

Kazimierz Witkowski

## BADANIA WPLYWU WYBRANYCH USZKODZEŃ SILNIKÓW OKRĘTOWYCH NA PARAMETRY PRACY SILNIKA I SKŁAD SPALIN

W referacie przedstawiono wyniki badań wpływu wybranych uszkodzeń okrętowych silników tłokowych na parametry pracy silnika oraz skład spalin. Silników okrętowych nie można zaliczyć do obiektów technicznych o zadawalającej niezawodności. Omówiono w referacie dane statystyczne dotyczące ich awaryjności. Na tej podstawie wytypowano do badań typowe uszkodzenia występujące w dwóch ważnych układach funkcjonalnych: wtryskowym i doładowania.

Badania przeprowadzono w warunkach laboratoryjnych, w formie eksperymentu czynnego – poszczególne uszkodzenia symulując. Obiektem badań był silnik okrętowy, czterosuwowy, średnioobrotowy firmy Sulzer. W referacie omówiono wyniki badań, zwracając uwagę nie tylko na wpływ poszczególnych uszkodzeń na zmianę wartości najważniejszych parametrów badanego silnika, ale także na zmianę składu spalin. W tym przypadku szczególnie istotna była ocena wpływu danego uszkodzenia na poziom emisji związków toksycznych.

### WSTĘP

Napęd główny statków, jak również elektrowni okrętowych w zdecydowanej większości stanowią tłokowe silniki spalinowe o zapłonie samoczynnym, doładowane turbosprężarkami. Koszty ich eksploatacji są bardzo duże, przede wszystkim z uwagi na relatywnie wysokie ceny paliw i olejów smarowych. Stąd koszty eksploatacji silników okrętowych stanowią nawet ponad 70% kosztów eksploatacji całej siłowni okrętowej i stanowią znaczący udział w kosztach eksploatacji statku [2]. Na wzrost tych kosztów może mieć wpływ bieżący stan techniczny silnika okrętowego. Spadek jego sprawności powodować będzie wzrost zużycia paliwa.

Istnieje także bezpośredni związek pomiędzy niezawodnością silników napędu głównego i elektrowni okrętowej na bezpieczeństwo żeglugi. Z uwagi na wymagania ekologiczne dotyczące ograniczenia przez statki emisji do atmosfery związków toksycznych spalin, należy także brać pod uwagę wpływ stanu technicznego silnika na skład spalin, w tym zawartość związków toksycznych.

Silniki okrętowe należą do bardzo złożonych obiektów technicznych, o wielu ważnych układach funkcjonalnych, do których należą między innymi układy: wtryskowy i doładowania. W układach tych mogą występować różnego typu usterki (uszkodzenia) wpływa-

jące na parametry pracy silnika, w tym jednostkowe zużycie paliwa i skład spalin.

W celu wykazania wpływu wybranych uszkodzeń elementów układu wtryskowego i doładowania na parametry pracy silnika okrętowego, przeprowadzono badania własne.

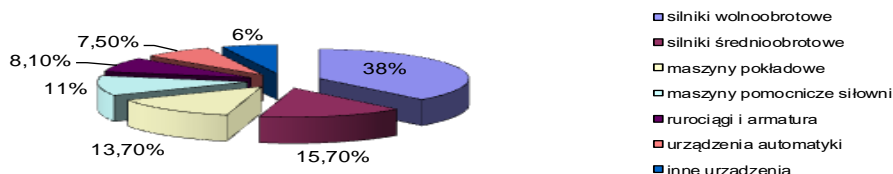
### 1. STATYSTYKA USZKODZEŃ ELEMENTÓW SILNIKÓW OKRĘTOWYCH

Z danych statystycznych [1] dotyczących najczęściej występujących na statkach uszkodzeń wynika, że dotyczą one:

1. silników wolnoobrotowych – 38,0%
2. silników średnioobrotowych – 15,7%
3. maszyn pokładowych – 13,7%
4. maszyn pomocniczych siłowni – 11,0%
5. rurociągów i armatury – 8,1%
6. urządzeń automatyki – 7,5%
7. innych urządzeń – 6,0%

co pokazano również na rysunku 1.

