



BADANIE ENDOSKOPOWE PRZESTRZENI ROBOCZEJ SILNIKA O ZAPŁONIE SAMOCZYNNYM Z WSTĘPNĄ KOMORĄ SPALANIA

Zbigniew Korczewski

Politechnika Gdańska,
Wydział Oceanotechniki i Okrętownictwa,
Katedra Siłowni Morskich i Lądowych
ul. G. Narutowicza 11/12, 80–233 Gdańsk, tel/fax: (58) 347 21 81,
e-mail: z.korczewski@gmail.com

Streszczenie: W artykule podjęto zagadnienie diagnostyki endoskopowej przestrzeni roboczych tłokowych silników spalinowych. Scharakteryzowano endoskopową aparaturę diagnostyczną będącą na wyposażeniu bazy laboratoryjnej Katedry Siłowni Morskich i Lądowych Wydziału Oceanotechniki i Okrętownictwa Politechniki Gdańskiej. Przybliżono metodykę realizacji badań endoskopowych na przykładzie laboratoryjnego silnika o zapłonie samoczynnym z wstępną komorą spalania. Miały one na celu ocenę stanu referencyjnego jego przestrzeni roboczej przed rozpoczęciem testowania różnego rodzaju pozostałościowych paliw żeglugowym, w tym zasiarczonych i modyfikowanych. Załączone wyniki badań endoskopowych dotyczą zarówno jakościowej jak i ilościowej oceny wykrytych defektów powierzchniowych elementów ograniczających przestrzeń roboczą przedmiotowego silnika.

Słowa kluczowe: silnik o zapłonie samoczynnym, przestrzeń robocza, badanie endoskopowe.

1. Wprowadzenie

Wykrywanie wad materiałowych powierzchni elementów ograniczających przestrzenie robocze tłokowego silnika spalinowego z zastosowaniem endoskopów jest jedną z najmłodszych metod diagnostyki technicznej. Jest to szczególnie istotne we wczesnym stadium ich rozwoju, kiedy obserwowane parametry systemów diagnozujących nie są wystarczająco wrażliwe na zmiany stanu warstw wierzchnich. Na podstawie charakteru i rozmiarów zidentyfikowanych defektów powierzchniowych i uszkodzeń możliwa jest ocena stanu technicznego nie tylko bezpośrednio dostępnych elementów konstrukcyjnych przestrzeni roboczych silnika, ale również – dokonana w sposób pośredni – ocena stanu technicznego tych elementów konstrukcyjnych silnika, które nie są bezpośrednio dostępne, a które współpracują z przestrzeniami roboczymi. I tak, na podstawie badania endoskopowego gładzi cylindrowej i charakteru wykrytych na niej defektów powierzchniowych można w pośredni sposób sformułować diagnozę o stanie technicznym części pierścieniowej czy prowadzącej tłoka, chociaż nie istnieje możliwość dokonania bezpośredniej oceny endoskopowej stanu technicznego tych rejonów tłoka.

Podstawowym warunkiem wiarygodnej diagnozy endoskopowej dotyczącej stanu technicznego przestrzeni roboczych silnika jest możliwość dokonania nie tylko jakościowej, ale również ilościowej oceny wykrytych defektów powierzchniowych. Zupełnie nowe możliwości wnosi w tym względzie endoskopia cyfrowa. Cyfrowe analizatory obrazu, współpracujące z głowicami pomiarowymi typu *StereoProbe*, *ShadowProbe*, *LaserDots* oraz *PhaseProbe*, dają możliwość cyfrowego przetwarzania efektów stereoskopowych, co pozwala zwymiarować widziane obrazy w taki sposób, aby dawały wrażenie quasi-trójwymiarowości z ich głębią, bryłowatością i wzajemnym rozmieszczeniem. Analiza literatury przedmiotu pozwala stwierdzić ogromne znaczenie takiego sposobu rozpoznawania uszkodzeń dla diagnostyki. Na podstawie dostępnych

danych statystycznych oraz wyników badań własnych autora można wnioskować, że metodami endoskopowymi można obecnie wykryć większość uszkodzeń eksploatacyjnych przestrzeni roboczych silnika, identyfikowanych również przy użyciu innych metod diagnostycznych [1,2].

