

Zbigniew Korczewski
Bogdan Pojawa

DIAGNOSTYKA ENDOSKOPOWA SILNIKÓW OKRĘTOWYCH

STRESZCZENIE

W eksploatacji okrętowych silników spalinowych powszechnie wprowadza się nowe metody badań diagnostycznych. Jedną z metod jest dynamicznie rozwijająca się endoskopia, która wcześniej stosowana była tylko w medycynie, a obecnie stanowi bardzo użyteczne i wręcz nieodzowne narzędzie w ocenie stanu technicznego złożonych maszyn okrętowych.

W referacie przedstawiono endoskopowy zestaw diagnostyczny stosowany w bazowym systemie diagnostycznym Instytutu Konstrukcji i Eksploatacji Okrętów AMW oraz technologię diagnozowania metodą endoskopową, jak również zaprezentowano wyniki eksploatacyjnych badań endoskopowych silników okrętowych eksploatowanych w Polskiej Marynarce Wojennej.

WSTĘP

Współczesne okręty wojenne charakteryzuje duża zdolność bojowa. Wynika to z jednej strony z wprowadzenia nowych środków walki, z drugiej zaś zastosowania do napędu okrętów małogabarytowych i o małej masie oraz dużej mocy turbinowych silników spalinowych, a także średnio- i szybkoobrotowych tłokowych silników spalinowych. Tego rodzaju silniki stosowane są na okrętach wojennych różnych klas od kutra do fregaty, zarówno w jednorodnych układach napędowych, jak w układach kombinowanych. Są one obecnie stosowane do napędu okrętów szybkich we wszystkich liczących się flotach świata.

Nowoczesne silniki okrętowe wyposażane są w coraz doskonalsze systemy kontrolno-pomiarowe mierzące parametry charakteryzujące stan ich obciążenia. Pomimo tego, w praktyce eksploatacyjnej znane są przypadki poważnych uszkodzeń silników, których pierwotne przyczyny nie zostały wykryte w odpowiednim czasie. Przykładowo, uszkodzenia spowodowane przez nadmierną wibrację jako rezultat utraty stabilności układu mechanicznego – i w konsekwencji zjawiska rezonansu.

Trudności rozpoznawania uszkodzeń okrętowych silników spalinowych na podstawie zmian wartości parametrów termogazodynamicznych, charakteryzujących stan energetyczny przepływającego czynnika roboczego, związane są z właściwą interpretacją symptomów powstałego defektu. Często są one identyfikowane jako symptomy naturalnego procesu starzenia, zanieczyszczenia lub zużycia elementów silnika zdeterminowane czasem jego eksploatacji. Zewnętrzne objawy w takich wypadkach są zazwyczaj zbieżne i trudne do jednoznacznego określenia. Szczególnym przypadkiem może być tutaj problem, jaki stanowi analiza parametrów diagnostycznych dla oceny intensywności zanieczyszczenia kanałów przepływowych zespołów wirnikowych, a także efektywności ich mycia. Klasycznym wręcz przykładem błędnej interpretacji symptomów diagnostycznych jest rozróżnienie stanu eksploatacyjnego zanieczyszczenia jako ciągłego procesu towarzyszącego pracy silnika w warunkach morskich od stanu jego niezdatności, spowodowanej na przykład nadpaleniem wierzchołków łopatek wirnikowych turbiny. Do sytuacji takiej może dojść wskutek nieprzeprowadzonego w porę lub przeprowadzonego nieskutecznie mycia części przepływowej, które między innymi poprawia efektywność chłodzenia łopatek [1, 4].

Podobnie trudno jest ocenić stan silnika tłokowego na podstawie parametrów eksploatacyjnych w przypadku uszkodzeń układu tłok-pierścień-cylinder. Często linia trendu zmian temperatury odchyła się tylko nieznacznie, podczas gdy z powodu uszkodzonego (np. „lejącego”) wtryskiwacza przepaleniu ulega denko tłoka [2].

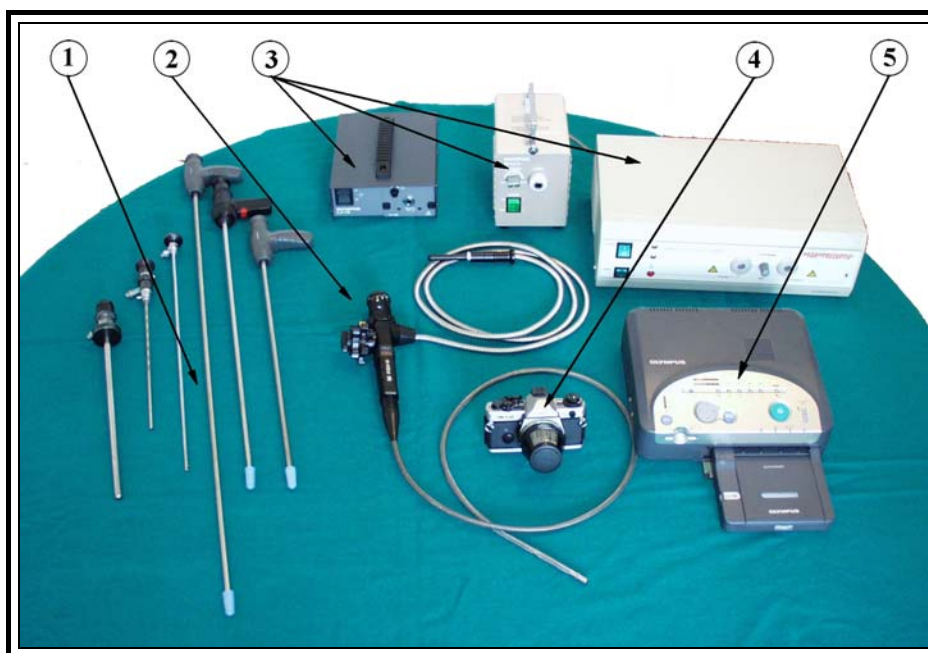
W takich sytuacjach jedyną możliwość uzyskania arbitralnej diagnozy o stanie technicznym urządzenia zapewnia wziernikowanie jego przestrzeni wewnętrznych z wykorzystaniem endoskopów. W sposób bezinwazyjny, bardzo szybki, tani, a co najważniejsze jednoznaczny rozwiane zostają wątpliwości nurtujące eksploatatora: „Co dzieje się wewnątrz Twojej maszyny?”.

