

## STRATY MECHANICZNE SILNIKA A LEPKOŚĆ OLEJU SMAROWEGO W ASPEKCIE DIAGNOSTYKI OKRĘTOWEGO TŁOKOWEGO SILNIKA SPALINOWEGO

Leszek WONTKA

Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Okrętów, Akademia Marynarki Wojennej,  
ul. Inż. Śmidowicza 69, 81-103 Gdynia, tel: 058 626 27 58, email: [wontka@wp.pl](mailto:wontka@wp.pl)

### Streszczenie

W artykule omówiono możliwości wykorzystania wyników pomiarów ciśnień indykowanych do wyznaczania średniego ciśnienia indykowanego silników tłokowych. Traktując tłokowy silnik spalinowy jako uogólniony węzeł tarcia, straty mechaniczne silnika odzwierciedlają jego stan techniczny. Wyznaczenie średniego ciśnienia indykowanego silnika na biegu jałowym będącego w istocie średnim ciśnieniem strat mechanicznych pozwala sformułować diagnozę o stanie technicznym układu tłok – pierścienie tłokowe – tuleja cylindrowa oraz o łożyskowaniu silnika. Jednak, aby diagnoza była wiarygodna konieczne jest przedstawienie średniego ciśnienia strat mechanicznych jako funkcji lepkości oleju smarowego. Zaprezentowano także wyniki badań diagnostycznych wybranych silników okrętowych eksploatowanych na okrętach Marynarki Wojennej RP.

Słowa kluczowe: tłokowy silnik okrętowy, średnie ciśnienie indykowane, straty mechaniczne.

### ENGINE MECHANICAL LOSSES VERSUS LUBRICATING OIL VISCOSITY AS AN ASPECT OF MARINE RIC ENGINE DIAGNOSIS

### Summary

Possibilities of indicated pressure measurements using to asses mean indicated pressure of RIC engines has been presented in this paper. Looking at the RIC engine as a generalized friction centre, we could say that mechanical losses may be used as a tool to asses its technical condition. Mean indicated pressure on idle speed is as a fact equal to mean pressure of a mechanical losses and it is enough to make diagnosis about technical state of the engine cylinder-piston groups and bearings. But to make the diagnosis more accurate it is necessary to analyze mean pressure of mechanical losses as a function of lubricating oil viscosity. Some results taken from measurements made on Polish Navy ships are also presented in the paper.

Keywords: marine diesel engine, mean indicated pressure, mechanical losses.

### 1. OKREŚLENIE I MIARY STRAT MECHANICZNYCH TŁOKOWEGO SILNIKA SPALINOWEGO

W technice pod pojęciem strat mechanicznych rozumie się straty energii maszyny na pokonanie własnych oporów ruchu. W szczególności, straty mechaniczne tłokowego silnika spalinowego określa się jako straty energii wytworzonej w komorze spalania zużytej na pokonanie oporów własnych silnika [13]. Określenie „straty mechaniczne” ma swoje źródło w wewnętrznym bilansie cieplnym silnika, gdzie energia „stracona” na pokonanie oporów własnych silnika występuje obok innych strat energii np. strat chłodzenia, czy też strat wylotowych, chociaż „de facto” jest ich składową [13]. W nieco starszych publikacjach, np. w [7] nie występuje określenie „straty mechaniczne”, ale po prostu „opory ruchu”, to jednak obecnie pojęcie „straty mechaniczne” lub w języku angielskim „mechanical losses” przyjęło się na dobre i jest powszechnie używane przez uznane autorytety

z dziedziny tłokowych silników spalinowych [2, 8, 12].

Straty mechaniczne można przedstawić za pomocą następującej reguły:

$$Q_m = L_i - L_e \quad (1)$$

gdzie:  $Q_m$  – ciepło równoważne stratom mechanicznym silnika,  $L_i$  – praca indykowana w czasie jednego obiegu silnika,  $L_e$  – praca użyteczna w czasie jednego obiegu silnika.