Przedstawiona w niniejszym artykule jakościowa (optyczna) i ilościowa (cyfrowa) metoda wziernikowania przestrzeni roboczej jednocylindrowego silnika spalinowego o zapłonie samoczynnym z wstępną komorą spalania z wykorzystaniem wideoendoskopu przemysłowego firmy Everest typu XLG3, wyposażonego w głowicę pomiarową *ShadowProbe* („cienia”), stanowi bardzo efektywne narzędzie diagnostyczne. Podczas badania endoskopowego silnika zwrócono szczególną uwagę na czystość przestrzeni roboczej, jak również obecność ubytków korozyjnych i erozyjnych, a także produktów niecałkowitego spalania paliwa na denku tłoka, dolnej płycie głowicy, gładzi tulei cylindrowej oraz na grzybkach i w gniazdach zaworowych (przyłgniach). Ma to o tyle istotne znaczenie, ponieważ jest to silnik laboratoryjny, przygotowywany do realizacji szerszego programu badań niezawodnościowych, mających na celu ocenę intensywności procesu degradacji jego elementów konstrukcyjnych w warunkach zasilania różnymi rodzajami pozostałościowych paliw żeglugowym, w tym zasiarczonych i modyfikowanych [6,7].

2. Ocena referencyjnego stanu przestrzeni roboczej silnika metodą endoskopową

Przed rozpoczęciem zasadniczego programu badań konieczne było przeprowadzenie badań endoskopowych przestrzeni roboczej silnika laboratoryjnego Farymann Diesel typu D10, w celu określenia jej stanu referencyjnego. Jest to silnik o zapłonie samoczynnym, jednocylindrowy, czterosurowy, z wstępną komorą spalania, chłodzony wodą przez odparowanie – rys. 1. Został wyprodukowany w 1959 roku w Niemczech (zakłady Farymann Diesel Engines GmbH w Lampertheim), stanowiąc wyposażenie siłowni kutra rybackiego do połowów burtowych typu „B-25/S” (o oznaczeniu „WŁA-106”) zbudowanego w Stoczni Remontowej Gdynia i stacjonującego w porcie Władysławowo. Służył jako jednostka napędowa pomocniczego zespołu maszynowego (prądnicą prądu stałego, sprężarka, pompa wodna) i przepracował na kutrze około 90 tys. godzin.

W grudniu 2010 roku poddany został naprawie głównej. Wymieniono łożysko korbowodowe (łożysko toczne, walcowe, dwurzędowe, bez pierścienia wewnętrznego), łożyska wałka rozrządczego (łożyska toczne, kulkowe) oraz pierścienie tłokowe (3 pierścienie uszczelniające i 2 pierścienie zgarniające; w górnej części tłoka usytuowane są pierścienie uszczelniające i 1 pierścień zgarniający, w dolnej - drugi pierścień zgarniający). Sprawdzone stan techniczny tłoka (wykonany ze stopu aluminium, denko płaskie bez zagłębień), łożysk ramowych (wał korbowy składany, łożyskowany za pomocą łożysk tocznych walcowych) oraz łożysko sworznia tłokowego (łeb korbowodu z wciskaną tuleją brązową), zregenerowano głowicę cylindrową, przeprowadzono regulację aparatury wtryskowej (wtryskiwacza i pompy wtryskowej).

Obecnie endoskopowej ocenie stanu technicznego poddano przestrzeń roboczą silnika, ze szczególnym uwzględnieniem gładzi cylindrowej, dolnej płyty głowicy, zaworów cylindrowych i denka tłoka.



Podstawowe dane techniczne silnika:

Moc nominalna silnika – 5,9 kW
 Prędkość obrotowa nominalna – 1500 min⁻¹
 Moment obrotowy nominalny – 38 N·m
 Liczba cylindrów – 1
 Średnica cylindra – 90 mm
 Skok tłoka – 120 mm
 Stopień sprężania – 22:1
 Pojemność skokowa – 765 cm³

Rys. 1. Widok ogólny silnika Farymann Diesel typu D10 oraz jego podstawowe dane techniczne

