

Zbigniew Korczewski
Akademia Marynarki Wojennej

IDENTYFIKACJA USZKODZEŃ TULEI CYLINDROWYCH OKRĘTOWEGO TŁOKOWEGO SILNIKA SPALINOWEGO W EKSPLOATACJI

STRESZCZENIE

W opracowaniu przedstawiono wybrane zagadnienia diagnostyki endoskopowej układów cylindrowych okrętowych tłokowych silników spalinowych. Przybliżono podstawy teoretyczne procesu zużywania się tulei cylindrowych w aspekcie identyfikacji i genezy znanych i rozpoznawalnych stanów niezdatności eksploatacyjnej. Zaprezentowano wyniki badań endoskopowych dotyczące uszkodzeń tulei cylindrowych silników okrętowych eksploatowanych na okrętach Marynarki Wojennej RP.

WSTĘP

Racjonalna eksploatacja okrętowego tłokowego silnika spalinowego wymaga dogłębnej znajomości przebiegu procesu degradacji struktury konstrukcyjnej poszczególnych układów funkcjonalnych. Intensywność tego procesu zdeterminowana jest między innymi charakterem zmienności naprężeń mechanicznych i cieplnych w elementach konstrukcyjnych silnika powstających podczas realizowanych przemian energii chemicznej i cieplnej w pracę mechaniczną. Miarą dynamicznych naprężeń silnika jest iloczyn średniego ciśnienia użytkowego oraz średniej prędkości tłoka. Im wyższa wartość tego iloczynu, tym wcześniej można oczekiwać zwiększonego zużycia elementów konstrukcyjnych silnika [9]. Zmniejsza się również jego trwałość i niezawodność, wyrażone odpowiednio: czasem i prawdopodobieństwem czasu poprawnej pracy.

Zagadnieniem kinetyki zużycia elementów konstrukcyjnych w czasie użytkowania silnika okrętowego zajmowało się wielu badaczy, zarówno w kraju jak i za granicą [1, 4, 6, 7]. Znane są osiągnięcia w tej dziedzinie L. Piasecznego, który

szeroko opublikował w swoich pracach wyniki eksploatacyjnych badań granicznego i dopuszczalnego zużycia elementów i węzłów konstrukcyjnych silników okrętowych, prezentowane w aspekcie technologii napraw oraz wpływu szeroko rozumianych warunków użytkowania [5]. Bardzo interesujące, z punktu widzenia eksploatacji silników okrętowych, są również prace A. Niewczasa oraz L. Sitnika, koncentrujące się głównie na modelowaniu matematycznym kinetyki zużycia elementów silników spalinowych [4, 6].

Z przeprowadzonych badań niezawodnościowych wynika, że potencjał użytkowy współczesnych silników okrętowych określany jest granicznym zużyciem wału korbowego i jego łożyskowania oraz elementów konstrukcyjnych układu tłokowo-cylindrowego, układu rozrządu czynnika roboczego, a także par precyzyjnych aparatury paliwowej. Dla każdego z tych układów proces zużywania się elementów konstrukcyjnych jest złożonym procesem fizyko-chemicznym, ujmującym tarcie, oddziaływanie wysokich i szybkozmiennych ciśnień i temperatur, nierównomierność rozkładu temperatury, znaczne szybkości przemieszczania się względem siebie par trących oraz zmienne warunki smarowania [9].

Istotą badań diagnostycznych podejmowanych przez autora niniejszej publikacji jest określenie dominującego rodzaju zużycia dla newralgicznych elementów konstrukcyjnych silników okrętowych eksploatowanych w Marynarce Wojennej RP. Ponad dwudziestoletnie badania eksploatacyjne potwierdzają, że tuleje cylindrowe silników średnio- i szybkoobrotowych charakteryzują się znaczną intensywnością zużycia oraz występowania uszkodzeń [11]. Zastosowanie metod endoskopowych do ich poszukiwania i rozpoznawania zapobiega rozwojowi poważnych, wtórnych uszkodzeń układów funkcjonalnych silnika, prowadzących zazwyczaj do jego całkowitej niezdatności eksploatacyjnej.