Ponieważ wartość  $Q_m$  ma wymiar energii, nienajlepiej nadaje się do porównywania strat mechanicznych silników o różnych wielkościach i konstrukcjach. Aby umożliwić to porównywanie przyjmuje się jako bezwymiarową miarę strat mechanicznych, sprawność mechaniczną, wyrażoną następującą formułą:

$$\eta_m = \frac{L_e}{L_i} \quad (2)$$

gdzie:  $\eta_m$  – sprawność mechaniczna silnika,  $L_i$  – praca indykowana w czasie jednego obiegu silnika,

$L_e$  – praca użyteczna w czasie jednego obiegu silnika.

Sprawność mechaniczna określa zatem liczbowo względną stratę energii na pokonanie oporów własnych silnika. Wartość sprawności mechanicznej waha się od 0,70 do 0,91 dla silnika pracującego w warunkach obciążenia znamionowego [13]. Pomimo, że sprawność mechaniczna doskonale nadaje się do porównywania strat mechanicznych różnych typów silników, to należy pamiętać, że każde odstępstwo od warunków obciążenia nominalnego silnika powoduje zmianę wartości sprawności mechanicznej. W skrajnym przypadku, gdy silnik pracuje na biegu jałowym<sup>1</sup>, zachodzi warunek:

$$L_e = 0 \Rightarrow \eta_m = 0 \quad (3)$$

Z tego powodu do określania strat mechanicznych konkretnego silnika wygodniej jest posługiwać się bezwzględnymi miarami strat. Będzie to np. średnie ciśnienie start mechanicznych  $p_m$ , jako różnica średniego ciśnienia indykowanego  $p_i$  i średniego ciśnienia użytecznego  $p_e$ :

$$P_m = P_i - P_e \quad (4)$$

lub analogicznie moc strat mechanicznych  $P_m$  jako różnica mocy indykowanej  $P_i$  i mocy użytecznej  $P_e$ :

$$P_m = P_i - P_e \quad (5)$$

## 2. ŹRÓDŁA STRAT MECHANICZNYCH TŁOKOWEGO SILNIKA SPALINOWEGO

Wyróżnić można kilka grup czynników będącymi źródłami strat mechanicznych. W zależności od celu podziału oraz stopnia uszczegółowienia, literatura różnie klasyfikuje źródła występowania strat mechanicznych.

Najczęściej podział strat mechanicznych przedstawia się następująco [12, 13]:

- Straty tarcia (t):
  - w układzie trybologicznym tłok–pierścienie tłokowe–tuleja cylindrowa (TPC),
  - w łożyskach głównych, łożyskach korbowych, łożyskach sworznia tłokowego oraz w łożyskach turbosprężarki (Ł),
- Straty na napęd mechanizmów podwieszonych i rozrząd silnika (Z).
- Straty wentylacji (W) obejmujące oddziaływane otoczenia na ruchome części silnika. Wówczas:

$$p_m = p_{TPC} + p_L + p_W + p_Z = p_i + p_W + p_Z \quad (6)$$

gdzie:  $p_i = p_{TPC} + p_L$  – średnie ciśnienie strat tarcia,  $p_{TPC}$  – średnie ciśnienie tracone na pokonanie oporów tarcia w układzie tłok–pierścienie tłokowe–tuleja cylindrowa (TPC) – 50–75%,  $p_L$  – średnie ciśnienie tracone na pokonanie oporów tarcia łożyskowania silnika – 15–25%,  $p_W + p_Z$  – średnie ciśnienie tracone na pokonanie oporów wentylacyjnych oraz na pokonanie oporów tarcia mechanizmów podwieszonych oraz rozrządu silnika – 5–15%.

Procentowy rozkład strat mechanicznych poszczególnych podzespołów silnika zależy przede wszystkim od konstrukcji silnika.

## 3. TŁOKOWY SILNIK SPALINOWY JAKO UOGÓLNIONY WĘZEŁ TARCIA

Średnie ciśnienie strat mechanicznych silnika jest funkcją wielu zmiennych:

$$p_m = f(n, T, \beta, t_o, t_w, k) \quad (7)$$

gdzie:  $n$  – prędkość obrotowa silnika,  $T$  – moment obrotowy silnika,  $\beta$  – właściwości fizykochemiczne olejów smarowych, w tym lepkość i smarność,  $t_o$  – temperatura oleju smarowego,  $t_w$  – temperatura wody chłodzącej,  $k$  – parametry struktury konstrukcyjnej układu TPC, łożyskowania oraz mechanizmów zasprzęglonych i rozrządu silnika.