APARATURA STOSOWANA DO BADAŃ ENDOSKOPOWYCH

Do badań endoskopowych wykorzystuje się fiberoskop IF8D4-15 oraz komplet boroskopów firmy OLYMPUS i STORZ różniących się między sobą długością optyki, średnicą i kątem obserwacji diagnozowanego elementu, odpowiednio: 90 cm/8 mm/90°, 55 cm/8 mm/90°, 45 cm/8 mm/90°, 50 cm/6 mm/90°, 30 cm/4 mm/0°, 30 cm/10 mm/120°. Aparatura ta umożliwia ogląd i wykonywanie dokumentacji fotograficznej wewnętrznych elementów części przepływowej silnika poprzez otwory

wziernikowe o średnicy > 5 mm. Do przeprowadzania analizy wymiarowej uszkodzeń wewnętrznych elementów silnika, ich wizualizacji oraz dokumentowania w bazie danych stosuje się aparat cyfrowy Camedia C-2500L firmy OLYMPUS specjalnie przystosowany do tego celu. Przy wykorzystaniu odpowiednich łączników aparat ten jest sprzęgnięty z boroskopem lub fiberskopem.

Endoskopowy zestaw diagnostyczny stosowany w bazowym systemie diagnostycznym Instytutu Konstrukcji i Eksploatacji Okrętów AMW przedstawia rysunek 1. [1, 2].



Rys. 1. Endoskopowy zestaw diagnostyczny firmy OLYMPUS:
1 – zestaw boroskopów; 2 – fiberskop; 3 – zestaw źródeł światła;
4 – cyfrowy aparat fotograficzny; 5 – drukarka do zdjęć

Długość elastycznego światłowodu fiberskopu, którego sterowana końcówka umożliwia prowadzenie obserwacji w dowolnym kierunku wynosi 1500 mm. Ma on wymienne końcówki umożliwiające obserwację w sektorach czołowych oraz bocznych. Dzięki temu znacznie zwiększone są manualne możliwości obserwacji podczas inspekcji wewnętrznych przestrzeni części przepływowej silnika turbiny oraz turbosprężarki silnika tłokowego.

Boroskopy o zróżnicowanej długości sztywnego układu soczewkowego umożliwiają prowadzenie obserwacji w sektorach bocznych i czołowym, w szerokim zakresie zmienności kąta widzenia. Boroskopy są bardzo wygodne do stosowania podczas oglądu krawędzi łopatek kierowniczych oraz wirnikowych. W celu prowadzenia oglądu wszystkich łopatek wieńców wirnikowych ogląd należy prowadzić z jednoczesnym ręcznym obracaniem wirnika.

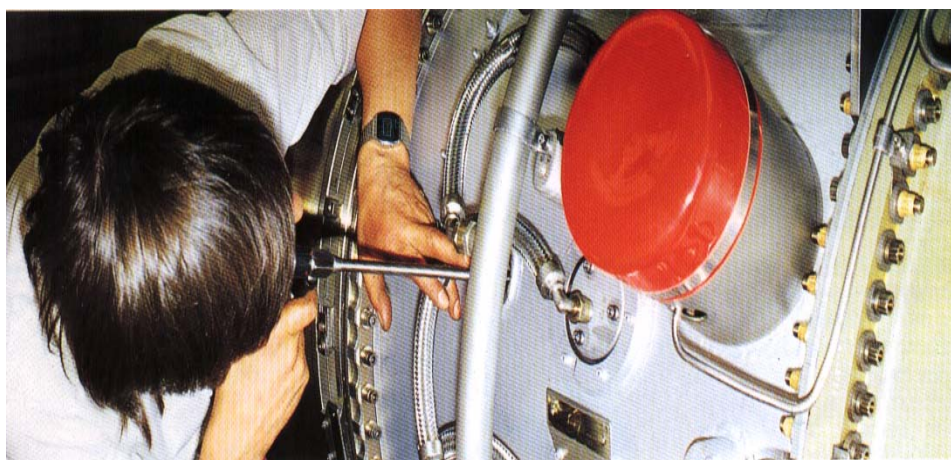
Sz szczególnie dużą przydatność w badaniach diagnostycznych komór spalania silników tłokowych, a zwłaszcza gniazd zaworowych osadzonych w dolnej płycie głowicy wykazuje optyka 30 cm/10 mm/120°.