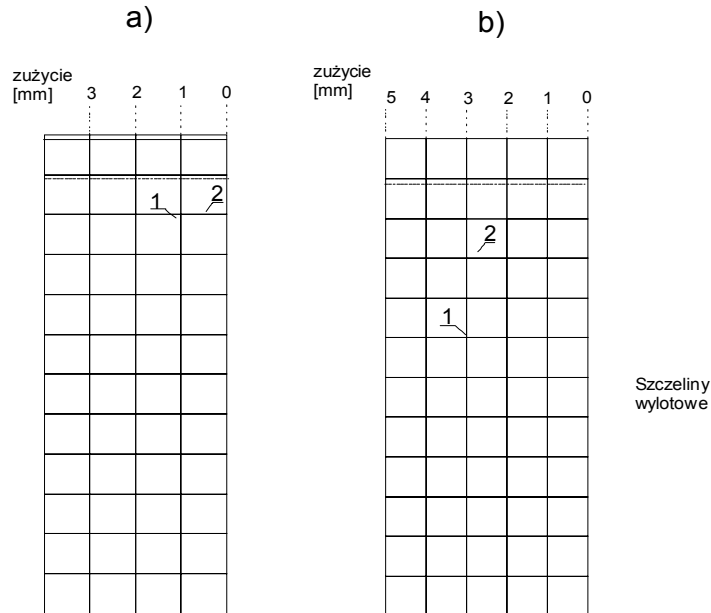
MECHANIZM POWSTAWANIA USZKODZEŃ TULEI CYLINDROWYCH

W czasie pracy silnika jego elementy konstrukcyjne poddawane są znacznym, co do wartości i zmienności w czasie, obciążeniom mechanicznym i cieplnym. Szczególnie istotne z punktu widzenia kinetyki zużycia tulei cylindrowych są obciążenia mechaniczne wywołane siłami gazowymi powstającymi w wyniku przemian termodynamicznych realizowanych w cylindrach oraz siłami bezwładności mas elementów układu tłokowo-korbowego wykonujących ruch obrotowy i posuwisto-zwrotny.

Analizując układ sił działających na gładź tulei cylindrowej podczas współpracy tulei z tłokiem i pierścieniami tłokowymi, można wnioskować, że dominującym procesem zużyciowym będzie nieodwracalne zużycie elementów trących wywołane działaniem sił normalnych (poprzecznych) na gładź tulei oraz siłami tarcia powstającymi w punktach styku gładzi z pierścieniami tłokowymi. Należy również mieć na uwadze fakt, że jest to układ sił dynamicznych, w którym obciążenie zmienia się w sposób ciągły. Zachodzące procesy mikroskrawania, odspajania cząstek metalu (w wyniku wielokrotnych odkształceń plastycznych) oraz głębokie wyrywanie cząstek metalicznych spowodowane powstawaniem połączeń tarciovych (tzw. zgrzewanie tarciove) zależne są przede wszystkim od intensywności (warunków) smarowania tulei na drodze ruchu tłoka. W wyniku zużycia gładzi cylindrowej dochodzi do utraty wymaganego stanu powierzchni oraz kształtu geometrycznego i wymaganych wymiarów średnicy wewnętrznej tulei. Z badań defektoskopowych wynika, że w przypadku silników czterosuwowych największa intensywność zużycia występuje w górnej części tulei, w płaszczyźnie obrotu wykorbienia – rysunek 1a [5, 9]. Skutkuje to charakterystycznie uformowanym, eliptycznym progiem zużyciowym występującym najczęściej w GMP tłoka, w rejonie styku z gładzią tulei cylindrowej pierwszego i drugiego pierścienia uszczelniającego – rysunek 6d. Jest to spowodowane głównie ściernym działaniem nagaru odkładającego się na ściankach komory spalania w wyniku niecałkowitego spalania paliwa. Cząsteczki nagaru, przedostając się w luz promieniowy pomiędzy tuleją i tłokiem, naruszają warstwę oleju smarowego i powodują intensywne ścieranie warstwy wierzchniej w miejscach ich największej koncentracji. Oprócz nagaru na ściankach wewnętrznych przestrzeni tulei cylindrowej powstają osady w postaci lakowej warstewki gęstej i lepkiej substancji wnikażącej w zamki pierścieni uszczelniających, utrudniając ich swobodny ruch w rowkach tłokowych. Możliwe jest również „zawisanie” pierścieni w rowkach, co pozostawia charakterystyczne wzdłużne ślady ścierania gładzi cylindrowej – rysunek 7f. Należy uwzględnić także inne przyczyny pogłębiające destrukcyjne skutki tarcia i zwiększonej intensywności zużycia gładzi cylindrowej w górnej części tulei:

- wysokie ciśnienie jednostkowe w przestrzeni ograniczonej pierwszą parą pierścieni uszczelniających i ściankami cylindra przy położeniu tłoka w GMP w końcu suwu sprężania i początku rozprężania – sprężone powietrze i gazowe produkty spalania wtłaczane przez luzy pierścieni w rowkach tłoków powodują rozpieranie pierścieni, zwiększając naciski na gładź cylindrową;
- wysoka temperatura ścianek komory spalania – podczas pracy silnika temperatura górnej części tulei cylindrowej osiąga 523 – 533 K [1, 9], stąd cząsteczki metaliczne materiału tulei cylindrowej wykazują zwiększoną ruchliwość, co

- sprzyja deformacjom plastycznym warstwy wierzchniej pod wpływem oddziaływania sił tarcia;
- niekorzystne warunki smarowania – w bliskim sąsiedztwie komory spalania olej smarowy intensywnie odparowuje i wypala się, tworząc z produktami spalania twarde cząsteczki nagaru;
 - korozyjne oddziaływanie na gładź cylindrową produktów spalania w wysokich temperaturach.



Rys. 1. Charakter zużycia tulei cylindrowej silnika ZS:

- a) silnik czterosuwowy, b) silnik dwusuwowy – przepłukanie poprzeczne,
 c) silnik dwusuwowy – przepłukanie wzdłużne szczelinowo-zaworowe;
 1 – krzywa zużycia w płaszczyźnie obrotu wykorbienia, 2 – krzywa zużycia w płaszczyźnie przechodzącej przez oś wału korbowego.