Z powyższych danych wynika jednoznacznie, że silniki okrętowe są najbardziej zawodnymi elementami każdego statku. Patrząc szczegółowo na ich awaryjność ustalono, że najbardziej zawodnymi



Rys.1. Statystyka uszkodzeń maszyn i urządzeń okrętowych

układami silnika są: paliwowy i wymiany czynnika roboczego. Statystyki wskazują, że blisko 50% wszystkich uszkodzeń silników okrętowych stanowią usterki układu zasilania paliwem, a w nim najczęściej występują uszkodzenia w odniesieniu do:

1. wtryskiwaczy – 41%
2. pomp wtryskowych – 38%
3. przewodów paliwowych – 12%
4. innych elementów – 9%.

Omawiane dane statystyczne pokazano także na rysunku 2.

W odniesieniu do wtryskiwaczy najczęściej uszkodzenia spowodowane są:

1. zużyciem stożka iglicy – 73%
  2. zużyciem i zakoksovaniem otworów rozpylacza – 12%
  3. utratą własności sprężyny (spadek ciśnienia otwarcia wtryskiwacza) – 4%
  4. innymi przyczynami – 11%,
- co pokazano również na rysunku 3.

Uszkodzenia pomp wtryskowych kojarzone są najczęściej z:

1. nieszczelnością zaworów zwrotnych – 42%
  2. nieszczelnością pary precyzyjnej – 24%
  3. zatarciem tłoków pomp – 18%
  4. innymi przyczynami – 16%,
- co pokazano również na rysunku 4.

W układzie wymiany czynnika roboczego najczęstszymi uszkodzeniami są zanieczyszczenia elementów tego układu (24,7% wszystkich uszkodzeń silników okrętowych). Zanieczyszczenia dotyczą następujących elementów:

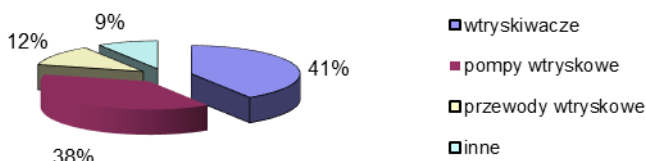
1. filtry powietrza,
2. przepływowa część sprężarki turbosprężarkowego układu doładowania,
3. chłodnica powietrza doładowującego,
4. organy wymiany czynnika roboczego,
5. przepływowa część turbiny turbosprężarkowego układu doładowania.

Z danych szczegółowych wynika, że najczęściej zanieczyszczenia występują w (rysunek.5):

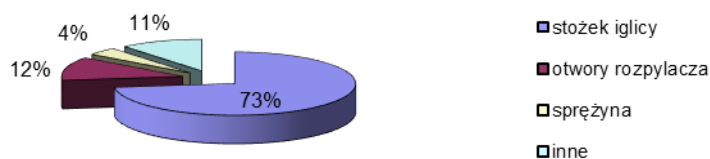
1. kanałach przepływowych sprężarki doładowującej - 56%
2. kanałach przepływowych turbiny - 22%
3. chłodnicy powietrza – 11%
4. filtrach powietrza – 6%
5. organach rozrządu czynnika roboczego - 4%
6. innych elementach – 1%.

Bazując na statystyce uszkodzeń elementów silników okrętowych, do węzłów funkcjonalnych, w których uszkodzenia występują częściej i mają wpływ na pracę silnika należą:

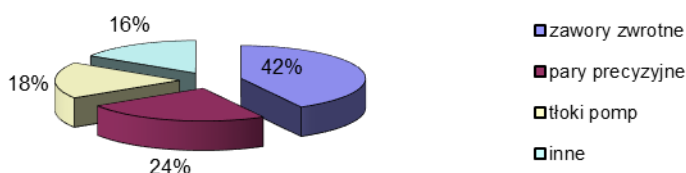
- układ zasilania paliwem, w tym pompy wtryskowe i wtryskiwacze,
- układ wymiany czynnika roboczego, w tym filtry powietrza,



Rys.2. Statystyka uszkodzeń elementów układu wtryskowego silników okrętowych



Rys.3. Statystyka uszkodzeń wtryskiwaczy silników okrętowych



Rys.4. Statystyka uszkodzeń elementów pomp wtryskowych silników okrętowych

sprężarki doładowujące, chłodnice i turbiny.

