

KONCEPCJA DIAGNOZOWANIA GNIAZD ZAWORÓW CYLINDROWYCH SILNIKÓW OKRĘTOWYCH W EKSPLOATACJI

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 przybliżono fizykę uszkodzeń eksploatacyjnych zaworów cylindrowych silników okrętowych oraz technologię ich naprawy. Zaprezentowano system diagnozujący tego typu silników, który znajduje się na wyposażeniu bazy laboratoryjnej Katedry Siłowni Morskich i Lądowych WOiO PG. Umożliwia on przeprowadzenie kompleksowej oceny stanu technicznego przestrzeni roboczych silników zabudowanych w siłowni okrętowej w bieżącej eksploatacji. Zaproponowano schemat organizacji badań zaworów cylindrowych z wykorzystaniem posiadanego systemu diagnozującego dla potrzeb dokonania oceny skuteczności zaadaptowanej technologii naprawy gniazd zaworowych.

Słowa kluczowe: silniki okrętowe, zawory cylindrowe, uszkodzenia eksploatacyjne i naprawa, diagnozowanie.

1. Wprowadzenie

Poprawne funkcjonowanie silnika o ZS, przy zapewnieniu oczekiwanych osiągnięć i sprawności w stanach pracy ustalonej i w procesach przejściowych, jest w znaczącym stopniu uzależnione od skuteczności wymiany ładunku w cylindrach [Orkisz, 1991]. O jakości tego procesu świadczą wartości współczynników napełnienia cylindrów świeżym ładunkiem, określających tzw. sprawność napełnienia. Wartość współczynnika napełnienia cylindra jest determinowana głównie przez dwa czynniki:

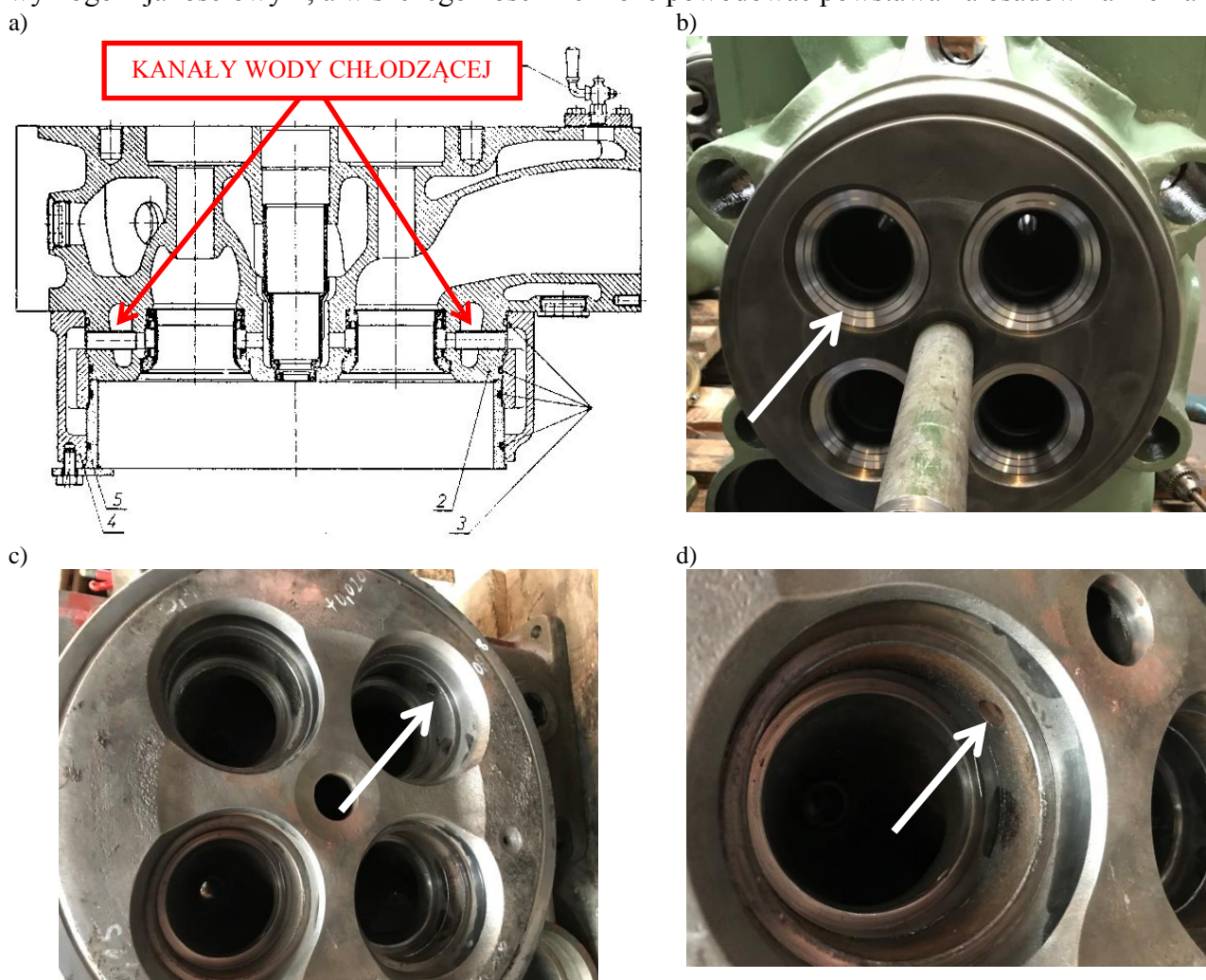
- optymalnie dobrane fazy rozrządu, w sensie zapewnienia najkorzystniejszych kątów otwarcia i zamknięcia kanałów powietrza dolotowego i spalin wylotowych (napełnianie i przepłukanie cylindra) w całym zakresie przewidywanych zmian obciążenia silnika;
- optymalna prędkość przepływu powietrza i spalin w układzie dolotowo-wylotowym, zapewniająca małe opory przepływu i efektywne zawirowanie powietrza wpływającego do cylindra.