Jednym z decydujących czynników wpływającym na wielkość strat mechanicznych są właściwości fizykochemiczne oleju smarowego, w tym jego lepkość dynamiczna.

Do przedstawienia jej wpływu na wielkość strat mechanicznych silnika tłokowego dość dobrze nadaje się model przedstawiony w pracy [1]. Potraktowano w niej tłokowy silnik spalinowy jako uogólniony węzeł tarcia i zastosowano następujące założenia upraszczające:

- tarcie w układzie tłokowo–cylindrowym poza punktami zwrotnymi tłoka jest tarcie płynnym jak przy smarowaniu hydrodynamicznym, występuje tu zatem analogiczne oddziaływanie jak przy smarowaniu i tarcie w łożyskach hydrodynamicznych;
- dla stałego obciążenia silnika współczynnik tarcia  $\mu$  a co za tym idzie średnie ciśnienie strat tarcia  $p_t$  będzie proporcjonalne do lepkości kinematycznej  $\nu$  oleju smarowego w punkcie tarcia:

$$p_t = k\nu^m \quad (8)$$

gdzie:  $k$  – stała proporcjonalności zależna od obciążenia silnika i jego prędkości obrotowej,  $m$  – wykładnik potęgowy uwzględniający zmiany przebiegu lepkości kinematycznej w łożysku obciążonym dynamicznie w stosunku do zmiany lepkości kinematycznej w stacjonarnie obciążonym łożysku.

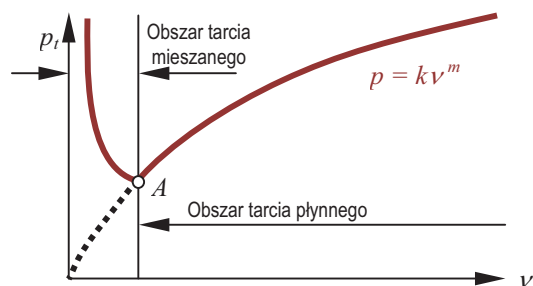
W efekcie pozwoli to na zastosowanie krzywej Stribeck, która w pierwowzorze odzwierciedlała zmiany współczynnika tarcia  $\mu$  w funkcji parametru

<sup>1</sup> W tym miejscu celowe jest wyjaśnienie użytego w artykule pojęcia biegu jałowego tłokowego silnika spalinowego. Ogólna definicja biegu jałowego maszyny określa działanie maszyny bez wytwarzania pracy użytecznej. Ponieważ tłokowy silnik spalinowy służy do zamiany energii cieplnej pochodzącej ze spalnego paliwa na energię mechaniczną, będącą niczym innym jak pracą użyteczną, to bieg jałowy tłokowego silnika spalinowego jest działaniem silnika bez wytwarzania tejże pracy użytecznej i nie zależy od prędkości obrotowej wału korbowego silnika. Definicja ta stoi w sprzeczności z określeniami biegu jałowego w opracowaniach niektórych autorów utożsamiających bieg jałowy z minimalną prędkością obrotową. W przytoczonej definicji istotne jest tylko to, że silnik nie przekazuje momentu obrotowego.

Herseya  $\lambda$  [6] dla łożysk ślizgowych do przedstawienia strat tarcia całego silnika (rys. 1).

Możemy wówczas przedstawić zależność średniego ciśnienia strat tarcia  $p_t$  od lepkości kinematycznej oleju smarowego. Na rys. 1 przedstawiono przebieg krzywej Stribeck dla całego silnika w układzie współrzędnych średnie ciśnienie strat tarcia  $p_t$  – lepkość kinematyczna  $\nu$ . Dla pełnego zobrazowania trybologicznego silnika należałoby przedstawić osobną krzywą dla każdej pary trącej tzn. uwzględnić liczbę cylindrów, jak również liczbę oraz rodzaj łożysk. Wyznaczenie jej w przypadku silnika wielocylindrowego jest dość trudne, a w przypadku silników okrętowych wręcz niemożliwe.