Aparatura badawcza

Badanie endoskopowe silnika przeprowadzono przy użyciu wideoendoskopu pomiarowego firmy Everest typu XLG3, wyposażonego w obiektyw pomiarowy typu *ShadowProbe* [8]. Rysunek 2 ilustruje widok ogólny wideoendoskopu przygotowanego do użytkowania. Urządzenie to, jako złożony system diagnozujący, umożliwi inspekcję przestrzeni wewnętrznych silnika przez istniejące lub specjalnie wykonane otwory technologiczne o średnicy powyżej 7 mm. Jest ono przystosowane do pracy w atmosferze pyrozołu wody oraz olejów pędnych i smarów, a także w otwartej przestrzeni w warunkach klimatycznych występujących w Polsce w ciągu całego roku kalendarzowego. Jego zasilanie jest przystosowane do polskiej sieci elektrycznej 230 V/50 Hz.

Masa kompletnego, gotowego do pracy systemu, z wbudowanym wyświetlaczem LCD o przekątnej 15 cm, wynosi 12 kg (masa systemu wraz z walizką wynosi 22 kg).



Rys. 2. Widok ogólny wideoendoskopu pomiarowego Everest typu XLG3 przygotowanego do użytkowania: 1 – jednostka centralna; 2 – panel sterowniczy; 3 – rękojeść videosondy; 4 – sonda inspekcyjna; 5 – światłowód iluminacji obiektu; 6 – walizka; 7 – rączka transportowa (montażowa)



Rys. 3. Schemat ideowy sondy inspekcyjnej wideoendoskopu [10]

Wideoendoskop XLG3 jest wyposażony w wymienną sondę inspekcyjną (rys. 3), o następujących parametrach: średnica 6,1 mm, długość 3,0 m. Końcówka sondy, sterowana przy pomocy joysticka na rękojeści (kontrola sterowania artkulacji, z funkcją elektronicznej blokady położenia i automatycznym powrotem do pozycji wyprostowanej sondy), umożliwia jej wygięcie o kąt 120° w każdym kierunku (górną–dół / lewo–prawy). Przetwarzanie obrazu optycznego na elektroniczny odbywa się za pośrednictwem kamery CCD SUPER HEADTM o średnicy 4,2 mm, rozdzielczości 440 000 pikseli, umieszczonej w głowicy końcówki wziernikowej, o średnicy 6,1 mm, zapewniającej ciągły zoom cyfrowy (3,0×) oraz odwracanie obrazu lewo–prawy. Zapis cyfrowy kolorowego obrazu jest przesyłany szyną transmisyjną (przewody sygnałowe) sondy inspekcyjnej do jednostki centralnej zestawu, a następnie poprzez cyfrowe procesory obrazu przesyłany jest do monitora LCD (przekątna 16,3 mm, tryb panoramiczny 16×9, matryca 800×480 pikseli, jasność 380 Cd/m²) zamontowanego w rękojeści wideosondy nad panelem manualnym.

Sonda inspekcyjna wideoendoskopu posiada wymienne końcówki, umożliwiające obserwację w sektorach czołowych oraz bocznych pod różnymi kątami. Dzięki temu znacznie zwiększone są manualne możliwości dokonywania inspekcji wewnętrznych przestrzeni silnika. Istnieje również możliwość wymiany w warunkach eksploatacyjnych, bez konieczności stosowania dodatkowych narzędzi i przerw w badaniach, obiektywów głowicy wziernikowej ze standardowych na pomiarowe, zapewniających wymiarowanie defektów powierzchniowych metodą „cienia”. Sonda jest zabezpieczona przed uszkodzeniami mechanicznymi przez zewnętrzny oplot wolframowy. Na jej końcówce zamontowana jest głowica ochronna, zapewniająca odporność na działanie cieczy, takich jak woda, benzyna, olej pędny lub smarowy (mineralne i syntetyczne) oraz alkohole: metylowy i etylowy.

Wideoendoskop XLG3 jest wyposażony w źródło zimnego, białego światła – lampa wyładowcza (łukowa) 75 W typu HID, o gwarantowanej trwałości 1000 godzin, umieszczona jest w obudowie urządzenia. Światło ma barwę białą, temperatura barwy źródła światła wynosi około 5000 K. Oprogramowanie użytkowe wideoendoskopu umożliwia pomiar wykrytych uszkodzeń i defektów powierzchniowych metodą „cienia”, a także cyfrowy zapis zarejestrowanych obrazów (zdjęć i filmów wideo) w formatach: BMP, JPG, MPEG4, w pamięci wewnętrznej (50 GB) lub na wymiennym USB (kopiowanie pomiędzy trzema gniazdami USB i C:\). Istnieje również możliwość zapisu komentarzy głosowych oraz sporządzania notatek tekstowych, graficznych do zapisywanych zdjęć i opatrywania ich logiem użytkownika.