Koniecznym warunkiem utrzymania optymalnych wartości tych parametrów w eksploatacji silnika okrętowego jest stan pełnej zdatności technicznej zaworów cylindrowych, które stanowią jego najbardziej obciążone cieplnie i mechanicznie części konstrukcyjne. Szczególnie newralgicznym elementem są zawory wylotowe, omywane spalinami o temperaturze powyżej 1000 K. W początkowej chwili otwarcia zaworu wylotowego spaliny wypływają z cylindra przez szczelinę w przyłgni zaworowej z prędkością krytyczną ponad 600 m/s, przy temperaturze ponad 1200 K [Włodarski, 1982]. Gwałtownie rośnie temperatura grzybka zaworowego, która przy ograniczonych możliwościach odprowadzania ciepła przez tuleję prowadzącą (prowadnicę)

trzonka zaworowego osiąga w tym czasie nawet 1000–1100 K. A zatem w takich warunkach pracy zaworów wylotowych muszą zostać spełnione dodatkowe wymagania konstrukcyjne w aspekcie wymiany ciepła (w szczególności przewodności ciepła) oraz odporności na ścieranie i

obciążenia udarowe w wysokich temperaturach, jak również wysokie wymagania w zakresie szeroko rozumianej odporności korozyjnej.

Na destrukcyjne oddziaływanie wysokiej temperatury spalin narażone są również gniazda zaworów cylindrowych. W ostatnich latach udoskonalono metody projektowania i wytwarzania tego węzła konstrukcyjnego silników okrętowych, które pozwalają na zdecydowane obniżenie temperatury pracy gniazd zaworowych, zwłaszcza wylotowych, nawet o 300 K. Jest to osiągnięte na drodze odpowiedniego zastosowania chłodzenia wodnego tego rejonu głowicy cylindrowej – rys. 1. Woda słodka używana do chłodzenia silników okrętowych musi odpowiadać określonym wymaganiom jakościowym, a w szczególności nie może powodować powstawania osadów kamienia



Rys. 3. Przekrój wzdłużny głowicy cylindrowej silnika okrętowego z chłodzonymi gniazdami zaworowymi, przygotowanej do próby hydraulicznej (a), dolna płyta głowicy cylindrowej silnika MAN L28/32 - widok chłodzonych gniazd zaworów cylindrowych po naprawie (b), tuleje pod gniazda zaworowe zamontowane w otworach głowicy silnika MAN L28/32 (c), tuleja pod gniazdo zaworu wylotowego (zbliżenie) zamontowana w otworze głowicy cylindrowej silnika MAN L28/32 (d), 1 – zawór odpowietrzający, 2 – głowica cylindrowa, 3 – pierścienie gumowe, 4 – płaszcz wodny, 5 – tuleja uszczelniająca

kotłowego i szlamów oraz erozji (zwłaszcza kawitacyjnej) czy korozji na omywanych powierzchniach. Z tych względów przed wprowadzeniem wody do układu chłodzenia silnika należy przeprowadzić jej uzdatnianie mające na celu:

- usunięcie rozpuszczonych w niej substancji osadotwórczych, tzw. odmineralizowanie,
- wprowadzenie odpowiedniej ilości inhibitorów korozji – chromiany, azotany, oleje antykorozyjne itp. [Piotrowski i Witkowski, 2002].

Na podstawie wieloletnich badań endoskopowych silników okrętowych w eksploatacji można wnioskować, że zawory cylindrowe ulegają uszkodzeniom głównie z powodu nadmiernego zużycia prowadnic trzonek zaworowych [Korczewski, 2008]. Jest to proces nieunikniony¹, związanych ze specyfiką realizowanych procesów trybologicznych w skrajnie niekorzystnych warunkach temperaturowych. Fizykę tego typu uszkodzeń eksploatacyjnych, które mogą doprowadzić do całkowitego wypalenia zaworów, opisano szczegółowo w monografiach [Piaseczny, 1992; Korczewski, 2017] bogato ilustrowanych materiałami poglądowymi. Prawdopodobieństwo zajścia takiego zdarzenia będzie zdecydowanie większe, gdy nałożą się do tego problemy z odprowadzaniem przez czynnik chłodzący ciepła z gniazd zaworowych. Pomijając sytuacje losowe, związane z niewystarczającą ilością czynnika chłodzącego w układzie (np. wskutek utraty szczelności), problemy te są zazwyczaj konsekwencją popełnianych błędów obsługowych, a dokładniej błędów zaniechania, w zakresie uzdatniania wody po wprowadzaniu do obiegu jej świeżych dawek [Piotrowski i Witkowski, 2002]. Powstające wówczas osady zanieczyszczeń, wżery korozyjne i erozyjne są przyczyną zakłócenia procesu przepływu czynnika chłodzącego, który nie nadąża z odprowadzaniem strumienia ciepła od gniazda zaworowego, co nieuchronnie prowadzi do jego nadpalenia (często z wykruszeniem), a nawet perforacji – rys. 2.