## 2. SKŁAD SPALIN OKRĘTOWYCH SILNIKÓW TŁOKOWYCH

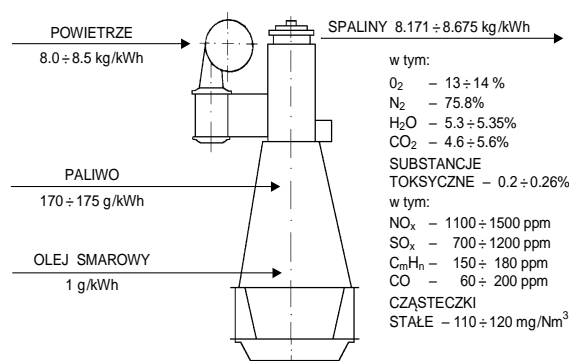
W związku z ochroną środowiska morskiego, współczesne okrętowe silniki tłokowe muszą spełniać coraz bardziej rygorystyczne wymagania dotyczące ograniczenia w spalinach zawartości toksycznych produktów spalania emitowanych do atmosfery.

W emitowanych gazach spalinowych silników okrętowych napędu głównego znajdują się między innymi azot, tlen, dwutlenek węgla i para wodna, mniejsze ilości tlenu węgla, tlenków siarki i azotu, węglowodorów i cząstek stałych.

Typowy skład spalin emitowanych przez wolnoobrotowe silniki okrętowe pokazano na rysunku 6.

Instrumenty prawne do kontroli i ograniczenia emisji tlenków azotu inicjowane są na trzech poziomach:

- międzynarodowym (IMO – International Maritime Organization),
- narodowym (np.: EPA w USA – Environmental Protection Agency),
- regionalnym (np.: CARB w USA – Kalifornia Air Resources Bard).



**Rys. 6.** Bilans substratów i produktów spalania typowego silnika okrętowego [4]

Szczegółowy raport nr 3623 z sierpnia 2000 roku, stworzony na zlecenie Komisji Europejskiej, pokazuje udział statków pływających po wodach Unii w zanieczyszczeniu środowiska. Stanowi on 1,9 miliona ton  $SO_2$  i 2,3 miliona ton  $NO_x$  rocznie, co jest odpowiednikiem emisji spalin z 390 elektrowni o mocy 50 MW każda.

Komisja europejska zleciła przeprowadzenie szeregu analiz, zarówno technicznych jak i ekonomicznych pokazujących wpływ wprowadzenia limitów nakazujących:

- stosowanie paliwa okrętowego o zawartości siarki na poziomach: 1,5%, 1,0% lub 0,5%,
- zmniejszenie emisji  $NO_x$  do poziomu: 12g / kWh, 7g / kWh lub 2g / kWh.

Wynika z nich, że efektem redukcji zawartości siarki w paliwie do poziomów: 1,5%, 1,0% oraz 0,5 % jest spadek emisji  $SO_2$  o odpowiednio 29,9%, 35,5% i 40,2%. Następstwem zaś wprowadzenia limitów emisji  $NO_x$  do wymienionych wyżej wartości jest spadek emisji  $NO_x$  odpowiednio o 11,8%; 49,3% i 86,9%. Wymaga to jednak znaczących nakładów finansowych [3].

## 3. BADANIA, ANALIZA WYNIKÓW

Obiektem badań był silnik okrętowy firmy Sulzer 3AL25/30. Jest to rzędowy, trzycylindrowy silnik czterosurowy, doładowany

turbosprężarką VTR160N. Badania wykonano w zakresie obciążeń od 50 do 75% obciążenia nominalnego. Badano wpływ wybranych uszkodzeń silnika na parametry pracy i skład spalin. W celu uzyskania wartości wzorcowych poszczególnych parametrów, stanowiących do analizy punkt odniesienia, badano w tym samym zakresie obciążeń silnik technicznie sprawny.

Na potrzeby badań, poszczególne uszkodzenia symulowano. Symulowano:

- zanieczyszczenie chłodnicy powietrza doładowującego poprzez wzrost temperatury powietrza,
- uszkodzenie końcówki wtryskiwacza – zużycie otworów wtryskowych, przez zastosowanie końcówki z otworami o większej średnicy od nominalnej (średnica nominalna wynosi 0,325 mm, zastosowano końcówkę z otworami o średnicy 0,340 mm),
- spadek ciśnienia otwarcia wtryskiwacza poprzez zmniejszenie napięcia sprężyny (z 25 MPa do 15 MPa),
- nieszczelność pompy wtryskowej poprzez upust części dawki paliwa z przestrzeni tłocznej pompy wtryskowej do jej przestrzeni przelewowej.