TECHNOLOGIA DIAGNOZOWANIA

W eksploatacji okrętowych silników spalinowych powszechnie wprowadza się nowe metody badań diagnostycznych. Dynamicznie rozwija się endoskopia, która wcześniej stosowana był tylko w medycynie, a obecnie stanowi bardzo użyteczne i wręcz nieodzowne narzędzie w ocenie stanu technicznego złożonych maszyn okrętowych.

Endoskopia jest to bezdemontażowa metoda realizacji przeglądu wizualno-optycznego wewnętrznych przestrzeni maszyn i urządzeń przy wykorzystaniu przyrządów wziernikowych zwanych endoskopami.

Na rysunku 2. przedstawiono sposób prowadzenia badań endoskopowych części przepływowej silnika turbinowego przy wykorzystaniu zestawu endoskopowego firmy OLYMPUS.



Rys. 2. Badania endoskopowe części przepływowej silnika turbinowego przy wykorzystaniu zestawu endoskopowego firmy OLYMPUS

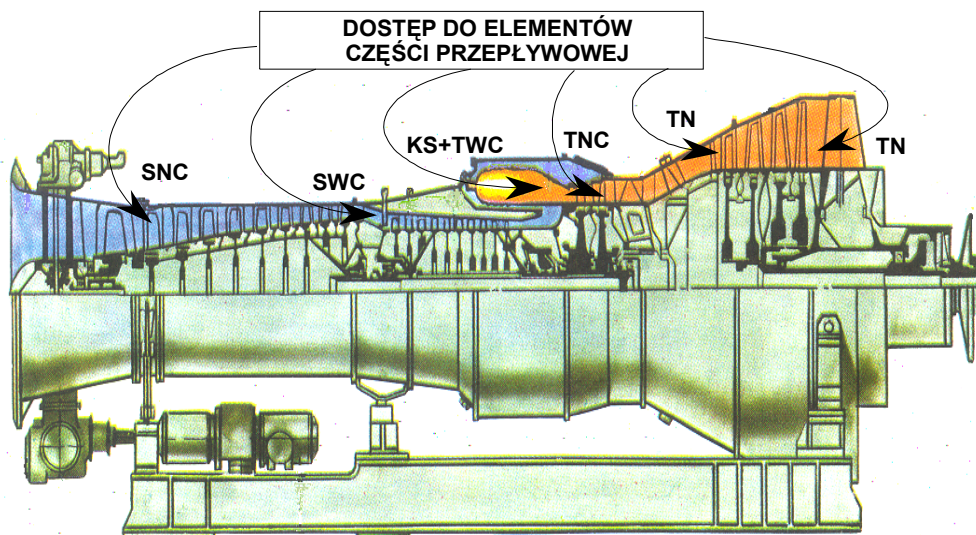
Badania endoskopowe silników okrętowych wykonuje się w następujących sytuacjach:

- w czasie realizacji przeglądów profilaktycznych (co najmniej raz w roku);
- przy bieżącej ocenie stanu technicznego silnika, w razie konieczności przedłużenia okresu międzyremontowego;
- podwyższonego poziomu wibracji, pojawienia się opiłków metalu w oleju, skokowych odchyłeń linii trendu zmian wartości temperatury spalin, nadmiernego dymienia, sprawdzenia efektywności mycia części przepływowej itp.

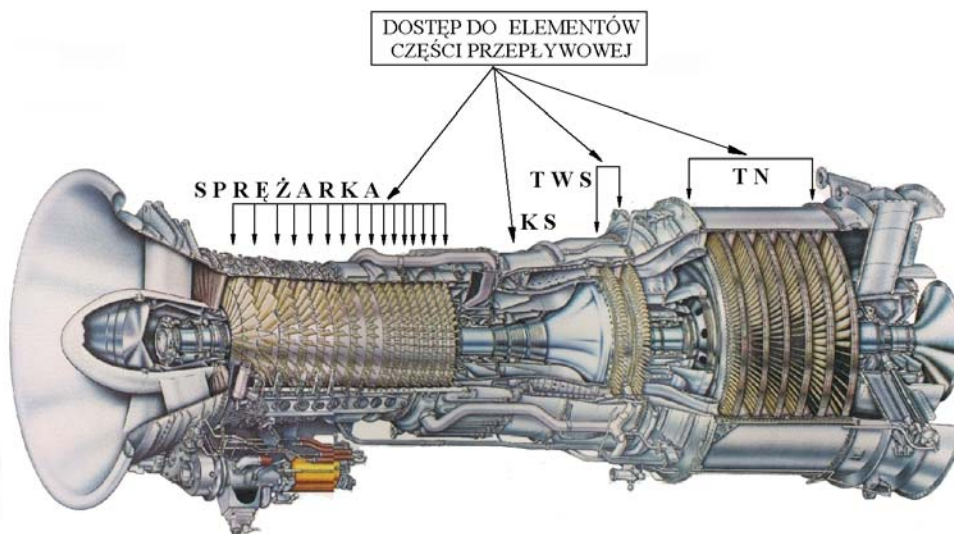
Na podstawie wieloletnich badań endoskopowych silników okrętowych opracowano metodyki ich oceny stanu technicznego w warunkach eksploatacji. Ujmują one niezbędny zakres i chronologię prowadzenia przeglądów przestrzeni wewnętrznych, umożliwiając wykrycie defektów poszczególnych elementów układów funkcjonalnych silnika. Dla każdego typu silnika eksploatowanego w Polskiej Marynarce Wojennej opracowano szczegółowe instrukcje realizacji badań diagnostycznych z wykorzystaniem fiberoskopu (elastyczny światłowod) i boroskopu (sztywny układ soczewkowy). Na rysunku 3., 4. i 5. przedstawiono przykładowe miejsca wprowadzania końcówek endoskopów do części przepływowej silników turbinowych eksploatowanych na okrętach Marynarki Wojennej oraz silnika śmigłowego GTD-350, na stanowisku laboratoryjnym Instytutu Konstrukcji i Eksploatacji Okrętów AMW.