Innym, często popełnianym błędem w obsłudze instalacji chłodzenia jest niewłaściwie przeprowadzony zabieg chemicznego usuwania z kanałów przepływowych osadów kamienia kotłowego, a zwłaszcza niewłaściwie dobrany czas ekspozycji środka dyspergująco-detergentowego. Prowadzi to zazwyczaj do gwałtownego rozwoju korozji chłodzonych przestrzeni wewnętrznych silnika (czas ekspozycji zbyt długi) albo do częściowej (lokalnej), a nawet całkowitej utraty drożności układu chłodzenia (za krótki czas ekspozycji).



Rys. 2. Zużyte gniazdo zaworu wylotowego silnika okrętowego- widoczne ślady perforacji

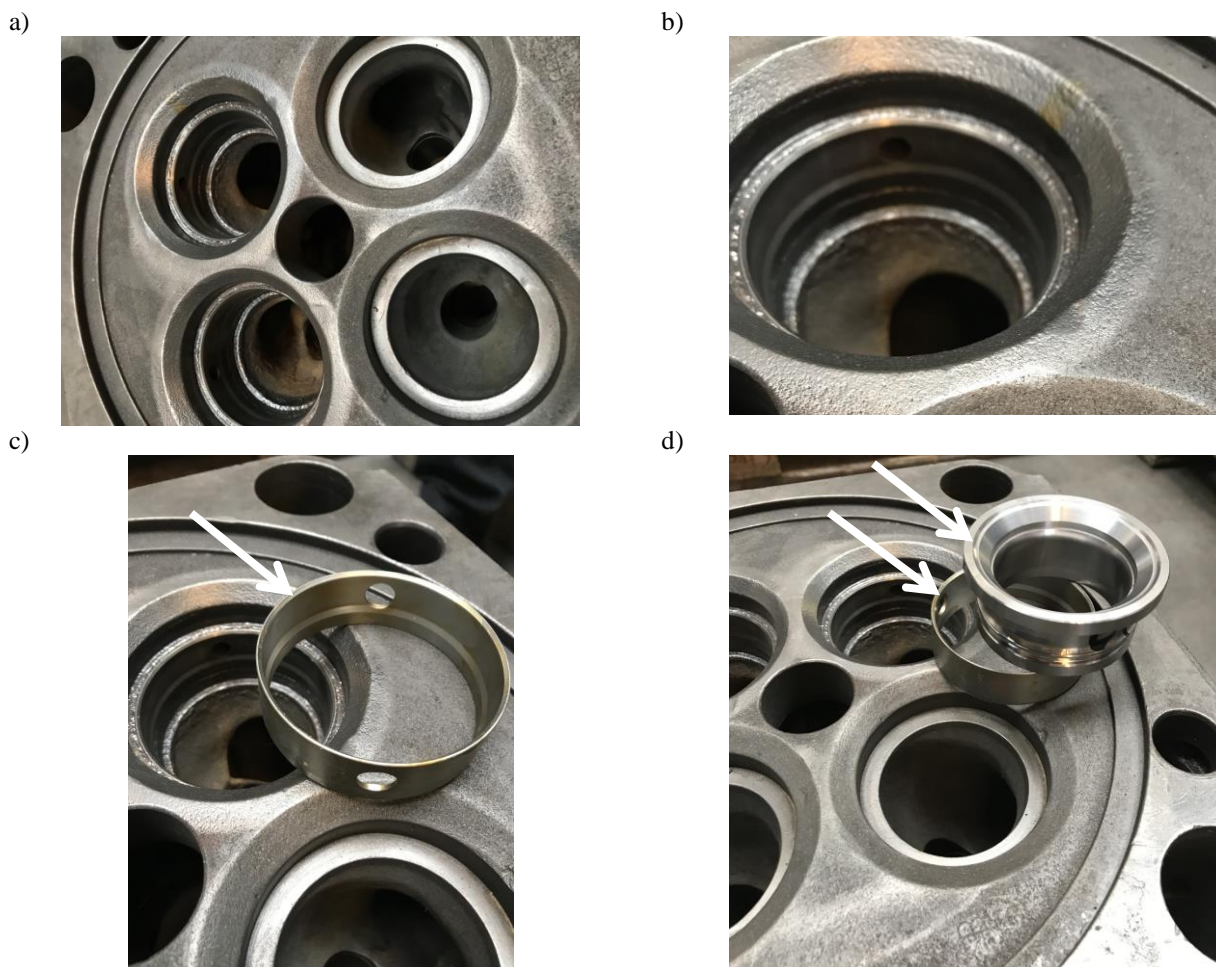
W sytuacji zużycia gniazda zaworowego w stopniu uniemożliwiającym jego regenerację, a także pęknięcia czy rozluźnienia osadzenia, należy je wymienić na nowe. W razie zużycia powierzchni otworu dla gniazda zaworowego w głowicy, należy ją wyrównać i zmierzyć. Dopuszczalne jest napawanie pojedynczych ubytków korozyjno-erozyjnych, jeżeli ich głębokość, liczba i zagęszczenie nie przekroczy dopuszczalnej wartości dla danego typu silnika. Jeżeli otwór pod gniazdo zaworowe nie zapewnia wymaganego wcisku gniazda, to wytacza się go na wymiary gniazda naprawczego, o większej średnicy zewnętrznej. Przed wciśnięciem gniazda w otwór głowicy należy je oziębnić w ciekłym azocie (78 K).