Symulację uszkodzeń w układzie wtryskowym realizowano na pompie wtryskowej i wtryskiwaczu cylindra drugiego.

Na skutek zanieczyszczenia chłodnicy powietrza następuje między innymi wzrost temperatury powietrza doładowującego i w konsekwencji spadek jego gęstości. Zrealizowany w badaniach wzrost tej temperatury o 15 stopni spowodował nieznaczny wzrost jednostkowego zużycia paliwa (rysunek. 10) i wzrost temperatury gazów wylotowych (rysunek. 14). Wzrosła także prędkość obrotowa wirnika turbosprężarki i ciśnienie doładowania (rysunek.11). Nie zaobserwowano istotnych zmian wartości parametrów indykowanych. Symulowane uszkodzenie chłodnicy powietrza powoduje zmiany składu spalin. O około 24% wzrosło stężenie tlenu węgla (CO) – rysunek 7, oraz wzrasta o około 6% stężenie tlenków azotu ( $NO_x$ ) – rysunek. 9. Powyższe wynika prawdopodobnie ze spadku maksymalnych temperatur lokalnych w cylindrach, szczególnie w początkowym okresie spalania (mniejsza ilość wtrysniętej dawki paliwa ulega w tym okresie samozapłonowi). Ponieważ jednocześnie zaobserwowano wzrost ciśnienia doładowania (pd) – rysunek 11, należy brać również pod uwagę wpływ tego parametru na emisję  $NO_x$ . Emisja tlenków azotu nieznacznie wzrasta (rysunek 9).

Zużycie otworów rozpylacza - wzrost ich średnicy, prowadzi do pogorszenia jakości rozpylania paliwa. Nieznacznie wzrosła wartość maksymalnego ciśnienia gazów w cylindrze (rysunek 13) oraz temperatura gazów wylotowych (rysunek.14). Spowodowało to wzrost prędkości obrotowej wirnika turbosprężarki i ciśnienia doładowania (rysunek.11). To uszkodzenie ma również wpływ na skład spalin. Przede wszystkim znacznie wzrasta emisja tlenu węgla (CO) – rysunek 7, a spada tlenków azotu ( $NO_x$ ) (rysunek 9).

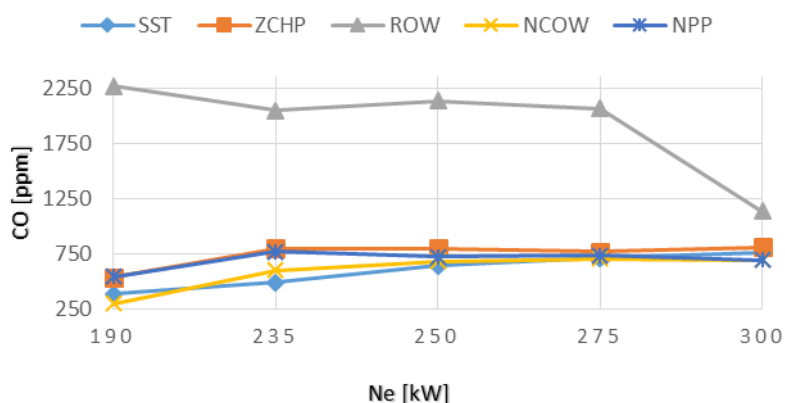
Na skutek długotrwałej eksploatacji silnika (kilka tysięcy godzin), może dojść do utraty sztywności sprężyny wtryskiwacza i w konsekwencji spadku ciśnienia otwarcia wtryskiwacza. Nie wykazano w badaniach istotnego wpływu tego uszkodzenia na rejestrowane parametry silnika, ale zauważa się spadek emisji  $NO_x$  (rysunek 9) i nieznaczny wzrost emisji dwutlenku węgla ( $CO_2$ ) – rysunek 8. Ma to prawdopodobnie związek z wydłużeniem czasu trwania wtrysku paliwa i pogorszeniem jakości jego rozpylania w początkowej fazie wtrysku – bezpośrednio po otwarciu wtryskiwacza.