Jak wykazały wyniki badań defektoskopowych materiału tulei cylindrowych silników M400 wykonanych ze stali stopowej do azotowania, po przepracowaniu liczby godzin gwarantowanej przez producenta, pojawienie się progu zużyciowego w górnej części tulei cylindrowej związane jest ze znacznym zmniejszeniem grubości i twardości warstwy azotowanej [1]. Dodatkowo obserwowanym defektem powierzchniowym gładzi cylindrowej, wynikającym z utraty plastyczności warstwy wierzchniej (azotowanej), jest jej wykruszanie się w formie charakterystycznych obszarów gęsto wypełnionych drobnymi wżerami erozyjnymi, tzw. „wysypka” –

rysunek 5a. Producent silników M400 ustalił graniczną wartość zużycia gładzi tulei cylindrowej na poziomie 0,4 mm i po jej przekroczeniu, ze względu na niedopuszczalne, krytyczne zmniejszenie grubości warstwy azotowanej, można oczekiwać przyspieszonego, bardzo intensywnego zużycia ściernego tulei [1].

Na podstawie danych liczbowych przedstawiających charakter zużycia tulei cylindrowej silnika dwusuwowego (rys. 1b) można wnioskować, że zastosowanie rozrządu szczelinowego wprowadza pewne osobliwości w przebieg tego procesu [9]. Otóż, można zaobserwować znaczące zwiększenie intensywności zużycia gładzi cylindrowej w rejonie okien wylotowych tulei, które w skrajnych przypadkach przewyższa zużycie w jej górnej części. Taką specyfikę charakteru zużycia tłumaczą następujące czynniki:

- korozyjne oddziaływanie gorących spalin wylotowych;
- wysoka temperatura ścianki tulei, która w tych miejscach nie jest chłodzona;
- niekorzystne warunki smarowania gładzi cylindrowej;
- deformacja tulei.

Z danych statystycznych prowadzonych badań defektoskopowych wynika, że średnie zużycie gładzi cylindrowej średnio- i szybkoobrotowych silników okrętowych może osiągać 0,02 – 0,21 mm na 1000 godzin pracy, w zależności od szybkoobrotowości i osiąganych ciśnień wewnątrz cylindrowych [1]. Jednak decydujące znacznie dla intensywności zużywania się tulei cylindrowych ma liczba zrealizowanych rozruchów oraz procesów przejściowych. Czynnikiem decydującym są wówczas korozja chemiczna uaktywniana parami kwasów ulegającymi kondensacji na ściankach tulei cylindrowej o temperaturze niższej od temperatury punktu rosy oraz niestacjonarność procesu wymiany ciepła i związane z nią deformacje cieplne ścianek cylindra [1].

Innym dość często spotykanym uszkodzeniem tulei cylindrowych jest utrata wymaganej gładkości powierzchni spowodowana zacieraniem się tłoka w cylindrze. W skrajnym przypadku może nawet dojść do nawalcowania materiału tłoka na gładź, co prowadzi zazwyczaj do całkowitego zakleszczenia tłoka w cylindrze i samoczynnego wyłączenia silnika z ruchu [5, 9]. W rutynowych badaniach endoskopowych silników okrętowych obserwowane są zmiany w strukturze „honowania” gładzi cylindrowej (głębokość rys „honowniczych” wynosi od 0,01 mm do 0,1 mm, w zależności od średnicy i materiału konstrukcyjnego tulei) oraz obecność i głębokość wżerów korozyjno-erozyjnych i rys powierzchniowych (dopuszczalna głębokość 0,5 mm, szerokość 1,0 mm i długość 80 – 100 mm, w zależności od konstrukcji silnika) [5]. Na podstawie rezultatów tych badań określa się ogólny stopień degradacji tulei cylindrowych, intensywność zużycia gładzi oraz jego trend rozwojowy [11].

Najgroźniejszym dla niezawodności silnika uszkodzeniem tulei cylindrowej są jej pęknięcia, jako konsekwencja przekroczenia dopuszczalnych naprężeń mechanicznych i cieplnych w ściankach tworzących komorę spalania – rysunki 7c i 7d. Najczęstszą przyczyną pęknięć tulei cylindrowych chłodzonych wodą jest pokrywanie się jej powierzchni zewnętrznych warstwą kamienia wodnego, zakłócającą proces odprowadzania ciepła od tulei i tłoka. W konsekwencji powstają znaczne gradienty temperatury w ściankach cylindra, pogarszają się warunki smarowania i nadmierne odkształcenia cieplne powodujące pękanie materiału konstrukcyjnego [5]. Odkształcenia cieplne tulei cylindrowej w okolicy GMP sięgają ponad 100 μm [8].

Inną przyczyną pęknięcia tulei cylindrowych, dość często występującą w eksploatacji silników okrętowych, jest osłabienie właściwości wytrzymałościowych zastosowanego materiału, a nawet jego perforacji, wskutek intensywnej korozji i erozji powierzchni zewnętrznych tulei [5]. Tego rodzaju uszkodzenia pierwotne rozwijają się bardzo szybko i niewykryte w odpowiednim czasie prowadzą zazwyczaj do tzw. uderzeń hydraulicznych w cylindrach silnika, zagrażając jego rozległymi zniszczeniami.