Dla udokumentowania wykrytych defektów i określenia tendencji ich rozwoju dokonuje się rejestracji fotograficznej zidentyfikowanych uszkodzeń. Wyniki badań przechowywane są w komputerowej bazie danych.

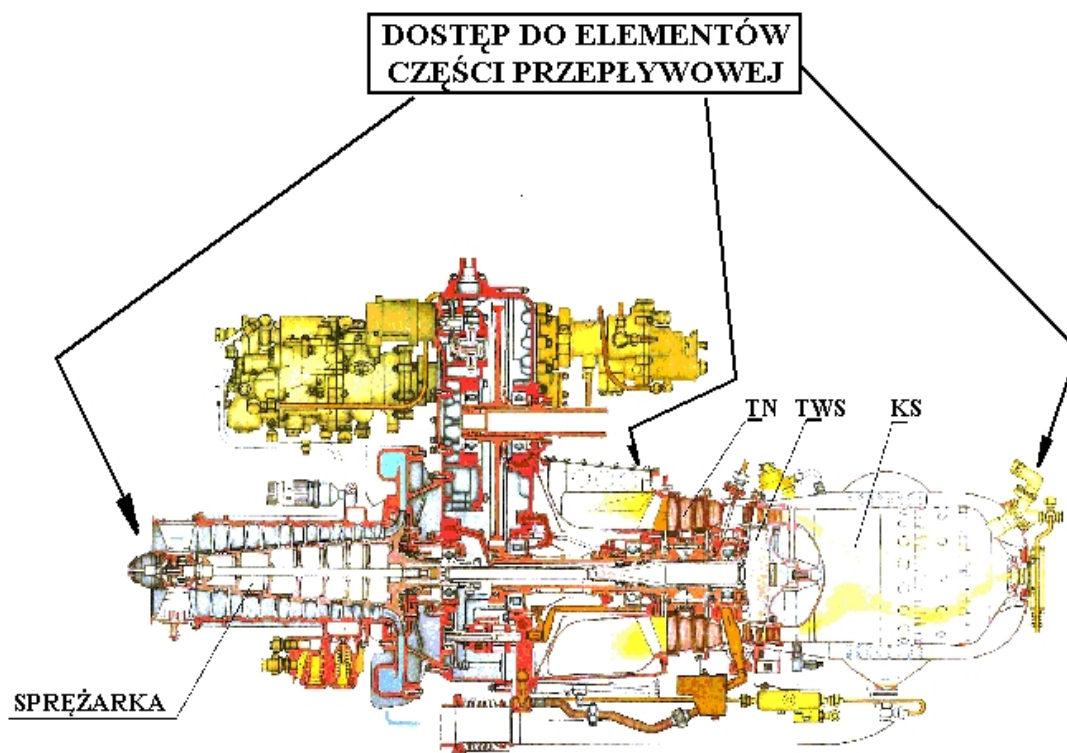
Endoskopy wykorzystywane są również w ocenie diagnostycznej tłokowych silników spalinowych eksploatowanych w Polskiej Marynarce Wojennej [3]. Szczególnie dużą przydatność wykazują w trudno dostępnych miejscach, np. komorach spalania, w przypadku gdy demontaż głowicy jest utrudniony i czasochłonny, układzie turbodoładowania czy przestrzeniach wewnętrznych mechanizmów zasprężonych z wałem korbowym silnika. Na rysunku 6. przedstawiono sposób wprowadzania końcówki fiberoskopu do przestrzeni wewnętrznych silnika tłokowego.



Rys. 3. Badania endoskopowe silnika turbinowego typu DR 76 i DR 77 –
dostęp do części przepływowej