W badaniach symulowano również inne typowe uszkodzenie występujące w układach wtryskowych – nieszczelność pompy wtryskowej. Zaobserwowano niższe wartości maksymalnego ciśnienia wtrysku. Na skutek nieszczelności pompy cylindra drugiego, dostarczana jest do niego mniejsza dawka paliwa na cykl. Aby utrzymać stałą prędkość obrotową silnika (750 obr/min) pozostałe

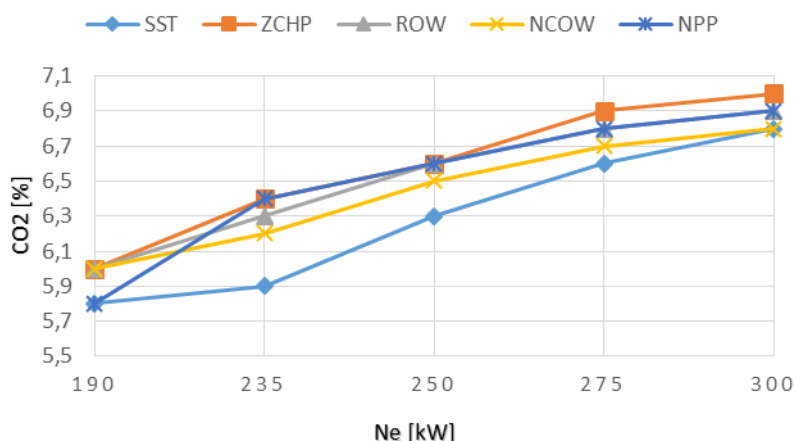
dwa cylindry są bardziej obciążone, co skutkuje wzrostem temperatury gazów za tymi cylindrami. Wzrosło również jednostkowe zużycie paliwa (ge) przez silnik (rysunek 10). Zauważa się zmiany składu spalin, w tym: nieznaczny spadek zawartości NOx – rysunek 9, wyraźny wzrost CO i CO2 (rysunek 7 i 8).

Należy podkreślić, że uszkodzenia w układzie wtryskowym zadawano na jednym cylindrze, a analiza składu spalin opiera się na pomiarach realizowanych w zbiorczym kolektorze za turbiną. Powyższe ma zapewne wpływ na korelację pomiędzy danym

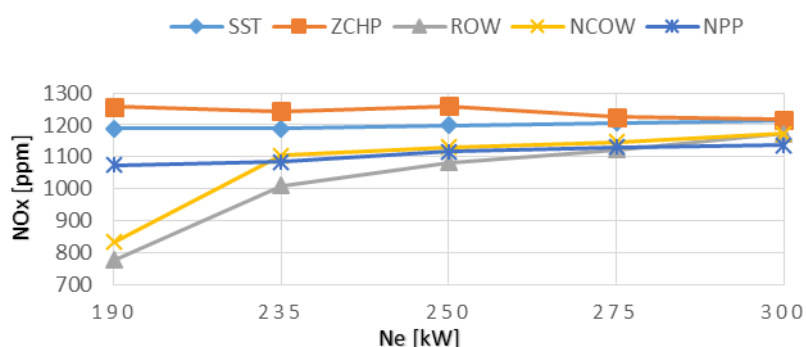
uszkodzeniem w układzie wtryskowym, a składem spalin. Prawdopodobnie rejestrowane zmiany składu spalin są mniejsze od oczekiwanych.



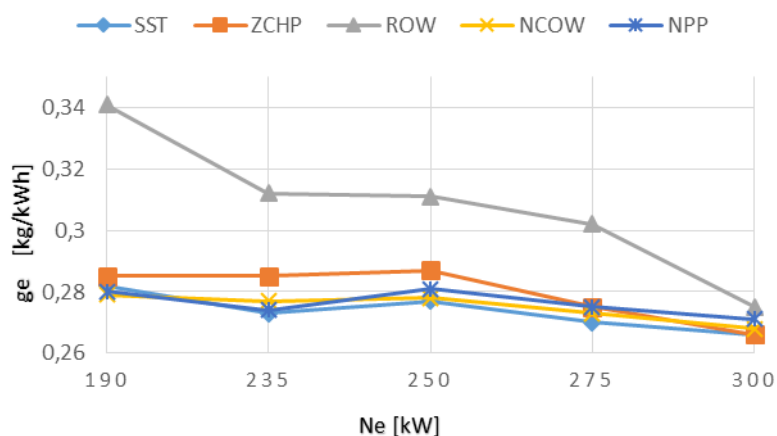
**Rys.7.** Wpływ wybranych uszkodzeń na emisję tlenku węgla (CO): SST – silnik sprawny technicznie, ZCHP – zanieczyszczona chłodnica powietrza, ROW – rozkalibrowane otwory wtryskowe, NCOW – niskie ciśnienie otwarcia wtryskiwacza, NPP – nieszczelność pary precyzyjnej pompy wtryskowej