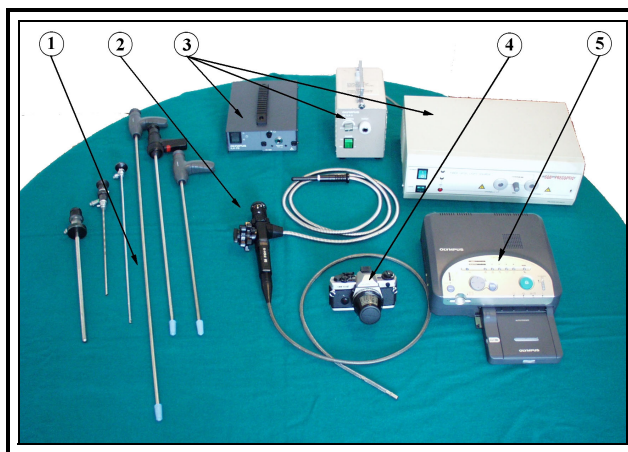
BADANIA TULEI CYLINDROWYCH SILNIKÓW OKRĘTOWYCH W EKSPLOATACJI

W eksploatacji silników okrętowych powszechnie wprowadza się nowe metody badań diagnostycznych. Dynamicznie rozwija 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.

Do badań endoskopowych silników eksploatowanych na okrętach Marynarki Wojennej RP wykorzystuje się fiberoskop IF8D4-15 oraz komplet boroskopów firmy OLYMPUS i STORZ różniących się między sobą długością optyki, średnicą i kątem obserwacji diagnozowanego elementu: 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° – rysunek 2. Aparatura ta umożliwia ogląd i wykonywanie dokumentacji fotograficznej wewnętrznych elementów silnika poprzez otwory wziernikowe o średnicy większej niż 5 mm. Do przeprowadzania analizy wymiarowej wykrytych uszkodzeń, ich wizualizacji oraz dokumentowania w bazie danych stosuje się specjalistyczny aparat cyfrowy Camedia C-2500L firmy OLYMPUS. Przy wykorzystaniu specjalnych łączników (adapterów) aparat ten jest sprzęgnięty z boroskopem lub fiberoskopem.

Długość elastycznego światłowodu fiberoskopu, którego sterowana końcówka umożliwia prowadzenie obserwacji w dowolnym kierunku, wynosi 1500 mm.

Ma on wymienne końcówki umożliwiające obserwację w sektorach czołowych oraz bocznych o różnych kątach obserwacji. Dzięki temu znacznie zwiększone są manualne możliwości dokonywania inspekcji wewnętrznych przestrzeni kanałów przepływowych powietrza i spalin silnika oraz układu turbosprężarki.



Rys. 2. Endoskopowy zestaw diagnostyczny firmy OLYMPUS:

1 – zestaw boroskopów, 2 – fiberoskop, 3 – zestaw źródeł światła, 4 – cyfrowy aparat fotograficzny, 5 – drukarka do zdjęć

Boroskopy o zróżnicowanej długości sztywnego układu soczewkowego umożliwiają prowadzenie obserwacji w sektorach bocznych i czołowym, w szerokim zakresie zmienności kąta widzenia. Szczególnie dużą przydatność w badaniach diagnostycznych komór spalania silników, zwłaszcza denka tłoka, gniazd zaworowych osadzonych w dolnej płycie głowicy oraz gładzi cylindrowej wykazuje optyka 30 cm/10 mm/120°. Boroskopy są również bardzo użyteczne podczas oglądu krawędzi łopatek kierowniczych oraz wirnikowych turbosprężarki. W celu prowadzenia oglądu wszystkich łopatek wieńca wirnikowego, należy go prowadzić z jednoczesnym obracaniem wirnika – ręcznie lub wykorzystując do tego celu sprężone powietrze.

Na rysunku 3. przedstawiono sposób prowadzenia badań endoskopowych układów cylindrowych silnika okrętowego przy wykorzystaniu boroskopu i fiberoskopu. Rysunek 4. prezentuje natomiast, w jaki sposób uzyskuje się dostęp do wewnętrznych przestrzeni tulei cylindrowej podczas badań endoskopowych silników okrętowych M401A-1(2) oraz Detroit Diesel typu 16V149TI.

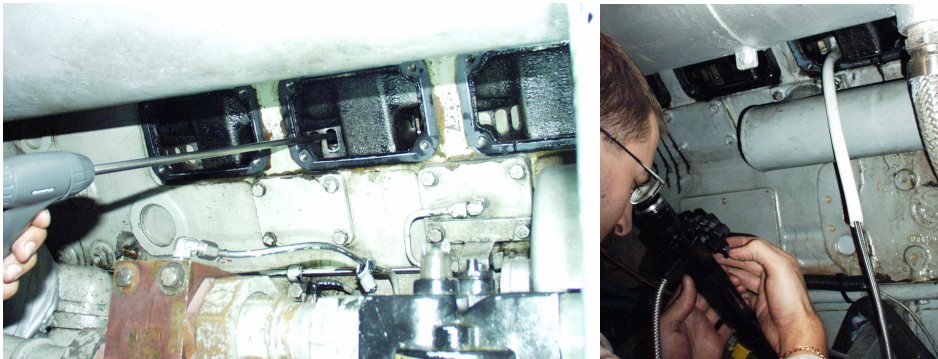
Boroskop (fiberoskop), po zdemontowaniu wtryskiwacza, daje operatorowi możliwość dokonania oceny stanu technicznego denka tłoka, powierzchni tulei cylindrowej, głowicy i innych podzespołów w niej zamontowanych: rozpylaczy pozo-