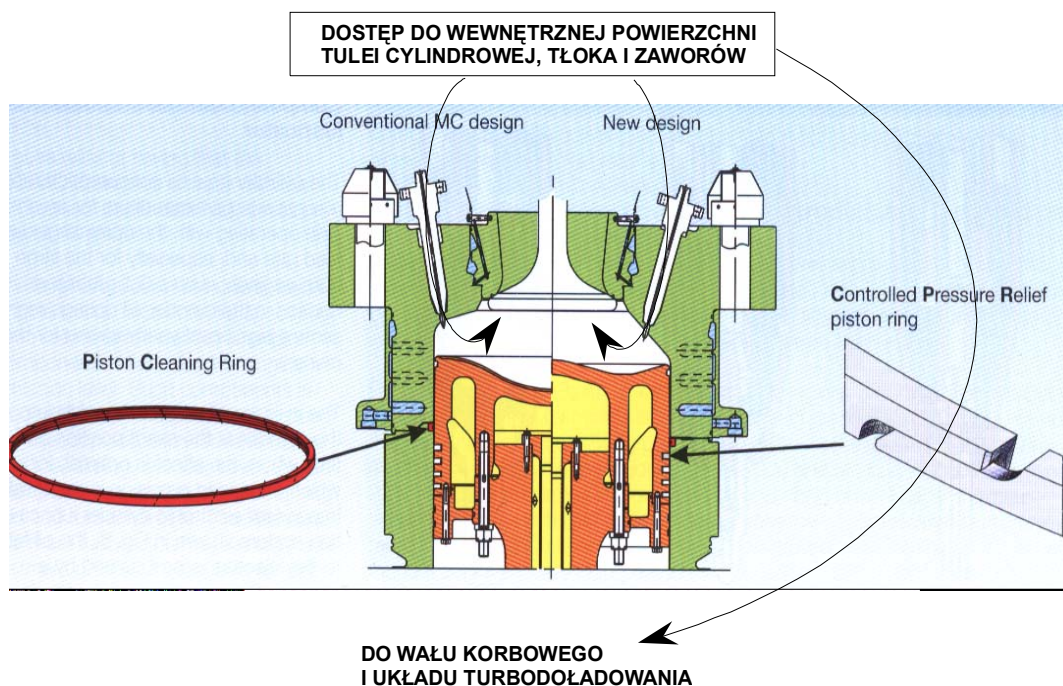


Rys. 4. Badania endoskopowe silnika turbinowego LM-2500 –
dostęp do części przepływowej



Rys. 5. Badania endoskopowe silnika śmigłowego GTD-350 –
dostęp do części przepływowej

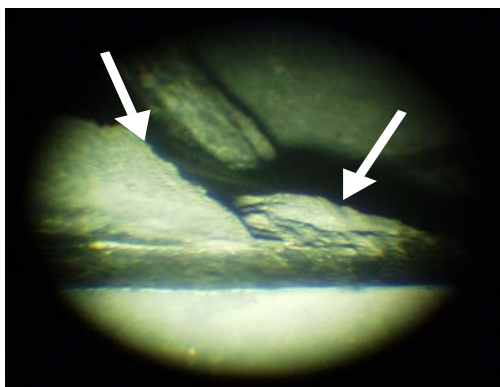
Fiberoskop, po zdemontowaniu wtryskiwacza, daje operatorowi możliwość dokonania oceny stanu technicznego denka tłoka, powierzchni tulei cylindrowej, głowicy i innych podzespołów w niej zamontowanych: rozpylaczy pozostałych wtryskiwaczy, zaworów dolotowych i wylotowych, zaworów rozruchowych itp. Metoda przeglądu endoskopowego odgrywa szczególnie istotną rolę w diagnozowaniu silników wieloblokowych i wielocylindrowych. Przykładowo, w silnikach o układzie gwiazdy, np. silnikach typu M503 czy M520 zabudowanych w przedziale siłowni okrętowej, dostęp do dolnych monobloków i dolnych partii przekładni redukcyjno-nawrotnej jest bardzo utrudniony.



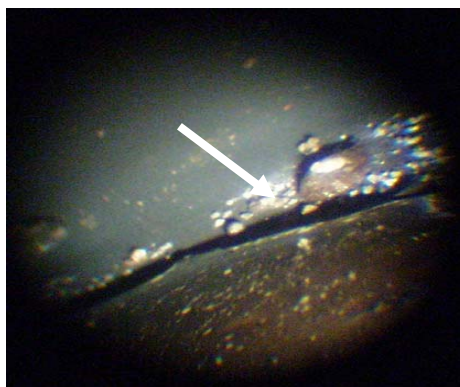
Rys. 6. Badania endoskopowe silnika tłokowego –
dostęp do wewnętrznych przestrzeni tulei cylindrowej

W przypadku konieczności przeprowadzenia ich przeglądów silnik wspólnie z przekładnią musi zostać rozsprzęglony od wału śrubowego, następnie przechylny, podniesiony, a czasami nawet obrócony w siłowni okrętowej, tak aby zapewnić dostęp do pierwszego czy siódmego bloku cylindrów. Z praktyki eksploatacyjnej wynika, że fiberoskop z wystarczająco długim elastycznym światłowodem układu optycznego pozwala uniknąć tych niedogodności, oszczędzając tym samym czas realizacji przeglądów i związane z nim koszty nawet o 25 – 30% [3, 4].

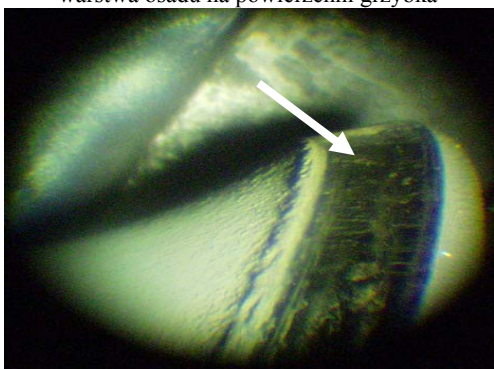
Wybrane defekty silników okrętowych zidentyfikowane podczas eksploatacyjnych badań endoskopowych prezentują rysunki 7 – 11 [1, 2].