Ponieważ jednak układ smarowania jest w przeważającej liczbie silników wspólny dla wszystkich elementów trących, a wartość lepkości granicznej tarcia mieszanego dla układu tłok–pierścienie tłokowe–tuleja cylindrowa jest zazwyczaj mniejsza niż dla łożysk silnika, dlatego w tym przypadku o granicy obszaru tarcia płynnego w sumarycznych stratach tarcia decyduje graniczna lepkość dla łożysk silnika.



Rys. 1 Krzywa Stribeck przedstawiająca średnie ciśnienie strat tarcia jako funkcję lepkości oleju smarowego silnika:  $p_t$  – średnie ciśnienie strat tarcia silnika,  $\nu$  – lepkość kinematyczna oleju smarowego,  $k$  – stała proporcjonalności zależna od obciążenia silnika i jego prędkości obrotowej,  $m$  – wykładnik potęgowy uwzględniający zmiany przebiegu lepkości kinematycznej w stosunku do stacjonarnie obciążonego łożyska

Należy dodatkowo zaznaczyć, że nie rozpatrujemy tutaj osobno strat spowodowanych oporami wentylacyjnymi oraz strat na pokonanie oporów tarcia mechanizmów podwieszonych i rozrządu silnika. Jednakże suma oporów tarcia w układzie tłok–pierścienie tłokowe–tuleja cylindrowa i oporów tarcia łożyskowania silnika jest dominująca i stanowi aż 85–95% strat mechanicznych silnika.

#### 4. METODYKA WYZNACZANIA STRAT MECHANICZNYCH

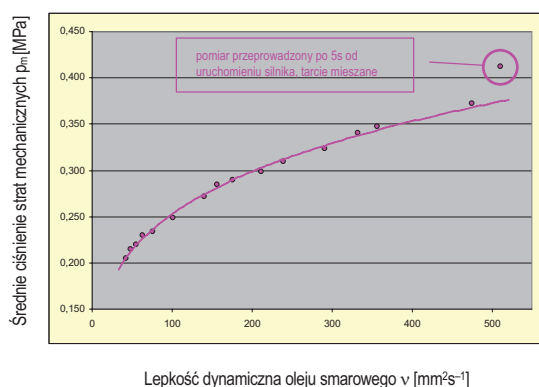
Od 1992 roku w Instytucie Technicznej Eksploatacji Okrętów – obecnie Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Okrętów (IKEO) – Akademii

Marynarki Wojennej przeprowadza się cykliczne badania diagnostyczne tłokowych silników spalinowych eksploatowanych na okrętach Marynarki Wojennej RP. Polegają one m.in. na analizie przebiegów ciśnień wewnątrz cylindrów poszczególnych cylindrów silnika, w tym na wyznaczaniu na ich podstawie średniego ciśnienia indykowanego dla oceny strat mechanicznych silnika, strat mechanicznych linii wałów i strat tarcia śruby napędowej oraz oceny równości obciążeń silników w siłowniach wielowalowych [5, 10].

Od 1997 roku oprócz rutynowego indykowania silników na obciążeniu nominalnym, w celu określenia strat mechanicznych silników, wykorzystywanych do oceny stanu technicznego układu tłok–pierścienie tłokowe–tuleja cylindrowa oraz łożyskowania silnika indykuje się silniki również na biegu jałowym, (oczywiście tam, gdzie jest możliwe rozsprężlenie silnika). Pomimo, że wartości średniego ciśnienia strat mechanicznych  $p_m$  rosną wraz z obciążeniem, to proponowana metoda jej wyznaczenia z pomiarów średniego ciśnienia tarcia na biegu jałowym, minimalizuje błędy wyznaczania  $p_m$  [3, 9], przez zastosowanie tylko jednej metody pomiaru. Ponieważ na biegu jałowym średnie ciśnienie użyteczne  $p_e$  przyjmuje wartość zero, wówczas równanie (4) przyjmie postać:

$$p_m = p_i \quad (9)$$

W celu weryfikacji modelu (8) przeprowadzono w IKEO szereg badań na dwucylindrowym silniku laboratoryjnym S312C o mocy nominalnej 22,4 kW. Badania polegały na indykowaniu silnika pracującego na biegu jałowym przy różnych prędkościach obrotowych podczas podgrzewania i rejestrowaniu temperatury oleju smarowego w silniku. Po wyznaczeniu lepkości oleju dla poszczególnych temperatur dokonano aproksymacji punktów pomiarowych korzystając z zależności (8). Przykładową zależność dla prędkości 1140  $\text{min}^{-1}$  przedstawia rys. 2.