stałych wtryskiwaczy, zaworów dolotowych i wylotowych, zaworów rozruchowych itp. (rys. 4.). Metoda przeglądu endoskopowego odgrywa szczególnie istotną rolę w diagnozowaniu silników wieloblokowych i wielocylindrowych. Przykładowo, w silnikach o układzie gwiazdy, na przykład silnikach typu M503 czy M520 zabudowanych w przedziale siłowni okrętowej, dostęp do dolnych monobloków i dolnych partii przekładni redukcyjno-nawrotnej jest bardzo utrudniony. W przypadku konieczności przeprowadzenia ich przeglądów silnik wspólnie z przekładnią musi zostać rozsprzęglony od wału śrubowego, następnie przechylony, 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 tym koszty nawet o 25 – 30% [7].

a)

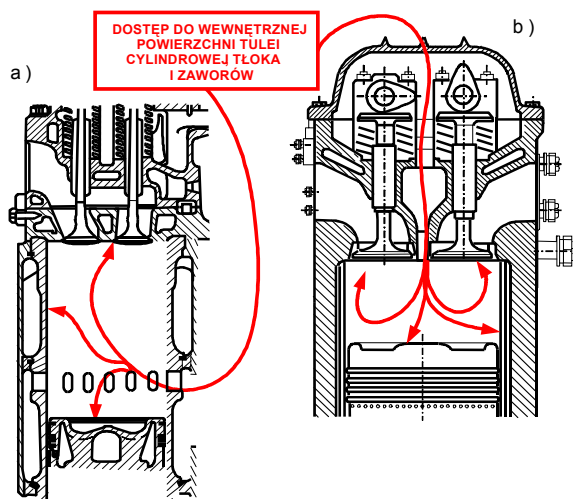


b)



Rys. 3. Sposób wprowadzania końcówki boroskopu i fiberoskopu do przestrzeni cylindrowych:

- a) silnik M401A-1 – przez otwory po zdemontowanych wtryskiwaczach, b) silnik Detroit Diesel typu 16V149TI – przez szczeliny powietrza dolotowego w tulejach cylindrowych



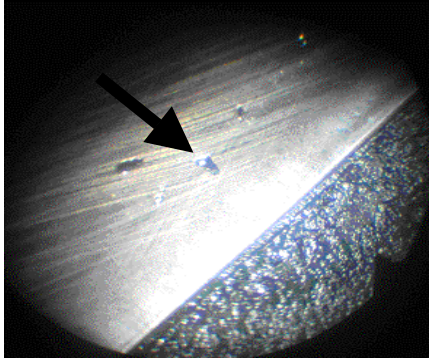
Rys. 4. Badanie endoskopowe silnika okrętowego – dostęp do wewnętrznych przestrzeni tulei cylindrowej: a) Detroit Diesel typu 16V149TI, b) M401A-1(2)

USZKODZENIA ZAWORÓW CYLINDROWYCH SILNIKÓW OKRĘTOWYCH

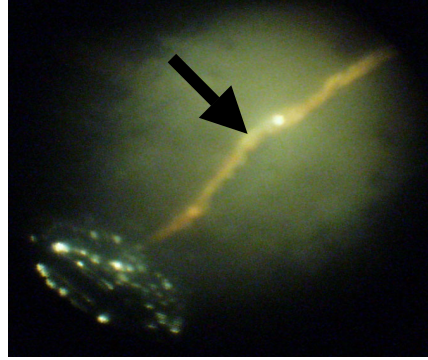
Systematyczne badania endoskopowe silników okrętowych eksploatowanych w Marynarce Wojennej RP prowadzone są w następujących sytuacjach:

- 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 odchyłń linii trendu zmian wartości średniego ciśnienia indykowanego (mocy indykowanej) z cylindra, wzrostu temperatury spalin, nadmiernego dymienia itp.;
- w sytuacji, gdy demontaż głowicy jest utrudniony i czasochłonny.