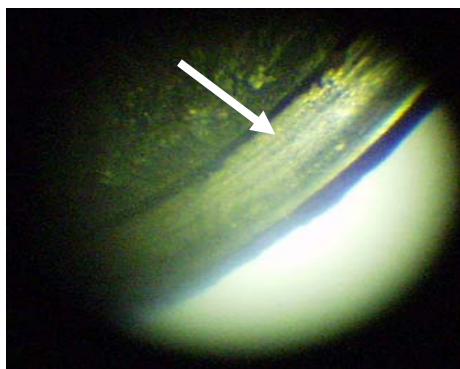
Grzybek zaworu dolotowego w gnieździe głowicy cylindra silnika 5BAH22 – warstwa osadu na powierzchni grzybka



Denko tłoka w cylindrze silnika 6NVD48-2u wypełnione wodą



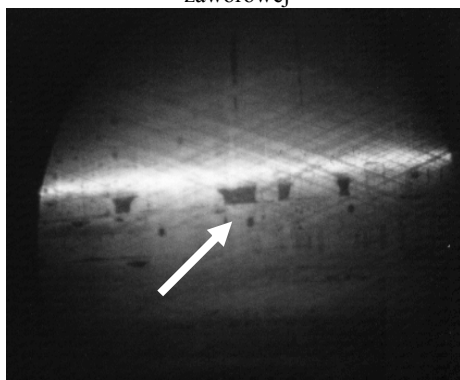
Grzybek otwartego zaworu dolotowego w gnieździe głowicy cylindra silnika WOLA 75H12 – przyłgnia zaworowa gładka, bez śladów zużycia



(Dla porównania) grzybek zaworu wylotowego silnika WOLA wycofanego z eksploatacji, charakterystyczny próg zużyciowy na przyłgni zaworowej

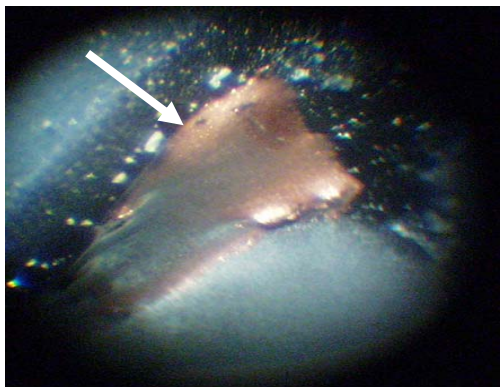


Zawór wylotowy silnika M503A – nieszczelność zaworu wywołana zgiętym trzonem zaworowym

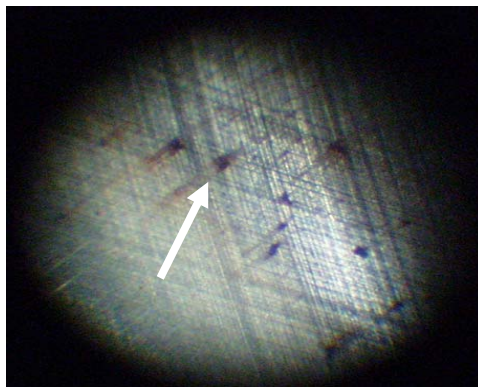


Tuleja cylindrowa silnika SULZER 6ATL25/30 – lokalne ogniwa korozji

Rys. 7. Defekty silników tłokowych zidentyfikowane podczas badań endoskopowych



Denko tłoka silnika SCANIA DSI1167 – ślady dopalania paliwa na powierzchni denka tłoka spowodowane „lejącym” wtryskiwaczem



Tuleja cylindrowa silnika NANNI DIESEL 4.400E/ESC – lokalne ogniska korozji, ślady „honowania” na powierzchni tulei



Tłok w tulei cylindrowej silnika Mercedes MB620 – widoczne wgniecenia na powierzchni denka tłoka



Zawory w głowicy silnika Mercedes MB620 – powierzchnie dolnej płyty głowicy wolne od zanieczyszczeń

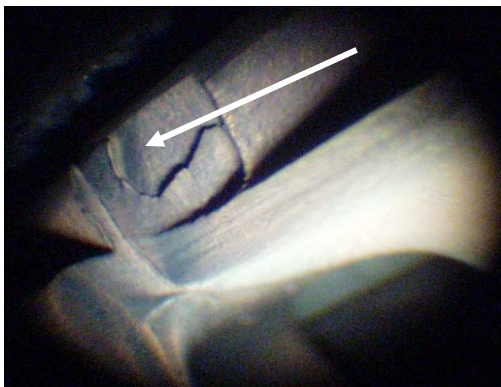


Wylamana łopatką wirnikową turbiny w turbosprężarce NAPIER NA250 silnika Cegielski C22

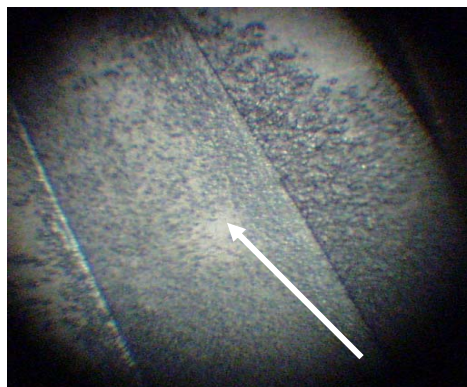


Dyfuzor sprężarki w turbosprężarce NAPIER C-045/C silnika SULZER 6AL20/24 – wżer erozyjny