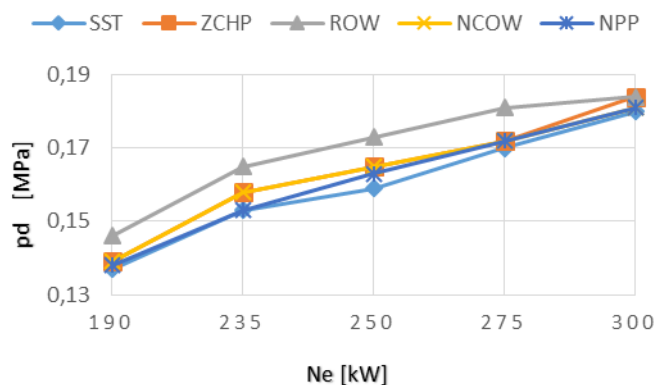
**Rys.8.** Wpływ wybranych uszkodzeń na emisję dwutlenku węgla (CO2): SST – silnik sprawny technicznie, ZCHP – zanieczyszczona chłodnica powietrza, ROW – rozkalibrowane otwory wtryskowe, NCOW – niskie ciśnienie otwarcia wtryskiwacza, NPP – nieszczelność pary precyzyjnej pompy wtryskowej



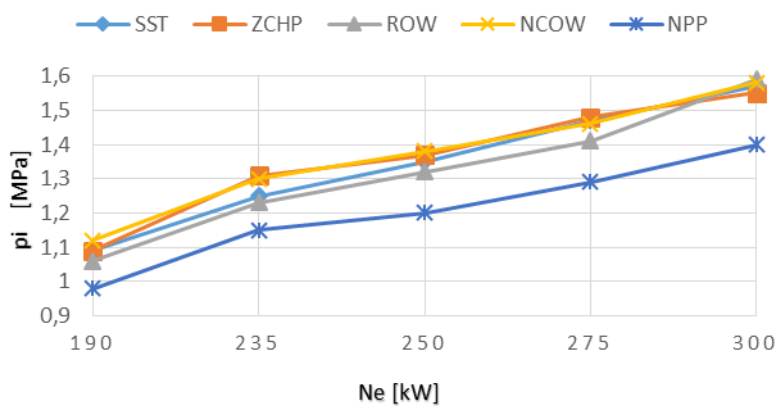
**Rys.9.** Wpływ wybranych uszkodzeń na emisję tlenków azotu (NOx): SST – silnik sprawny technicznie, ZCHP – zanieczyszczona chłodnica powietrza, ROW – rozkalibrowane otwory wtryskowe, NCOW – niskie ciśnienie otwarcia wtryskiwacza, NPP – nieszczelność pary precyzyjnej pompy wtryskowej



**Rys.10.** Wpływ wybranych uszkodzeń na jednostkowe zużycie paliwa ( $g_e$ ): SST – silnik sprawny technicznie, ZCHP – zanieczyszczona chłodnica powietrza, ROW – rozkalibrowane otwory wtryskowe, NCOW – niskie ciśnienie otwarcia wtryskiwacza, NPP – nieszczelność pary precyzyjnej pompy wtryskowej



**Rys.11.** Wpływ wybranych uszkodzeń na ciśnienie doładowania ( $p_d$ ): SST – silnik sprawny technicznie, ZCHP – zanieczyszczona chłodnica powietrza, ROW – rozkalibrowane otwory wtryskowe, NCOW – niskie ciśnienie otwarcia wtryskiwacza, NPP – nieszczelność pary precyzyjnej pompy wtryskowej



**Rys.12.** Wpływ wybranych uszkodzeń na średnie ciśnienie indykowane ( $p_i$ ): SST – silnik sprawny technicznie, ZCHP – zanieczyszczona chłodnica powietrza, ROW – rozkalibrowane otwory wtryskowe, NCOW – niskie ciśnienie otwarcia wtryskiwacza, NPP – nieszczelność pary precyzyjnej pompy wtryskowej

## WNIOSKI

Badania wykazały, że dbałość o stan techniczny silnika ma istotny wpływ nie tylko na parametry pracy silnika, ale także skład spalin. Może dochodzić do wzrostu w spalinach stężenia związków toksycznych. Ma to więc istotne znaczenie nie tylko z uwagi na sprawność silnika, ale także na aspekt ekologiczny.