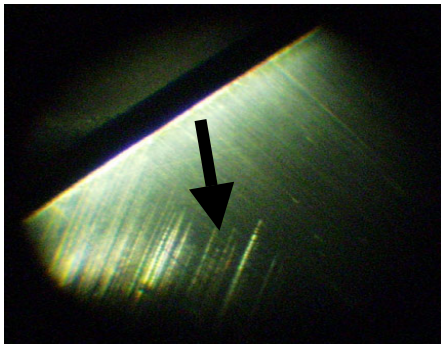
Na podstawie wieloletnich badań endoskopowych silników okrętowych opracowano metodyki oceny stanu technicznego w warunkach eksploatacji. Ujmują one niezbędny zakres i chronologię prowadzenia przeglądów przestrzeni wewnętrznych umożliwiających wykrycie defektów poszczególnych elementów układów funkcjonalnych silnika. Dla każdego typu silnika eksploatowanego w MW opracowano szczegółowe instrukcje realizacji badań diagnostycznych z wykorzystaniem fiberoskopu i zestawu boroskopów. Dla udokumentowania wykrytych defektów i określenia tendencji ich rozwoju dokonuje się rejestracji fotograficznej zidentyfikowanych uszkodzeń. Wyniki badań przechowywane są w komputerowej bazie danych. Wybrane uszkodzenia tulei cylindrowych silników okrętowych prezentują rysunki 5., 6. i 7. [1, 2, 3, 7].



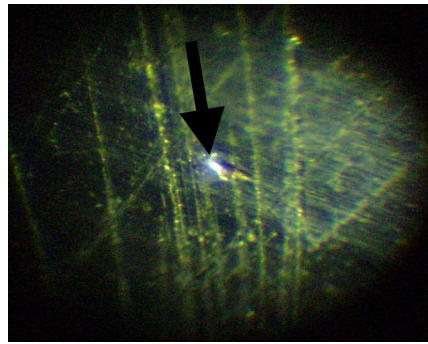
a) gładź tulei cylindrowej silnika czterosurowego Caterpillar typu 3516 – wżery erozyjne, tzw. „wysypka” na powierzchni warstwy azotowanej w rejonie GMP



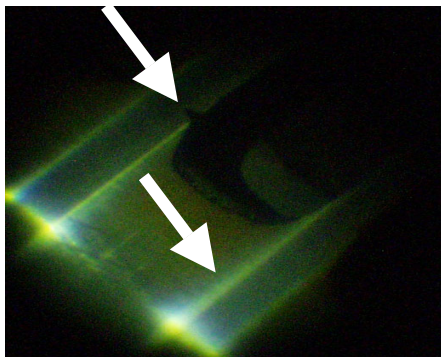
b) silnik czterosurowy Zvezda typu M503A – pęknięcie tulei cylindrowej



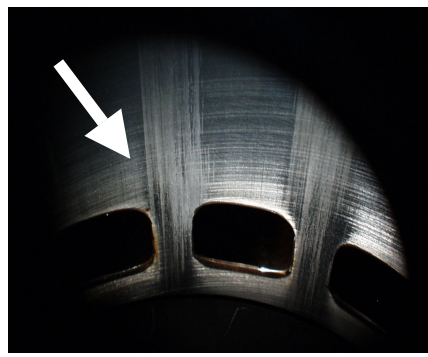
c) tuleja cylindrowa silnika czterosurowego Sulzer typu 6AR25/30 – nieznaczne ślady zużycia ściernego na powierzchniach wewnętrznych tulei (wyraźnie widoczna granica „honorowania”)



d) środkowa część tulei cylindrowej silnika dwusurowego 6TD48 – wżer erozyjny na powierzchni tulei

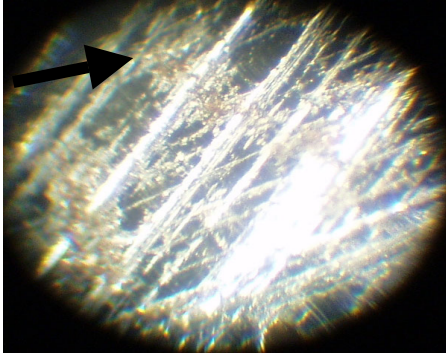


e) okno wylotowe rozrządu szczelinowego przepłukania zwrotnego układu cylindrowego silnika dwusurowego 6TD48 – wyszczerbienie materiału na krawędzi okna wylotowego, ślady tarcia na powierzchni tulei

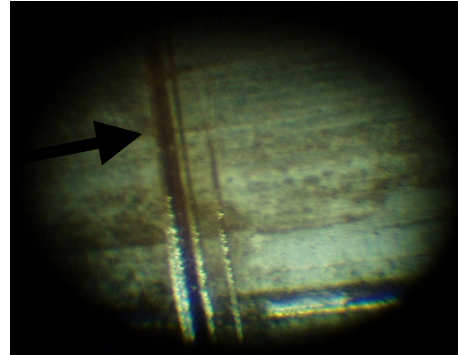


f) dolna część tulei cylindrowej silnika dwusurowego 6TD48 w rejonie okien rozrządu szczelinowego – wyraźne ślady tarcia na powierzchni wewnętrznej tulei

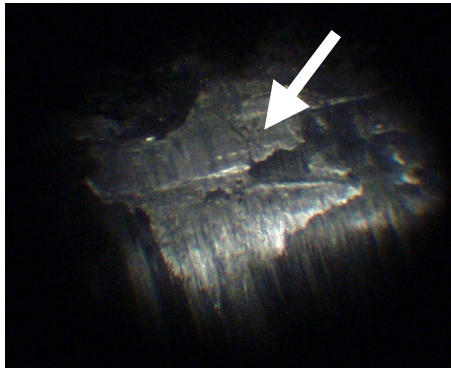
Rys. 5. Defekty tulei silników okrętowych zidentyfikowane podczas badań endoskopowych