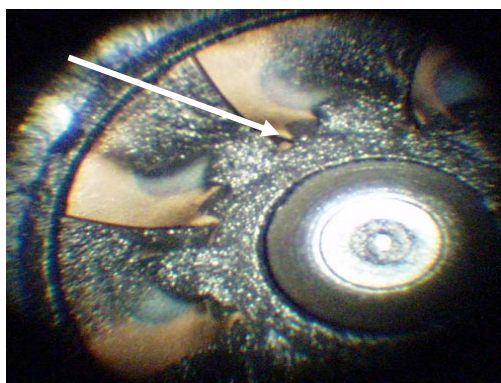
Rys. 8. Defekty silników tłokowych zidentyfikowane podczas badań endoskopowych



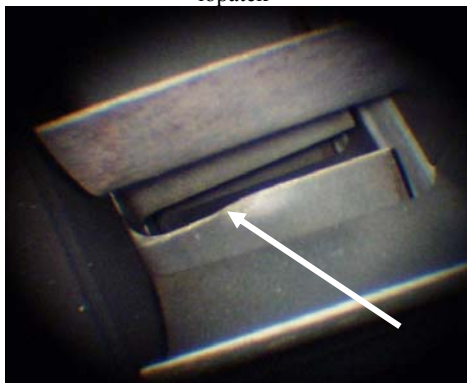
I st. turbiny wysokiego ciśnienia silnika DR76 – ubytek materiału w półce łopatkowej



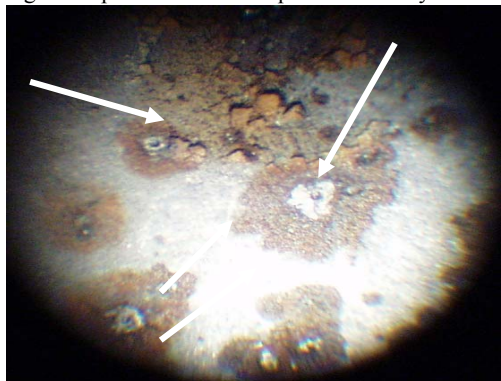
Kierownica wstępnego zawirowania silnika DR76 – osady zanieczyszczeń na powierzchniach łopatek



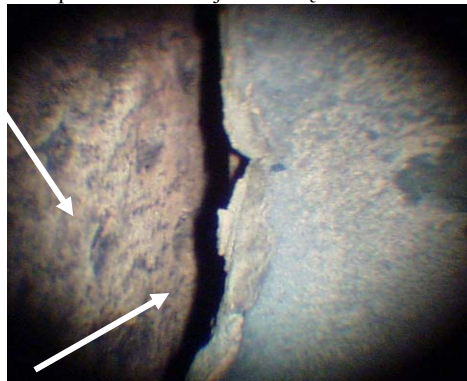
Zawirówyacz rury ogniowej silnika DR76 – ślady nagaru na powierzchniach łopatek zawirówyacza



XVI st. sprężarki silnika LM-2500 – wyboczenie łopatkki wirnikowej na krawędzi natarcia



XI st. sprężarki silnika LM-2500 – ślady korozji na powierzchni łopatkki kierowniczej



I st. turbiny wytwornicy spalin silnika LM-2500 – wyszczerbienia wierzchołka łopatkki wirnikowej oraz uszkodzenia uszczelnienia

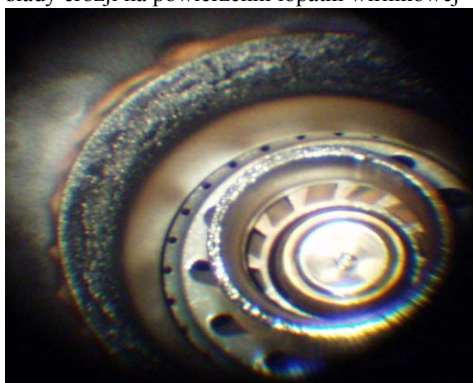
Rys. 9. Defekty silników okrętowych zidentyfikowane podczas badań endoskopowych



I st. turbiny wytwornicy spalin silnika LM-2500 – ślady erozji na powierzchni łopatki wirnikowej



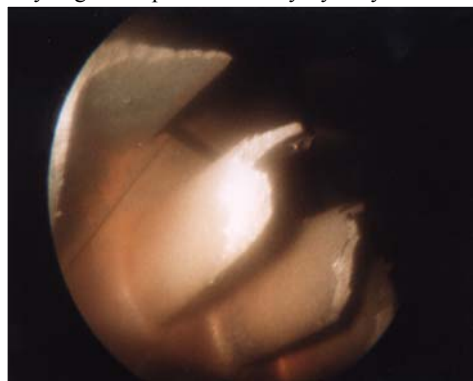
VI st. turbiny napędowej silnika LM-2500 – ślady nagaru na powierzchni łopatek wirnikowych



Wtryskiwacz komory spalania silnika LM-2500 – ślady nagaru na powierzchni dyszy wtryskiwacza



XVI st. sprężarki silnika LM-2500 – wgniecenie na krawędzi natarcia łopatki wirnikowej