Ponieważ gniazda naprawcze, jako nietypowe, są znacznie kosztowniejsze od standardowych, przez niektórych producentów silników okrętowych (np. silniki Sulzer S20)

¹ Jego intensywność jest ściśle zdeterminowana jakością i skutecznością realizacji wszystkich funkcji oleju smarowego.

stosowane jest inne rozwiązanie konstrukcyjne posadowienia chłodzonych gniazd zaworów wylotowych w głowicy cylindrowej – rys. 3. Otóż pomiędzy otwór w głowicy a gniazdo wprowadzona jest tuleja montażowa (pośrednia). Daje to możliwość znacznego uproszczenia technologii naprawy tych gniazd w sytuacji rozległych uszkodzeń. Wymieniane są wówczas (w razie konieczności) gniazda w wymiarze standardowym, natomiast dobierana jest odpowiednia grubość tulei montażowej, przy utrzymaniu jej średnicy wewnętrznej zapewniającej odpowiedni (skuteczny) wcisk gniazda zaworowego (standardowego).

Tuleja montażowa musi być wykonana z materiału konstrukcyjnego o odpowiedniej rozszerzalności cieplnej w stosunku do materiału gniazda zaworowego i głowicy cylindrowej. W przeciwnym razie może dojść do rozluźnienia osadzenia tulei i gniazd zaworowych w otworach głowicy, co prowadzi do powstawania wtórnych uszkodzeń nie tylko w układzie cylindrowym silnika, ale również w układzie turbodoładowania.



Rys. 3. Dolna płyta głowicy silnika SULZER S20: a) widok gniazd zaworów cylindrowych przed naprawą, b) otwór pod tuleję gniazda zaworu wylotowego (chłodzonego), c) nowa tuleja pod gniazdo zaworu wylotowego, d) nowa tuleja i gniazdo zaworu wylotowe przed zamontowaniem w otworze głowicy cylindrowej

Ponieważ pojawiają się próby adaptacji opisaną powyżej technologię naprawy gniazd zaworów cylindrowych w odniesieniu do innych silników okrętowych, np. silników MAN L28/32, w których chłodzone są zarówno zawory dolotowe, jak i wylotowe² (rys. 3) istotnym problemem diagnostycznym staje się opracowanie skutecznej metody oceny stanu technicznego tego węzła

² Gniazda zaworowe montuje się w otworach dolnej płyty głowicy bezpośrednio, bez tulei montażowych

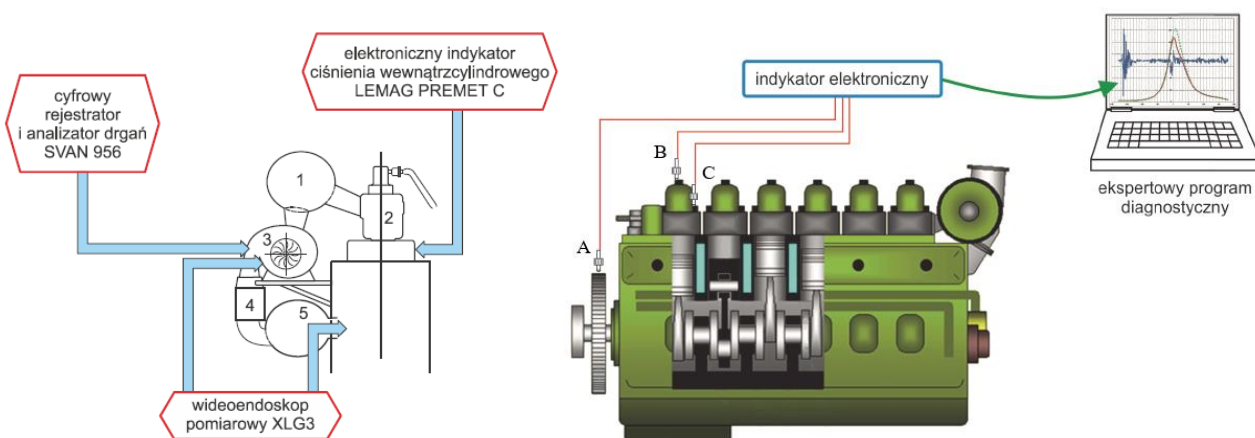
konstrukcyjnego silnika w warunkach eksploatacji. Tylko wtedy możliwe będzie potwierdzenie skuteczności przeprowadzonej naprawy, a także prognozowanie jego trwałości.