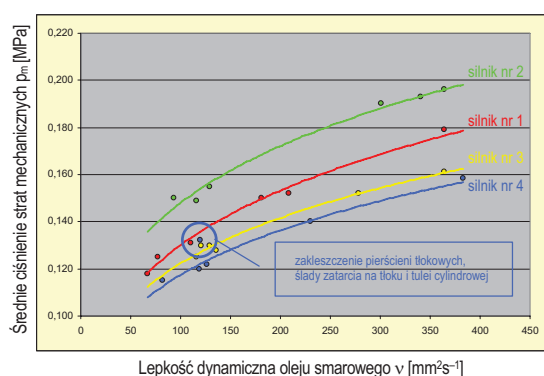
Rys. 2. Średnie ciśnienie strat mechanicznych jako funkcja lepkości oleju smarowego silnika S312C

Od krzywej aproksymującej wyraźnie odstaje pierwszy punkt pomiarowy wyróżniony na rysunku 2 okręgiem. Spowodowane jest to tym, że pomiar

rozpoczęto natychmiast po uruchomieniu silnika i ustaleniu się prędkości obrotowej silnika. Układy trybologiczne silnika znajdowały się jeszcze w obszarze tarcia mieszanego, ponieważ silnik nie posiada pompy wstępnego smarowania, a olej smarowy nie dotarł jeszcze w odpowiedniej ilości do wszystkich węzłów tarcia.

## 5. BADANIA SILNIKÓW W EKSPLOATACJI

W latach 2001–2007 m.in. sześciokrotnie badano cztery silniki główne na jednym z okrętów Marynarki Wojennej RP. Są to szesnastocylindrowe czterosurowe silniki SULZER typu 16ASV25/30 o mocy nominalnej 3200 kW każdy. Dla każdego z nich wyznaczano między innymi średnie ciśnienie strat mechanicznych  $p_m$ . Wszystkie silniki indykowano na biegu jałowym przy prędkości od 435 do 451  $\text{min}^{-1}$ . W czasie pomiarów temperatura oleju smarowego silników była różna i wahała się od 20 do 55°C. Z tego względu wartości średniego ciśnienia strat mechanicznych  $p_m$  osiągały bardzo różne wartości i bez dodatkowych uwarunkowań nie może być uznane jako parametr diagnostyczny. Aby przedstawić wartości średniego ciśnienia strat mechanicznych  $p_m$  analogicznie jak przypadku silnika laboratoryjnego S312C (rys. 2), przeanalizowano analizy oleju smarowego wszystkich czterech silników oraz wyznaczono na ich podstawie lepkości kinematycznych dla temperatur, przy których indykowano silniki w poszczególnych latach. Ze względu na dość dużą rozbieżność średniego ciśnienia strat mechanicznych poszczególnych silników, dokonano aproksymacji wg zależności (8) dla każdego silnika oddzielnie. Wartości współczynników z tej zależności  $m$  są bardzo zbliżone i wahają się w granicach 0,217–0,236, natomiast współczynniki  $k$  oscylują w granicach 0,43–0,54. Najwyższą wartość  $k$  posiada silnik nr 2. Uzyskane wyniki przedstawia rys. 3.



Rys. 3. Średnie ciśnienie strat mechanicznych jako funkcja lepkości oleju smarowego silników 16ASV25/30

Od krzywej aproksymującej wyraźnie odstaje jeden z punktów pomiarowych silnika nr 4 wyróżniony na rysunku 3 okręgiem. Spowodowane jest to tym, że w czasie badań diagnostycznych

w 2001 roku wykryto poważną usterkę w pracy tego silnika. Na jednym z cylindrów wartość ciśnienia sprężania była niższa o 5,5% od wartości średniej z pozostałych cylindrów silnika. Podejrzewano zakleszczenie pierścieni tego cylindra lub wypalone gniazda zaworowe zaworów dolotowych, gdyż nie zarejestrowano wzrostu temperatury spalin z tego cylindra, charakterystycznego dla przypadku wypalenia gniazd zaworowych zaworów wylotowych. W wyniku weryfikacji stwierdzono całkowite zakleszczenie dwóch górnych tłokowych pierścieni uszczelniających tego cylindra, częściowe zakleszczenie pozostałych pierścieni oraz ślady zatarcia na tłoku i tulei cylindrowej. W tym przypadku granica tarcia mieszanego została na pewno przekroczona, co jednoznacznie obrazuje rys. 3.