Przebieg badania

W celu uzyskania dostępu do przestrzeni roboczej badanego silnika zdemontowano wtryskiwacz z głowicy cylindrowej, a następnie wprowadzano sondę wziernikową wideoendoskopu - rys. 4 i 5. Badanie endoskopowe należy prowadzić przy zachowaniu szczególnych środków ostrożności. Nieprzestrzeganie podstawowych procedur postępowania podczas realizacji badań może skutkować zniszczeniem wideosondy, uszkodzeniem elementów konstrukcyjnych silnika, a

Badanie rozpoczęto obiektywem standardowym. Wykryte defekty powierzchniowe wymiarowano obiektywem pomiarowym „ShadowProbe”.

Najistotniejsze zasady i zalecenia metodyczne, których należy kategorycznie przestrzegać w celu zapewnienia racjonalnego użytkowania endoskopowego systemu diagnozującego tłokowych silników spalinowych zawarte zostały w monografii autora poświęconej diagnostyce eksploatacyjnej silników okrętowych [2].

Efektem finalnym badania endoskopowego było sporządzenie raportu diagnostycznego, który zawierał opis badanego obiektu (numer fabryczny silnika, rok produkcji, wykorzystanie rewersu, przeprowadzone naprawy i regulacje etc.), miejsce i termin realizacji badania, cel i przebieg badania, reprezentatywne wyniki oraz wnioski i zalecenia eksploatacyjne [5].

Wyniki badania

Podczas badania endoskopowego przestrzeni roboczych silnika zwrócono szczególną uwagę na następujące elementy konstrukcyjne:

- stan grzybków i gniazd zaworowych,
- stan wewnętrznych powierzchni tulei cylindrowych (gładzi) oraz głowicy i denka tłoka.

W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono:

1. Obecność (nieliczna) wzdłużnych śladów zużycia ściernego (rysowanie, bruzdowanie) gładzi tulei cylindrowych;
2. Obecność osadów zanieczyszczeń (głównie mokry nagar) na dolnej płycie głowicy, a także na powierzchniach grzybków zaworów dolotowych i wylotowych.
3. Obecność niewielkich defektów powierzchniowych na tłoku i grzybku zaworu wylotowego.

Ekspertyza diagnostyczna

Na podstawie zarejestrowanych wyników badania endoskopowego można wnioskować, że stan techniczny dostępnych elementów konstrukcyjnych ograniczających przestrzeń roboczą silnika jest zadowalający. Wykryte defekty powierzchniowe nie wnoszą żadnych ograniczeń do realizacji zasadniczego programu badań eksperymentalnych. Jednak odnosząc te wyniki do analogicznych obrazów endoskopowych przestrzeni roboczej silnika zarejestrowanych w 2015 roku można zaobserwować, że zdecydowanie wzrosła ilość mokrego nagaru osadzającego się na dolnej płycie głowicy, denku tłoka i grzybkach zaworowych.

Jest to najprawdopodobniej skutkiem podejmowanych prób krótkotrwałego zasilania silnika modyfikowanym paliwem żeglugowym, w ramach testowania budowanego stanowiska badawczego [5,6,7]. Wynika stąd wniosek, że tego rodzaju paliwo należy bardzo starannie przygotować przed podaniem do komory spalania silnika, aby nie dopuścić do jego niecałkowitego spalania.