2. System diagnozujący silników okrętowych

Ciągle unowocześnianie i zwiększanie możliwości systemów pomiarowo-diagnostycznych stosowanych w okrętowych systemach energetycznych napędzanych tłokowymi silnikami spalinowymi pozwala na rozszerzenie funkcji systemu kontroli, włączając w nie – oprócz standardowego pomiaru parametrów eksploatacyjnych – także funkcje pomiaru i rejestracji:

- ciśnienia w cylindrach silnika;
- drgań generowanych przez wytypowane punkty struktury konstrukcyjnej silnika (głowica, kadłub turbosprężarki);
- obrazu przestrzeni wewnętrznych (roboczych) silnika.

Schemat ideowy systemu diagnozującego stanowiącego wyposażenie bazy laboratoryjnej Katedry Siłowni Morskich i Lądowych Politechniki Gdańskiej, z uwzględnieniem formy konstrukcyjnej okrętowego tłokowego silnika spalinowego, przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 4. Schemat ideowy silnika okrętowego z elementami systemu diagnozującego Katedry Siłowni Morskich i Lądowych Politechniki Gdańskiej: 1 – zasobnik spalin wylotowych; 2 – zawór wylotowy; 3 – turbosprężarka; 4 – chłodnica powietrza przepływającego; 5 – zasobnik powietrza przepływającego; A – czujnik położenia kąтового wału korbowego; B – czujnik ciśnienia w cylindrze; C – przetwornik przyspieszenia drgań

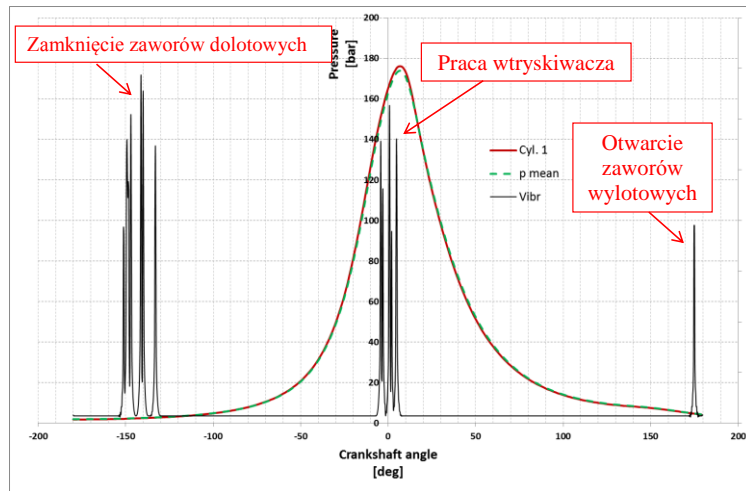
Podstawą realizacji parametrycznych badań diagnostycznych jest kolejne indykowanie cylindrów silnika połączone z pomiarami drgań głowic cylindrowych oraz turbosprężarki, realizowane w stanie pracy ustalonej na reprezentatywnych zakresach obciążenia. Przy wykorzystaniu specjalistycznych analizatorów wielkości szybkozmiennych [Lemag Lehmann & Michels GmbH, 2015; Friedrich Leutert GmbH & Co., 2015] przeprowadza się porównawczą analizę statystyczną i merytoryczną:

- rozwiniętych wykresów indykatorowych,
- przebiegów przyspieszeń drgań generowanych pracą mechanizmów związanych z układem cylindrowym, transmitowanych do punktu pomiaru na powierzchni głowicy,
- przebiegów innych wielkości charakteryzujących procesy robocze w cylindrach silnika,