Wykazano, że na zmianę składu spalin ma istotny wpływ zanieczyszczenie chłodnicy powietrza, oraz zużycie otworów wtryskowych końcówki wtryskiwacza.

Wykonywanie okresowo odpowiednich czynności obsługowych pozwoli na znaczące minimalizowanie negatywnych skutków zmiany stanu technicznego elementów układu doładowania i układu wtryskowego.

Należy również zauważyć, że wykrywanie poszczególnych uszkodzeń na wczesnym etapie ich występowania może pozwolić na uniknięcie awarii. Dlatego też coraz większą uwagę zwraca się na stwarzanie w silowniach okrętowych warunków do prowadzenia czynności diagnostycznych.

### Streszczenie

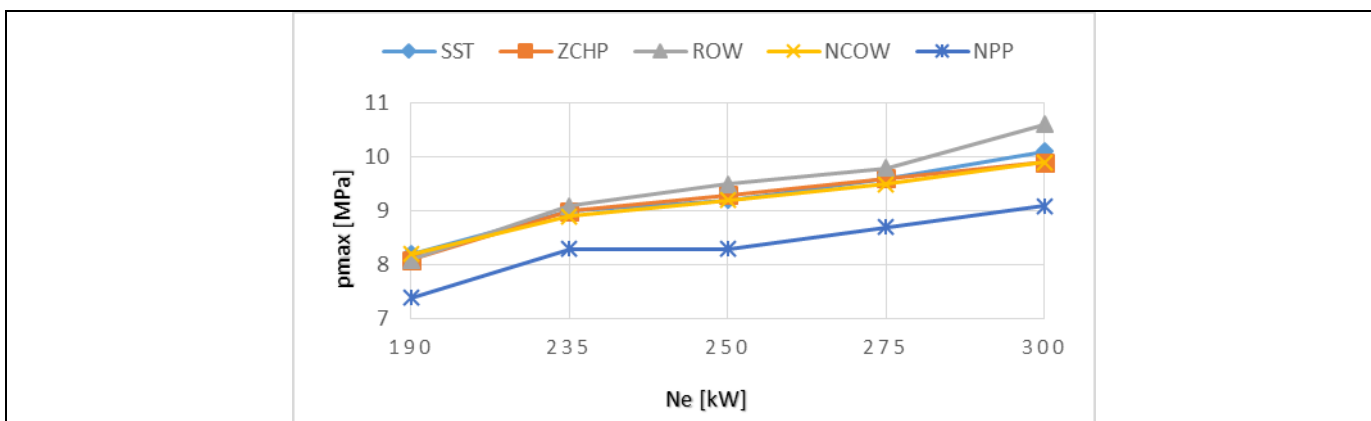
W referacie przedstawiono wyniki badań wpływu wybranych uszkodzeń okrętowych silników tłokowych na parametry pracy silnika oraz skład spalin. Silników okrętowych nie można zaliczyć do obiektów technicznych o zadawalającej niezawodności. Omówiono w referacie dane statystyczne dotyczące ich awaryjności. Na

tej podstawie wytypowano do badań typowe uszkodzenia występujące w dwóch ważnych układach funkcjonalnych: wtryskowym i doładowania.