Badanie przeprowadzone 17.08.2017 r.



a) Gładź cylindrowa w części środkowej tulei - ślady zużycia ściernego, brak śladów "honowania" tulei



b) Przestrzeń robocza w rejonie DMP tłoka – nieznaczne osady zanieczyszczeń na denku tłoka



c) Przestrzeń robocza w rejonie DMP tłoka – nieznaczne osady zanieczyszczeń na denku tłoka



d) Denko tłoka – nieznaczne osady zanieczyszczeń, widoczny numer identyfikacyjny (katalogowy)



e) Denko tłoka (zbliżenie) – nieznaczne osady zanieczyszczeń, widoczny numer identyfikacyjny (katalogowy)



f) Gładź cylindrowa w rejonie DMP - ślady zużycia ściernego, brak śladów "honowania" tulei

Badanie przeprowadzone 17.08.2017 r.



a) Gładź cylindrowa w rejonie DMP - ślady zużycia ściernego, brak śladów "honowania" tulei



b) Gniazdo zaworu wylotowego w dolnej płycie głowicy



c) Gniazdo zaworu dolotowego w dolnej płycie głowicy



d) Zawory cylindrowe w dolnej płycie głowicy

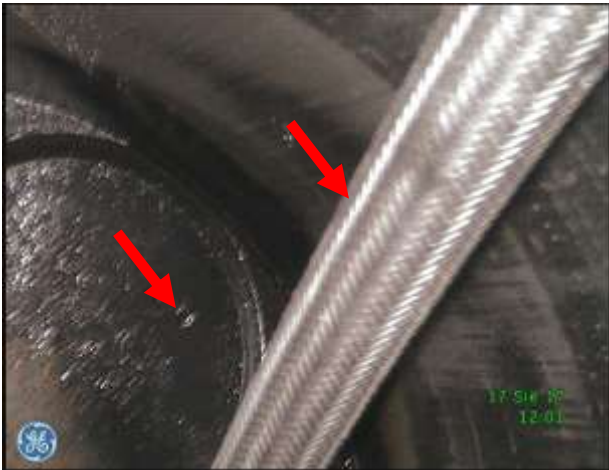


e) Dolna płyta głowicy, zawór dolotowy – sonda inspekcyjna wprowadzona przez otwór po zdemontowanym wtryskiwaczu



f) Dolna płyta głowicy, zawór wylotowy – nieznaczne osady zanieczyszczeń, nieznaczne wgniecenie na powierzchni grzybka zaworowego

Badanie przeprowadzone 17.08.2017 r.



a) Dolna płyta głowicy, zawór wylotowy – widoczna sonda inspekcyjna wideoendoskopu, nieznaczne wgniecenie na powierzchni grzybka zaworowego



b) Dolna płyta głowicy, zawór wylotowy – widoczna sonda inspekcyjna wideoendoskopu, nieznaczne wgniecenie na powierzchni grzybka zaworowego



c) Przestrzeń robocza w rejonie GMP tłoka – osady nagaru na dolnej płycie głowicy



d) Przestrzeń robocza w rejonie GMP tłoka – osady nagaru na dolnej płycie głowicy

Badanie przeprowadzone 29.09.2015 r. (stan referencyjny)



a) Denko tłoka z numerem identyfikacyjnym



b) Gładz cylindrowa w rejonie DMP - ślady zużycia ściernego, brak śladów "honowania" tulei



c) Denko tłoka - widoczne ślady nagaru (1) oraz zarysowanie powierzchni (2)



d) Dolna płyta głowicy z gniazdami zaworowymi

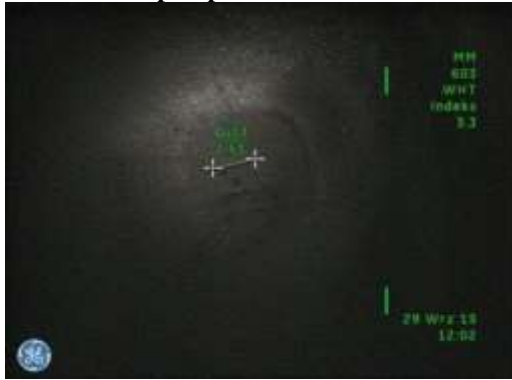


e) Dolna płyta głowicy – sonda inspekcyjna wprowadzona przez otwór po zdemontowanym wtryskiwaczu paliwa



f) Gładz cylindrowa w rejonie GMP - ślady zużycia ściernego, brak śladów "honowania" tulei