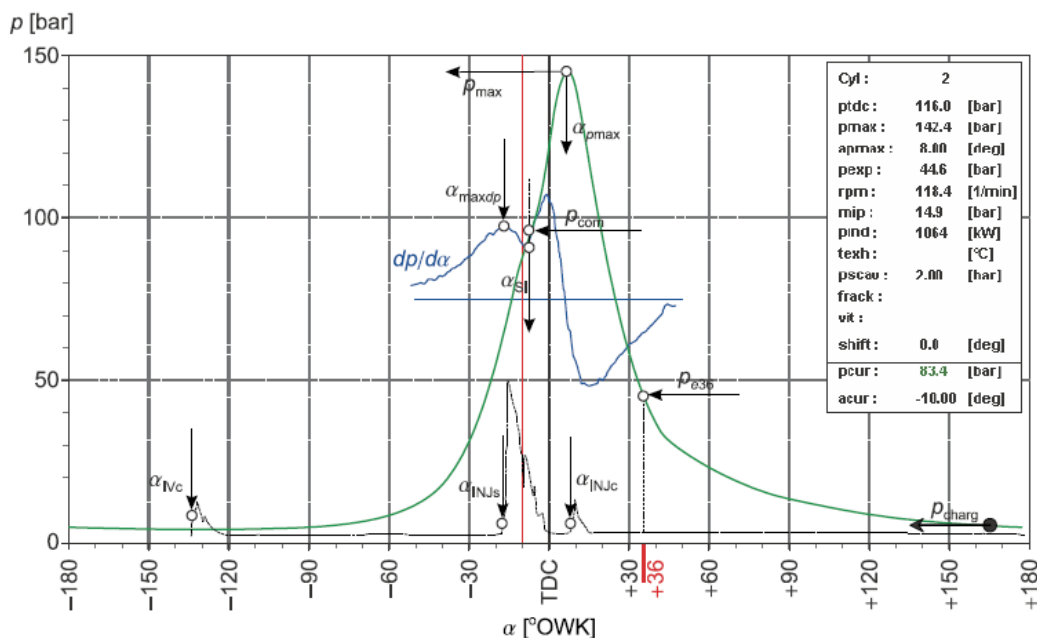
sporządzonych w dziedzinie kąta obrotu wału korbowego – rys. 5 i 6. Wyznaczane w ten sposób miary diagnostyczne: średnie ciśnienie indykowane, moc indykowana, maksymalne ciśnienie spalania i szybkość wzrostu ciśnienia w cylindrze $dp/d\alpha_{OWK}$, a także charakterystyczne kąty obrotu wału korbowego, przy których następują otwarcie i zamknięcie wtryskiwaczy, początek samozapłonu paliwa w cylindrach oraz otwarcie i zamknięcie zaworów cylindrowych, dają ważną informację o ogólnym stanie technicznym przestrzeni roboczych, układu wtryskowego i rozrządu

zaworowego silnika.

Kluczowym uzupełnieniem parametrycznych metod diagnozowania silników okrętowych, zwłaszcza średnio- i szybkoobrotowych, jest badanie endoskopowe ich przestrzeni roboczych. Wynika to z ograniczonej podatności kontrolnej tego typu silników, które standardowo nie są oprzyrządowane w zawory indykatorowe. Na wyposażeniu bazy diagnostycznej Katedry Siłowni Morskich i Lądowych Politechniki Gdańskiej znajduje się wysoce specjalizowany wideoendoskop nowej generacji firmy Everest typu XLG3, w którym zastosowano obiektyw pomiarowy typu *ShadowProbe*. Obszerną charakterystykę możliwości diagnostycznych wideoendoskopów oraz szczegółową metodykę realizacji badań endoskopowych silników okrętowych przedstawiono w monografiach autora [Korczewski, 2008; Korczewski, 2017].

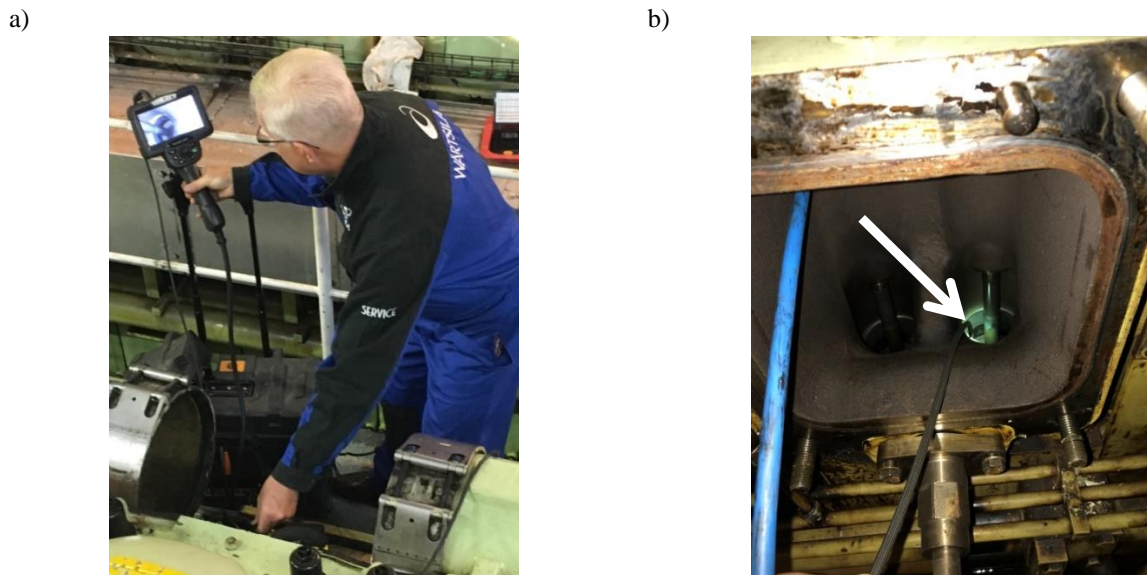


Rys. 5. Przebiegi zmian ciśnienia w cylindrze oraz przyspieszenia drgań głowicy cylindrowej, jako funkcja kąta OWK w stosunku do uśrednionego przebiegu zmian ciśnienia w cylindrach dla całego silnika