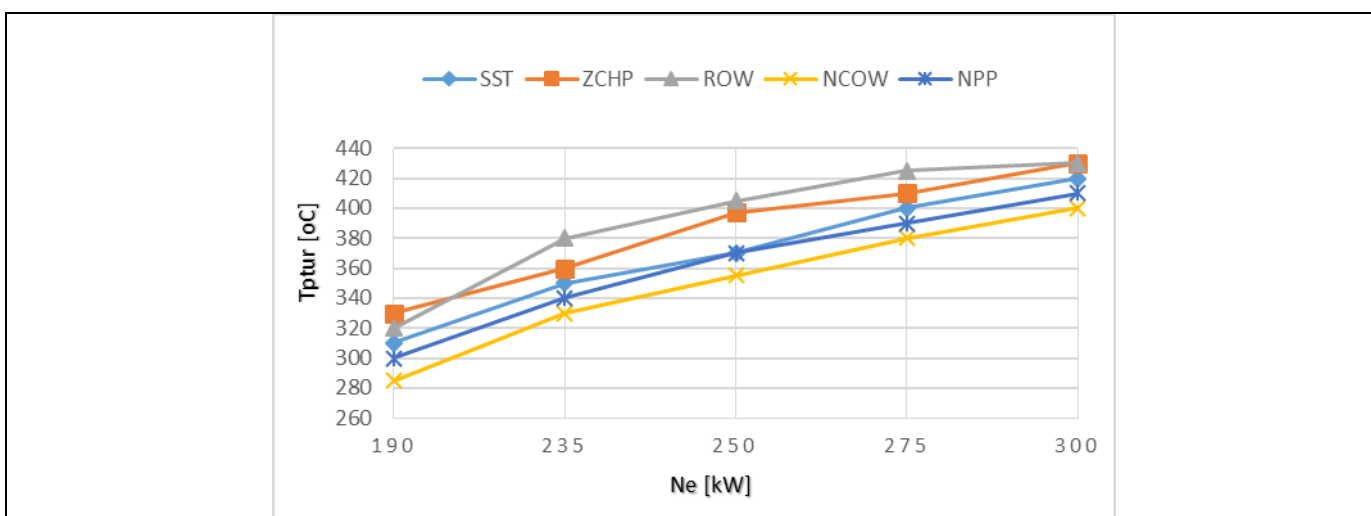
Badania przeprowadzono w warunkach laboratoryjnych, w formie eksperymentu czynnego – poszczególne uszkodzenia symulując. Obiektem badań był silnik okrętowy, czterosuwowy, średnioobrotowy firmy Sulzer. W referacie omówiono wyniki badań, zwracając uwagę nie tylko na wpływ poszczególnych uszkodzeń na zmianę wartości najważniejszych parametrów badanego silnika, ale także na zmianę składu spalin. W tym przypadku szczególnie istotna była ocena wpływu danego uszkodzenia na poziom emisji związków toksycznych.

## BIBLIOGRAFIA

1. Piaseczny L., Ocena niezawodności okrętowych silników spalinyowych w aspekcie tworzenia ich systemów diagnostycznych i obsługowych. Materiały Konferencji Naukowo-Technicznej, ITEO AMW, Gdynia 1992.78
2. Witkowski K., Stan diagnostyki okrętowych silników spalinyowych. Diagnostyka. vol.34, 2005 r., str. 85-92.
3. Final Report for European Commission. Foundation for International Environmental Law and Development, February 2000.



**Rys.13.** Wpływ wybranych uszkodzeń na maksymalne ciśnienie w cylindrze ( $p_{max}$ ): SST – silnik sprawny technicznie, ZCHP – zanieczyszczona chłodnica powietrza, ROW – rozkalibrowane otwory wtryskowe, NCOW – niskie ciśnienie otwarcia wtryskiwacza, NPP – nie szczelność pary precyzyjnej pompy wtryskowej



**Rys.14.** Wpływ wybranych uszkodzeń na temperaturę spalin przed turbiną ( $T_{ptur}$ ): SST – silnik sprawny technicznie, ZCHP – zanieczyszczona chłodnica powietrza, ROW – rozkalibrowane otwory wtryskowe, NCOW – niskie ciśnienie otwarcia wtryskiwacza, NPP – nie szczelność pary precyzyjnej pompy wtryskowej

Abstract

## Research of the impact of damage to marine diesel engines on selected operating parameters and exhaust gas composition.

*The paper presents the results of research on the impact of selected marine diesel engine damage to the operating parameters of the engine and the exhaust gas. Marine engines can hardly be called technical objects of satisfactory reliability. Statistical information's on their failure were discussed in this paper. On this basis typical damages primarily occurring in two major functional systems: injection and turbocharger, were selected to the research.*

*The research was conducted in laboratory conditions, in the form of active experiment – simulating the particular damage. The object of the study was the ship's engine, for stroke, medium speed, Sulzer. The paper presents results of the research, paying attention not only to the impact of individual damages to change the most important parameters of the test engine, but also to change the composition of the exhaust gases. In this case particularly it was important to assess the effect of the damage on the level of toxic compounds emission.*

Autorzy:

dr hab. Inż. **Kazimierz WITKOWSKI** - Akademia Morska w Gdyni,  
Wydział Mechaniczny, Katedra Siłowni Okrętowych