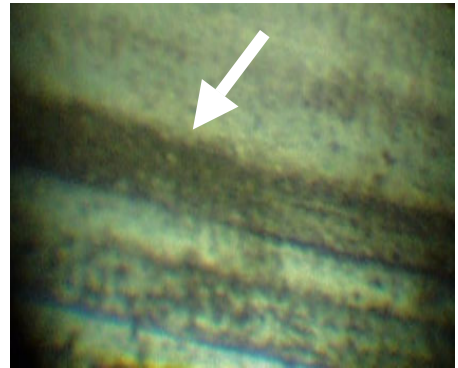
a) powiększony fragment gładzi tulei cylindrowej silnika 6TD48 – pozostałości produktów zużycia ściernego (pierścienie prowadzące ze stopu miedzi) wtarte w bruzdy po „honorowaniu” gładzi cylindrowej



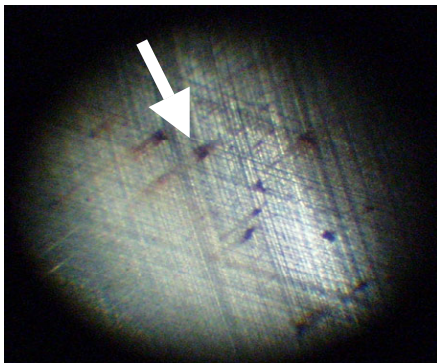
b) powiększony fragment powierzchni górnej części tulei cylindrowej silnika dwusuwowego 6TD48 – rysa w płaszczyźnie obrotu korby



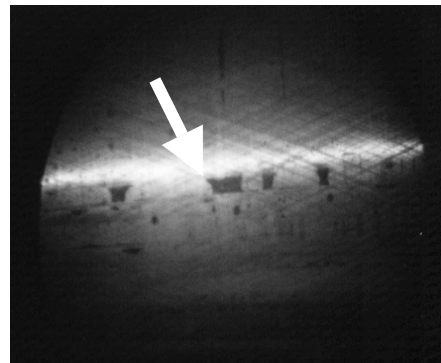
c) gładź tulei cylindrowej silnika M401A2 – ślady zakleszczania tłoka w tulei cylindrowej



d) góra część tulei cylindrowej silnika dwusuwowego 6TD48 – ślady zużycia pierścieniowego na gładzi cylindrowej

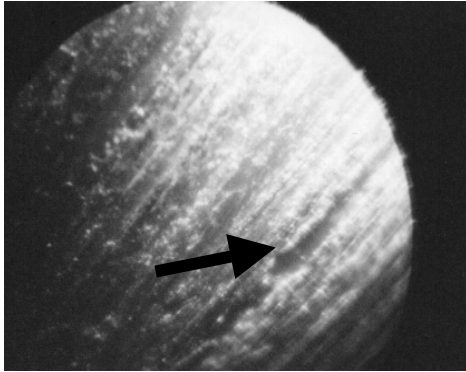


e) tuleja cylindrowa silnika NANNI DIESEL 4.400E/ESC – lokalne ogniwa korozji, ślady „honorowania” na powierzchni tulei

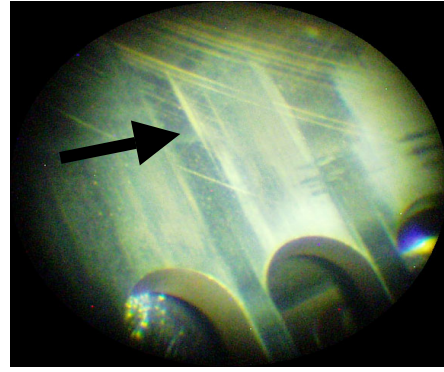


f) tuleja cylindrowa silnika SULZER 6ATL25/30 – lokalne ogniwa korozji

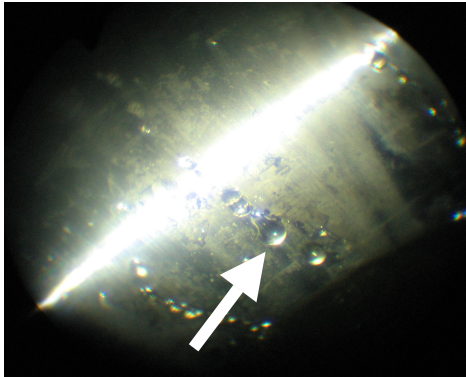
Rys. 6. Defekty tulei silników okrętowych zidentyfikowane podczas badań endoskopowych



a) gładź tulei cylindrowej silnika czteresusuwowego NOHAB POLAR typu 216 V – ślady zakleszczania tłoka w tulei cylindrowej



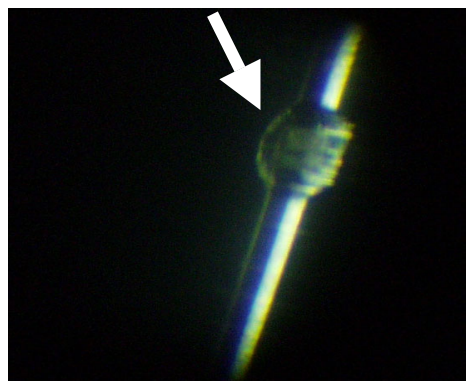
b) gładź tulei cylindrowej silnika dwusuuwowego Detroit Diesel 16V149T w rejonie okien powietrza dolotowego – zanik śladów „honowania”