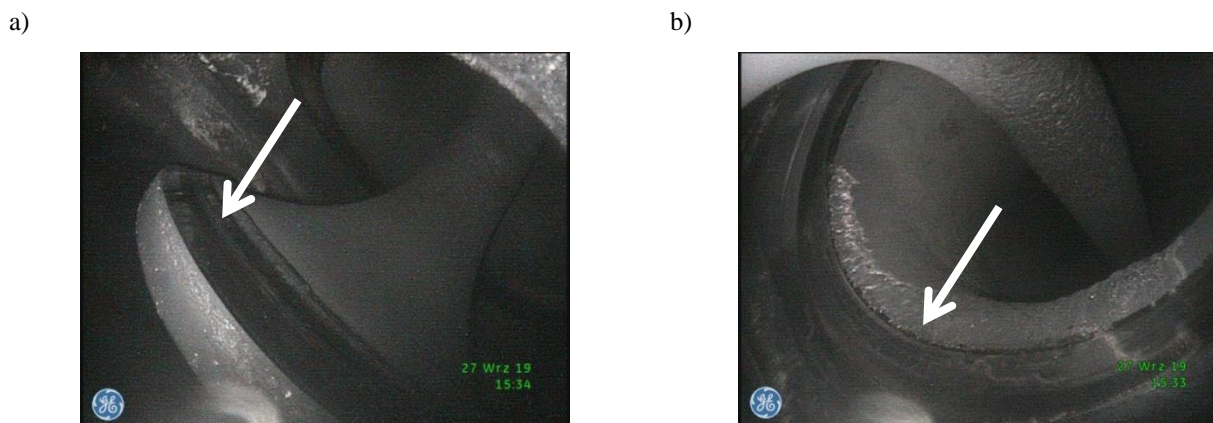


Rys. 6. Parametry charakteryzujące rozwinięty wykres indykatorowy oraz wykres funkcji obwiedni drgań generowanych z pokrywy głowicy: p_{max} – maksymalne ciśnienie spalania; p_{com} – ciśnienie końca sprężania (ewentualnie ciśnienie sprężania dla kąta 10°OWK przed GMP, tj. w przedziale „czystego” sprężania); p_{e36} – ciśnienie ekspansji dla kąta 36°OWK za GMP; p_{charg} – ciśnienie powietrza doładowującego; α_{pmax} – kąt maksymalnego ciśnienia spalania; α_{SI} – kąt samozapłonu paliwa; α_{maxdp} – kąt maksimum $dp/d\alpha$; α_{IVc} – kąt zamknięcia zaworu dolotowego; α_{INJs} – kąt początku wtrysku paliwa; α_{INJc} – kąt końca wtrysku paliwa

Rysunek 7 ilustruje widok ogólny wideoendoskopu przygotowanego do badania diagnostycznego przestrzeni cylindrowej silnika okrętowego MAN 10L32/44CR oraz sposób wprowadzenia do niej sondy inspekcyjnej wideoendoskopu. Na rysunku 8 przedstawiono zarejestrowane wyniki badań endoskopowych zaworów cylindrowych jednego z układów tego silnika, które przeprowadzono w bieżącej eksploatacji.



Rys. 7. Sposób wprowadzenia sondy inspekcyjnej wideoendoskopu Everest XLG3 do przestrzeni cylindrowej silnika okrętowego firmy MAN typu 10L32/44CR przez gniazda otwartych zaworów dolotowych: a) dostęp do gniazd zaworowych dolotowych układu cylindrowego nr 5 przez zdemontowaną sekcję kanału powietrza dolotowego, b) gniazda zaworów dolotowych układu cylindrowego nr 5



Rys. 8. Dolna płyta głowicy silnika okrętowego firmy MAN typu 10L32/44CR – otwarty zawór wylotowy, widoczna przylgnia grzybka zaworowego (a) i gniazdo zaworowe (b)