## 6. WNIOSKI

Przedstawione wyniki badań skłaniają do przedstawienia następujących wniosków:

- Średnie ciśnienie indykowane biegu jałowego silnika jest wrażliwym parametrem diagnostycznym silnika. Nie lokalizuje ono jednak jednoznacznie źródeł występowania zawyżonych strat mechanicznych, a jedynie sygnalizuje możliwość ich występowania
- Na przykładzie silnika nr 2 można stwierdzić, że wartość średniego ciśnienia strat mechanicznych zależy, oprócz własności fizykochemicznych oleju smarowego, w dużym stopniu od parametrów struktury silnika i jest również „indywidualną cechą” każdego egzemplarza silnika. Silnik nr 2 cechuje się najwyższą wartością współczynnika  $k$ , a tym samym dla każdej lepkości kinematycznej oleju smarowego wartość średniego ciśnienia strat mechanicznych jest najwyższa.
- W celu zwiększenia wiarygodności stawianej diagnozy kluczowym zagadnieniem staje się wyznaczanie lepkości oleju smarowego w czasie badania każdego silnika.

## LITERATURA

- [1] Drozd W.: *Metodyka wyznaczania minimalnej dopuszczalnej lepkości oleju w silnikach spalinowych*. Praca doktorska, Poznań 1985
- [2] Heywood J. B.: *Internal Combustion Engine Fundamentals*, McGraw-Hill Book Company. Series in Mechanical Engineering, 1988.
- [3] Łutowicz M.: *Badanie błędów pomiaru średniego ciśnienia indykowanego silnika okrętowego*, Zeszyty Naukowe AMW 2/2002.
- [4] Korczewski Z., Wontka L.: *Stanowisko do badań diagnostycznych układu łożyskowania tłokowego silnika spalinowego*. EXPLO-SHIP Świnoujście-Kopenhaga 2004

- [5] Korczewski Z., Wontka L.: *Badania strat mechanicznych tłokowego silnika spalinowego*. Zeszyty Naukowe AMW, Gdynia 2005
- [6] Kozłowiecki H.: *Łożyska tłokowych silników spalinowych*, WKiŁ, Warszawa 1982.
- [7] Niewiarowski K.: *Tłokowe silniki spalinowe*, WKiŁ, Warszawa 1983
- [8] Piotrowski I.: *Okrętowe silniki spalinowe*, wydawnictwo Morskie, Gdańsk 1983
- [9] Polanowski S.: *Błędy pomiaru średniego ciśnienia indykowanego metodami cyfrowymi silników okrętowych w warunkach eksploatacji*, Konferencja Naukowo-Techniczna „Explo-Diesel '98”, Szczecin 1998.
- [10] Polanowski S., Wontka L.: *Niektóre możliwości oceny obciążenia tłokowych silników okrętowych i strat w układzie napędowym drogą pomiaru mocy indykowanej*, Materiały XXI Sympozjum Siłowni Okrętowej SymSO'2000.
- [11] Sprawozdanie z pracy naukowo-badawczej pt.: *Badania wpływu czynników eksploatacyjnych na osiągi i sprawności zespołów napędowych okrętów*, Akademia Marynarki Wojennej, Gdynia 2003.
- [12] Wajand J. A.: *Silniki o zapłonie samoczynnym*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1988.
- [13] Wanszeidt W. A.: *Sudowyje dwigatieli wnutriennogo sgoranija, Sudostrojenije*, Leningrad 1977



---

mgr inż. **Leszek WONTKA** starszy wykładowca w Instytucie Konstrukcji i Eksploatacji Okrętów Akademii Marynarki Wojennej