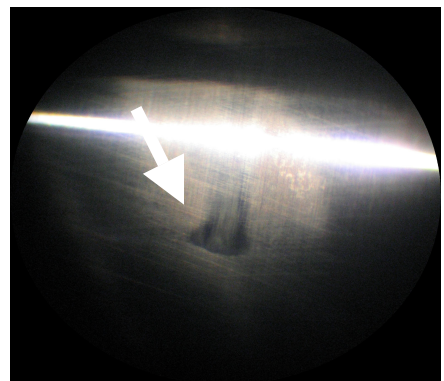
c) gładź tulei cylindrowej silnika M401A2 – obecność kropelek wody świadcząca o pęknięciu tulei cylindrowej



d) gładź tulei cylindrowej silnika M401A1 – pęknięta tuleja cylindrowa



e) tuleja cylindrowa silnika M401A2 – ślad zużycia ściernego na gładzi tulei cylindrowej



f) tuleja cylindrowa silnika M401A2 – wzdłużne ślady zużycia na gładzi tulei cylindrowej od „zawieszzonego” pierścienia tłokowego

Rys. 7. Defekty tulei silników okrętowych zidentyfikowane podczas badań endoskopowych

WNIOSKI

Blisko piętnaście lat doświadczeń specjalistów Akademii Marynarki Wojennej w badaniach endoskopowych silników okrętowych potwierdza dużą skuteczność tej metody, przy relatywnie łatwej obsłudze stosowanej aparatury badawczej. W wyniku przeprowadzonych przeglądów zidentyfikowano cały szereg defektów materiałowych, które w przypadku dalszego rozwoju mogły stanowić istotne zagrożenie dla niezawodności silnika.

Zanik śladów „honowania” gładzi tulei cylindrowej stanowi obserwowalny symptom zużywania się cylindrów silników spalinowych. Wdrożenie metod endoskopowych do rutynowych badań diagnostycznych silników okrętowych eksploatowanych w Marynarce Wojennej RP daje możliwość oceny i prognozowania intensywności zużycia oraz wczesnego wykrycia uszkodzeń w układach cylindrowych zagrażających awarią. Pozwala to racjonalnie planować proces eksploatacji silników według aktualnego stanu technicznego przy znacznym obniżeniu kosztów, nawet do 25 – 30%.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Kondratiev N. N., *Otkazy i defekty sudowych dizelej*, Izdatielstwo „Transport”, Moskwa 1985.
- [2] Korczewski Z., Pojawa B., *Diagnostyka endoskopowa silników okrętowych*, XXXII Ogólnopolskie Sympozjum „Diagnostyka Maszyn”, Węgierska Górka, 28.02 – 05.03.2005.
- [3] Korczewski Z., Pojawa B., *Diagnozowanie okrętowych silników spalinowych z zastosowaniem endoskopów*, VII Sympozjum Naukowo-Techniczne „Silniki spalinowe w zastosowaniach wojskowych” SILWOJ ’2005, Rynia, 26.10 – 28.10.2005, s. 183 – 192.
- [4] Niewczas A., *Podstawy stochastycznego modelu zużycia poprzez tarcie w zagadnieniach trwałości elementów maszyn*, „Zeszyty Naukowe”, Mechanika, nr 19, WSI, Radom 1989.
- [5] Piaseczny L., *Technologia naprawy okrętowych silników spalinowych*, Wydawnictwo Morskie, Gdańsk 1992.
- [6] Sitnik L., *Kinetyka zużycia*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1998.

- [7] Tartakovskij I. B., *Korrelacionnyje uravnenia iznosa*, „Vestnik Maszino-stroenia”, nr 2. Moskva 1968.
- [8] Wajand J. A., Wajand J. T., *Tłokowe silniki spalinowe średnio- i szybko-obrotowe*, WNT, Warszawa 2005.
- [9] Wieszkielskij S. A., Łukianczenko B. S., *Techničeskaja eskpluatacja dwigatielej wnutriennowo sgoranija*, Maszynostroenie, Leningrad 1978.
- [10] Dokumentacja techniczna i eksploatacyjna okrętowych turbinowych silników spalinowych typu M401A-1(2), M503, M520, Detroit Diesel.
- [11] Sprawozdania z badań diagnostycznych tłokowych silników spalinowych eksploatowanych na okrętach MW RP, prace badawcze AMW, Gdynia 1992 – 2006.

ABSTRACT

The paper presents selected issues related to endoscopic diagnostics of cylinder systems in marine engines. It discusses theoretical aspects concerned with wear-out of a cylinder liner focusing on identification and origins of known and recognizable conditions of operational uselessness. It shows the results of endoscopic investigations related to damage in a cylinder liner in marine engines used aboard ships of the Polish Navy.

Recenzent prof. dr hab. inż. Jerzy Girtler