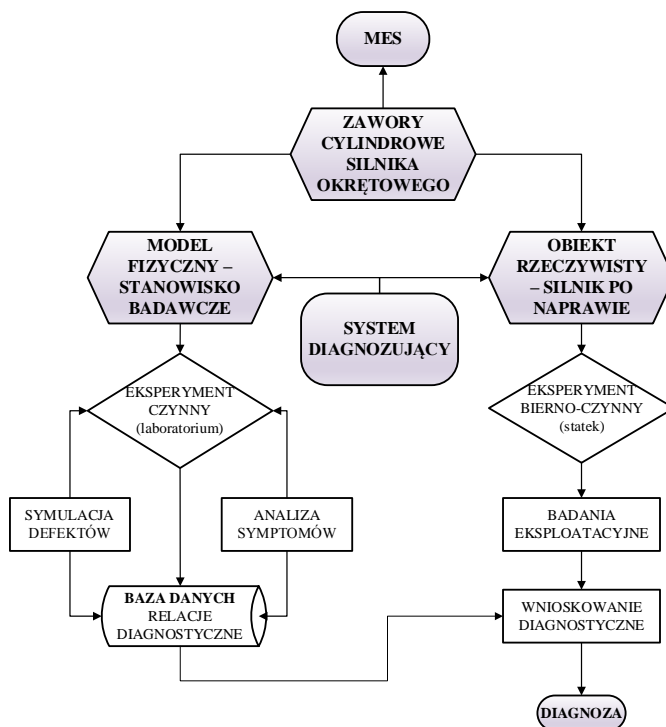
3. Schemat organizacji badań

Wiarygodną ocenę skuteczności zastosowanej technologii naprawy gniazd zaworów cylindrowych silnika okrętowego można sformułować jedynie na podstawie wyników systematycznie prowadzonych badań diagnostycznych podczas jego bieżącej eksploatacji. Sformułowanie diagnozy odbywa się wówczas na drodze analizy porównawczej zarejestrowanych sygnałów pomiarowych, które charakteryzują proces roboczy realizowany w cylindrach silnika oraz towarzyszący proces drganiowy głowic cylindrowych. Istotą badań diagnostycznych jest w takim przypadku określenie trendu zmian wartości wytypowanych parametrów wykresu indykatorowego oraz przyspieszenia drgań obserwowanego układu cylindrowego w odniesieniu do stanu dla silnika

fabrycznie nowego lub po przeprowadzonej naprawie. Ostateczną weryfikację dokonywanych analiz parametrycznych zapewniają badania endoskopowe przestrzeni cylindrowych silnika, ze szczególnym uwzględnieniem gniazd zaworowych.

Znajomość relacji diagnostycznych defekt-symptom jest wynikiem realizacji eksperymentów czynnych na laboratoryjnym modelu fizycznym rozpatrywanego węzła konstrukcyjnego silnika, a także eksperymentów bierno-czynnych na obiekcie rzeczywistym, tj. silniku zabudowanym w siłowni okrętowej. W pierwszym podejściu jest to celowa i ściśle określona zmiana wartości parametrów struktury konstrukcyjnej gniazd zaworowych oraz pomiar i analiza wartości parametrów rozpatrywanych sygnałów diagnostycznych, natomiast w drugim - pomiar wartości parametrów tych samych sygnałów przy naturalnie zmieniających się wartościach parametrów struktury, jednak bez możliwości jakiegokolwiek ingerencji w te wartości (np. pomiar sygnałów diagnostycznych bezpośrednio przed weryfikacją i naprawą gniazd zaworowych).

Chronologiczny schemat organizacji badań skuteczności zastosowanej technologii naprawy gniazd cylindrowych silników okrętowych prezentuje rysunek 9. Zawiera one klasyczne ujęcie metodologii badań diagnostycznych silników okrętowych w warunkach wdrażania nowych rozwiązań konstrukcyjnych, z takimi elementami jak symulacja defektów, analiza symptomów, czy kryteria diagnostyczne. Jednak dla szerszego spojrzenia na specyfikę podejmowanego zagadnienia badawczego konieczne jest uzupełnienie schematu o badania numeryczne wytrzymałości rozpatrywanego węzła konstrukcyjnego silnika (odkształcenia, naprężenia i przemieszczenia) np. Metodą Elementów Skończonych (MES) po zastosowaniu określonych zmian strukturalnych, jako etapu bezpośrednio poprzedzającego jego badania eksperymentalne.



Rys. 9. Schemat organizacji badań skuteczności zastosowanej technologii naprawy gniazd cylindrowych silników okrętowych

4. Uwagi i wnioski końcowe

Przedstawiona w artykule koncepcja diagnozowania gniazd zaworów cylindrowych silników okrętowych w eksploatacji wychodzi naprzeciw oczekiwaniom zakładów przeprowadzających ich naprawę według nowych, lub odpowiednio zaadaptowanych technologii. Ocena skuteczności tego rodzaju naprawy wymusza konieczność przeprowadzenia badań diagnostycznych silnika, w warunkach jego bieżącej eksploatacji, bez wyłączania z ruchu, demontażu podzespołów i ich

weryfikacji warsztatowej. Zespół diagnostycznych silników okrętowych funkcjonujący w Katedrze Siłowni Morskich i Lądowych Wydziału Oceanotechniki i Okrętownictwa Politechniki Gdańskiej od wielu lat specjalizuje się w realizacji tego rodzaju badań, również w warunkach zastosowania do zasilania silników okrętowych nowego rodzaju paliw, np. niskosiarkowych [Korczewski, 2019].

Literatura

- [1] Korczewski Z.: Endoskopia silników spalinowych. Wydawnictwo Akademii Marynarki Wojennej, Gdynia 2008.
- [2] Korczewski Z.: Diagnostyka eksploatacyjna okrętowych silników spalinowych - tłokowych i turbinowych. Wybrane zagadnienia. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2017.
- [3] Korczewski Z.: Thermal efficiency investigations on the self-ignition test engine fed with marine low sulfur fuels. *Combustion Engines*. 2019, 178(3).
- [4] Orkisz M.: Wymiana ładunku w czterosurowych silnikach tłokowych. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1991.
- [5] Piaseczny L.: Technologia naprawy okrętowych silników spalinowych. Wydawnictwo Morskie, Gdańsk 1992.
- [6] Piotrowski I., Witkowski K.: Eksploatacja okrętowych silników spalinowych. Wydawnictwo Akademii Morskiej, Gdynia 2002.
- [7] Włodarski J.K.: Tłokowe silniki spalinowe procesy trybologiczne. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1982.