od mas wykonujących ruch obrotowy i ruch posuwisto-zwrotny. Kontynuowanie użytkowania silnika w takim stanie technicznym zagraża jego niezawodności i trwałości. Znaczny rozrzut obciążeń między układami cylindrowymi skutkuje wzrostem amplitudy drgań skrętnych linii napędowej, co może doprowadzić do zmęczenia materiału, aż do inicjacji pęknięć zmęczeniowych elementów zespołu napędowego transmitujących moment obrotowych do śruby okrętowej. Po przeprowadzonej naprawie silnika zarejestrowano spadek rozrzutu obciążenia poszczególnych cylindrów do wartości 17%, dla porównywalnego zakresu pracy silnika (jest to wartość dopuszczalna dla minimalnego obciążenia silnika), bez konieczności przeprowadzenia regulacji dawkowania paliwa.

Warto w tym miejscu zauważyć, że identyczny obraz uszkodzeń na wykresie indykatorowym pozostawia praca układu cylindrowego z wygiętym korbowodem, ewentualnie uszkodzonym (zużyтым) łożyskiem korbowodowym. Przyczyną tak zdeformowanego wykresu indykatorowego może być również zakłócony pomiar ciśnienia w cylindrze w wyniku częściowej utraty drożności kanału (zaworu) indykatorowego lub utrata szczelności układu cylindrowego\* [10, 11].

Dodatkowy, bardzo istotny wniosek, który wypływa z analizy wykresu indykatorowego, to możliwość popełnienia błędu podczas wnioskowania diagnostycznego i przeprowadzenia zbędnej regulacji silnika w przypadku braku możliwości wyznaczenia maksymalnego ciśnienia sprężania. W takiej sytuacji diagnosta oceniający zaistniałe zmiany przebiegu ciśnienia w cylindrze mógłby zalecić zwiększenie dawki paliwa lub kąta wyprzedzenia wtrysku na niedociążonym 3 układzie cylindrowym, ze wszystkimi negatywnymi skutkami takiej decyzji dla silnika (możliwość przeciążenia cieplnego elementów układu tłokowo-cylindrowego wywołanego gradientami temperatury).

### 3. Uwagi końcowe i wnioski

Wykrywanie wad materiałowych powierzchni elementów ograniczających przestrzenie robocze tłokowego silnika spalinowego z zastosowaniem endoskopów jest jedną z najmłodszych metod diagnostyki technicznej. Na podstawie charakteru i rozmiarów zidentyfikowanych uszkodzeń możliwa jest ocena stanu technicznego nie tylko bezpośrednio dostępnych elementów konstrukcyjnych przestrzeni roboczych silnika, ale również, w sposób pośredni, ocena stanu technicznego tych elementów konstrukcyjnych silnika, które nie są bezpośrednio dostępne, a które z przestrzeniami roboczymi współpracują [10, 11, 12]. Przykładowo, na podstawie badania endoskopowego gładzi cylindrowej i charakteru wykrytych na niej defektów powierzchniowych można w sposób pośredni sformułować diagnozę o stanie technicznym części pierścieniowej czy prowadzącej tłoka, chociaż nie istnieje możliwość dokonania bezpośredniej endoskopowej oceny stanu technicznego tych rejonów tłoka [4, 5, 9].

\* W tym przypadku należało wykluczyć taką możliwość, gdyż silnik Sulzer 6TD48 jest silnikiem dwusuwowym, ze szczelinowo-szczelinowym układem wymiany ładunku (brak zaworów cylindrowych).

W ramach charakterystyki identyfikowanych endoskopowo uszkodzeń układu tłokowo-korbowego najczęściej miejsca poświęcono tłokom układów cylindrowych, jako najbardziej newralgicznych podzespołów konstrukcyjnych silnika okrętowego, i nie tylko. Wyjaśniając najbardziej prawdopodobne przyczyny powstawania uszkodzeń tłokowych, wykorzystano wyniki badań własnych Autora oraz dostępne wyniki badań silników o zapłonie samoczynnym stosowanych w transporcie samochodowym i kolejowym.

## Literatura

1. Breen J., Stellingwerff M.: Application of optical and digital endoscopy. Proceedings 2<sup>nd</sup> EAEA-Conference, Vienna 1995.
2. Hlebowicz J.: Endoskopia przemysłowa. Biuro Gamma. Warszawa 2000.
3. Kondratiev N.N.: Otkazy i defekty sudowych dizelej, Izdatielstwo „Transport”, Moskva 1985 r.
4. Korczewski Z.: Endoskopia silników okrętowych. AMW, Gdynia 2008.
5. Korczewski Z.: Failures' identification of cylinder liners of marine diesel engines in operation. Journal of Polish CIMAC, Diagnosis, Reliability and Safety, Vol. 2, No.2/ 2007, s. 89-101.
6. Mitianiec W., Adam Jaroszewski.: Modele matematyczne procesów fizycznych w silnikach spalinowych małej mocy. Wydawnictwo im. Ossolińskich Wrocław 1993.
7. Niewczas A.: Podstawy stochastycznego modelu zużycia poprzez tarcie w zagadnieniach trwałości elementów maszyn. Zeszyty Naukowe, Mechanika nr 19, WSI Radom 1989 r.
8. Piaseczny L.: Technologia naprawy okrętowych silników spalinowych. Wydawnictwo Morskie, Gdańsk 1992 r.
9. Sitnik L.: Kinytika zużycia. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1998r.
10. Wajand J. A., Wajand J. T.: Tłokowe silniki spalinowe średnio – i szybkoobrotowe. WNT Warszawa 2005 r.
11. Dokumentacja techniczna i eksploatacyjna okrętowych tłokowych silników spalinowych Zwiedza typu M401A-1(2), M503, M520, Detroit Diesel typu 16V149TI, Sulzer 6TD48.
12. XL PRO videoprobe measurement system. Oferta EVEREST VIT.

## FAILURES' IDENTIFICATION OF PISTONS OF MARINE DIESEL ENGINES BY MEANS OF ENDOSCOPIC METHODS IN OPERATION

**Summary.** The paper deals with diagnostic issues concerning endoscopic examinations of working spaces within marine diesel engines. The considerations have been focused on theoretical bases of normal wear and tear process of pistons in the aspect of identification, localization and genesis of the well known and recognizable operational unserviceable states. There have been also demonstrated results of endoscopic exams concerning the pistons' failures which appeared the most often in current operation of the selected types of marine diesel engines.

**Key words:** technical diagnostics, endoscopic investigation, marine diesel engine, pistons' failures