Badanie przeprowadzone 29.09.2015 r. – wymiarowanie wykrytych defektów powierzchniowych



a) Pomiar długości cyfry na denku tłoka wykonany metodą „Cienia” - 2,53 mm z indeksem dokładności 3.3, co daje błąd bezwzględny rzędu 0,7 mm



b) Pomiar głębokości rysy na denku tłoka wykonany metodą „Cienia” - 0,35 mm z indeksem dokładności 16.3 odpowiadającemu błędowi bezwzględnemu rzędu 0,1 mm



c) Pomiar długości rysy na denku tłoka wykonany metodą „Cienia” - 7,52 mm z indeksem dokładności 4.9, co odpowiada błędowi bezwzględnemu rzędu 0,3 mm



d) Pomiar długości wielosegmentowej (łamanej) rysy denku tłoka wykonany metodą „Cienia” - 5,42 mm z indeksem dokładności 5.3 odpowiadającemu błędowi bezwzględnemu rzędu 0,25 mm



e) Przymiar kołowy oznaczenia wybitego na denku tłoka wykonany metodą „Cienia” - 1,96 mm z indeksem dokładności 5,5, co odpowiada błędowi bezwzględnemu rzędu 0,25 mm

3. Uwagi i wnioski końcowe

Przedstawiony w artykule raport z przeprowadzonych badań endoskopowych zawiera ocenę stanu technicznego elementów konstrukcyjnych ograniczających przestrzeń roboczą silnika o zapłonie samoczynnym z wstępną komorą spalania, dokonaną bezpośrednio przed rozpoczęciem testowania różnego rodzaju modyfikowanych paliw żeglugowych. Zarejestrowane wyniki stanowią materiał porównawczy dla kolejnych etapów realizowanego programu badań, mających na celu oszacowanie skutków zastosowania tych paliw na intensywność degradacji elementów konstrukcyjnych silnika.

Kolejnym celem badawczym było potwierdzenie przydatności posiadanej aparatury endoskopowej (wideoendoskopu pomiarowego Everest XLG3) do diagnozowania przestrzeni roboczej przedmiotowego silnika, którego wynik jest jednoznacznie pozytywny.

Literatura

- [1] Korczewski Z.: Endoskopia silników okrętowych. AMW Gdynia, 2008.
- [2] Korczewski Z.: Diagnostyka eksploatacyjna okrętowych silników spalinowych - tłokowych i turbinowych. Wybrane zagadnienia. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2017.
- [3] Korczewski Z i in.: Zbiór sprawozdań z badań diagnostycznych tłokowych i turbinowych silników spalinowych eksploatowanych na okrętach MWRP – lata 1992–2008. Prace badawcze Akademii Marynarki Wojennej w Gdyni.
- [4] Korczewski Z. i in.: Zbiór sprawozdań z badań diagnostycznych tłokowych i turbinowych silników okrętowych – lata 2009–2015. Prace badawcze Politechniki Gdańskiej.
- [5] Korczewski Z. i in.: Metoda oceny ekologicznych, energetycznych i niezawodnościowych skutków stosowania modyfikowanych paliw żeglugowych do zasilania silników o zapłonie samoczynnym w warunkach rzeczywistych. Dokumentacja techniczna. Badania pilotażowe. Sprawozdanie z pracy naukowo-badawczej wykonanej w ramach projektu finansowanego przez Wojewódzki Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Morskiej w Gdańsku. Nr projektu RX-10/2017. Politechnika Gdańska 2017.
- [6] Korczewski Z., Rudnicki J., Zadrag R.: Laboratory station for research of the innovative dry method of exhaust gas desulfurization for an engine powered with residual fuel. *Combustion Engines*, 1/2017 (168), CE-2017-105, p. 32-37.
- [7] Korczewski Z., Marszałkowski K., Rudnicki J.: The concept of research on ecological, energetical and reliability effects of modified marine fuel oils usage to supply compression ignition engines in real conditions. *Combustion Engines*, 4/2017 (171), CE-2017-410, p. 56-61.
- [8] General Electric Company Inspection Technologies. The Everest XLG3 VideoProbe System. Manual Guide, USA, 2011.
- [9] General Electric Company Inspection Technologies. The Everest XLG3 VideoProbe System. Operation Instruction, USA, 2011.
- [10] General Electric Measurement & Control. VideoProbe System – USA, 2011.
- [11] Industrial endoscopy system guide. Version 2. Oferta OLYMPUS Industrial.