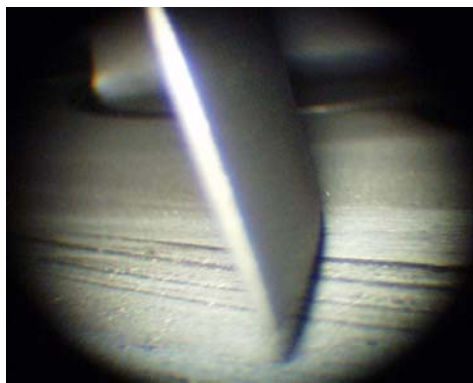


I st. turbiny wytwornicy spalin silnika GTD-350 – ślady uszkodzenia łopatek wirnikowych

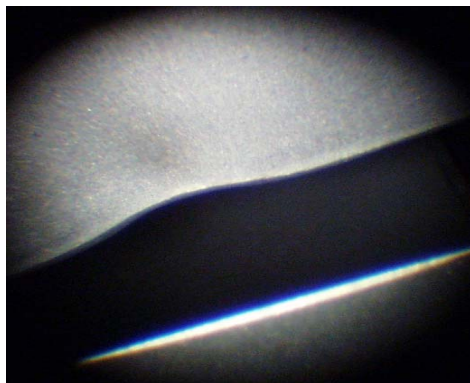


IX st. sprężarki silnika LM-2500 – wgniecenie z pęknięciem na krawędzi natarcia łopatki wirnikowej

Rys. 10. Defekty silników okrętowych zidentyfikowane podczas badań endoskopowych



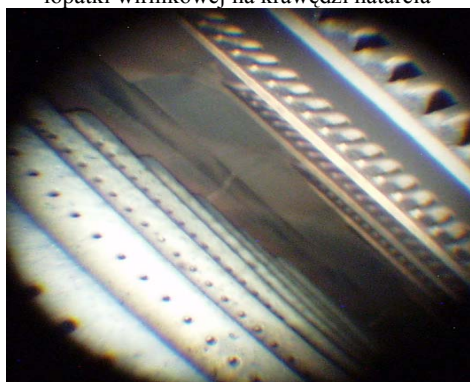
III st. sprężarki silnika LM-2500 – rysy na powierzchni uszczelnienia wieńca wirnikowego



X st. sprężarki silnika LM-2500 – wyboczenie łopatki wirnikowej na krawędzi natarcia



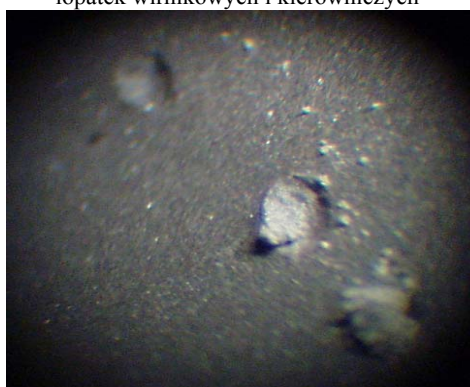
XII st. sprężarki silnika LM-2500 – ubytek materiału w uszczelnieniu wieńca wirnikowego



I st. turbiny wytwornicy spalin silnika LM-2500 – drożność otworów chłodzących łopatek wirnikowych i kierowniczych



IX st. sprężarki silnika LM-2500 – pęknięcia uszczelnienia wieńca wirnikowego w kształcie „pajęczyny”



XI st. sprężarki silnika LM-2500 – wgniecenia punktowe na powierzchni łopatki kierowniczej

Rys. 11. Defekty silników okrętowych zidentyfikowane podczas badań endoskopowych

WNIOSKI

Systematyczne badania endoskopowe przeprowadzane w ramach okresowych obsług profilaktycznych silników okrętowych eksploatowanych w Polskiej Marynarce Wojennej wykazały dużą skuteczność metody przy relatywnie łatwej obsłudze stosowanej aparatury badawczej. W wyniku przeprowadzonych przeglądów zidentyfikowano cały szereg defektów, które w przypadku dalszego rozwoju stanowić mogły istotne zagrożenie dla niezawodności silnika.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Charchalis A. i in., Sprawozdania z badań diagnostycznych turbinowych silników spalinowych eksploatowanych na okrętach MW RP, prace badawcze AMW, Gdynia 1992 – 2004.
- [2] Korczewski Z. i in., Sprawozdania z badań diagnostycznych tłokowych silników spalinowych eksploatowanych na okrętach MW RP, prace badawcze AMW, Gdynia 2000 – 2004.
- [3] Korczewski Z., *Application of endoscopic methods in diagnosing marine engines*, II International Scientifically-Technical Conference „Explo-Diesel & Gas Turbine '01”, Gdańsk – Międzyzdroje – Kopenhaga, April 23 – 27 2001.
- [4] Korczewski Z., *Endoskope examinations of naval gas turbines*, „Polish Maritime Research”, No 4, Vol. 5, December 1998.

ABSTRACT

New diagnostic methods of marine internal combustion engines are introduced. One of the methods is endoscopy, which was previously used only in medicine and which at present constitutes a very useful and necessary tool for evaluation of the condition of complex ship machinery.

The paper presents an endoscope-based diagnostic set in the diagnostic system in the Institute of Ship Construction and Exploitation, Naval University, as well as the diagnostic technology with the endoscope-based method. It also shows the results of endoscope-based exploitation investigations of marine engines used in the Polish Navy.

Recenzent dr hab. inż. Andrzej Pięta