

## Analiza i ocena smarności olejów w ujęciu energetycznym i działania układu tribologicznego

### Analysis and evaluation of oil lubricity from the viewpoint of energy aspects and of the tribological system action

Piotr Bzura

Politechnika Gdańska, Wydział Oceanotechniki i Okrętownictwa, Katedra Siłowni Okrętowych  
80-952 Gdańsk, ul. G. Narutowicza 11/12, pbzura@pg.gda.pl

**Słowa kluczowe:** działanie, warstwa graniczna, węzeł tarcia

#### Abstrakt

W artykule przedstawiono na podstawie wyników pomiarów interpretację działania warstwy granicznej układów tribologicznych w formie węzła tarcia maszyny czterokulowej. Dokonano oceny działania warstwy granicznej, rozumianej jako przenoszenie przez nią energii  $E_p$ , wynikającej z obciążenia układu tribologicznego w określonym czasie  $t$ , w formie pracy  $l_p$ , która może doprowadzić do przzerwania tej warstwy. Energia ta oraz czas są wielkościami jednoznacznie charakteryzującymi działanie warstwy granicznej. Działanie warstwy w przedstawionej wersji ma także tę zaletę, że może być badane przez wykonanie precyzyjnych pomiarów, a następnie wyrażone w formie liczby. Do oceny procesu pogarszania się działania tej warstwy zaproponowano zatem przeprowadzenie badań emisji akustycznej.

**Key words:** action, boundary layer, friction node

#### Abstract

Based on measurement results, an interpretation is presented of the tribological system boundary layer action in the form of a four-ball tester friction node. The evaluation was performed of the boundary layer action understood as transfer of energy  $E_p$ , resulting from loading the tribological system in a determined time  $t$  with work  $l_p$ , which may lead to breaking the boundary layer. That energy and time are the values unequivocally characterising the boundary layer action. This form of presenting the boundary layer action has also an advantage of offering a possibility of investigating it by carrying out precise measurements and expressing the results in a numerical form. Therefore, the proposed method of evaluating the boundary layer action deterioration process is the acoustic emission measurements.

## Wstęp

Zapewnienie bezpiecznego ruchu statku morskiego wymaga dysponowania odpowiednią ilością energii, którą uzyskuje się z energii chemicznej zawartej w paliwie spalonym w silnikach o ZS. Energia ta, za pośrednictwem wielu układów tribologicznych, musi być dostarczana do różnych odbiorników, np. do śruby napędowej. Dochodzi wówczas w układach tribologicznych do przekształcania i przenoszenia energii w czasie wykonywania tych zadań. Można więc rozpatrywać działanie układów tribologicznych, jako skojarzeń

energetycznych do przenoszenia energii w określonym czasie. Działanie jest więc takim stanem energetycznym układu tribologicznego, w którym zachodzi transformacja i przenoszenie energii [1].

W układach tribologicznych działanie może być analizowane podczas rozpatrywania pracy tarcia. W technice najistotniejszy jest podział na tarcie: suche, graniczne i płynne. Układ tribologiczny charakteryzujący się dużą smarnością zapobiega powstaniu tarcia suchego w wyniku wytworzenia warstwy granicznej i niedopuszczenia do jej zniszczenia.

W pracy na podstawie wyników badań przeprowadzona została pilotażowa analiza działania warstwy granicznej układu tribologicznego w węźle tarcia maszyny czterokulowej.

### Działanie warstwy granicznej w węźle tarcia maszyny czterokulowej

Wskutek dużego nacisku jednostkowego olej smarowy jest wyciskany z przestrzeni między trącymi powierzchniami układu tribologicznego. Tarcie występujące wówczas nazywamy tarcie granicznym. Smarność jest właściwością substancji smarującej charakteryzującą jej zachowanie w warunkach tarcia granicznego. Określa ona zdolność do wytworzenia trwałej warstwy granicznej na skutek sorpcji fizycznej lub chemicznej (tzn. gdy cząstki polarne wchodzą w związki chemiczne z metalem, z którym się stykają). Oznacza to, że smarność zależy nie tylko od struktury oleju smarowego, lecz także od własności współpracujących powierzchni smarowanych danego układu tribologicznego.

W określonej temperaturze skłonności sorpcyjne (zdolność do tworzenia warstwy granicznej) większości substancji zawartych w oleju (kwasów tłuszczowych) zbliżają się do zera. Następuje zjawisko desorpcji – warstwa graniczna zostaje zlikwidowana, co powoduje nawrót do tarcia zewnętrznego, suchego. Trwałość warstwy granicznej można zatem określić w czasie jej niszczenia, np. przez pomiar ilości energii potrzebnej do jej przerwania.

Ocena trwałości warstwy granicznej [2] może być również oparta na pomiarze efektów towarzyszących jej niszczeniu poprzez:

- zużycie (zużyciowa interpretacja niszczenia warstwy granicznej powstałej w węźle tarcia maszyny czterokulowej),
- wydatek energetyczny (energetyczna interpretacja pomiarów niszczenia warstwy granicznej w węźle tarcia maszyny czterokulowej).

Miarą smarności może być wobec tego trwałość warstwy granicznej w węźle tarcia maszyny czterokulowej. W tej metodzie działanie niszczące jest wyrażane iloczynem ciśnienia istniejącego w warstwie granicznej węzła tarcia ( $p$ ), prędkości poślizgu kulek trących ( $v$ ) i czasu wystąpienia przerwania warstwy granicznej ( $\tau$ ). Iloczyn ten określa wartość pracy jednostkowej (przypadającej na jednostkę powierzchni tarcia) powodującej zniszczenie warstwy granicznej oleju smarowego w układzie tribologicznym w formie węzła maszyny czterokulowej:

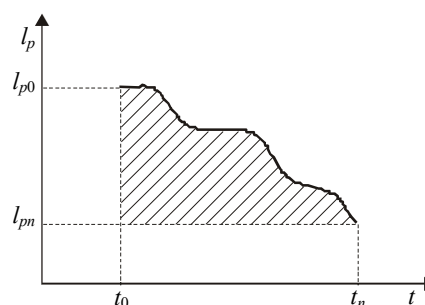
$$l_p(t) = p \cdot v \cdot \tau \quad (1)$$

gdzie:

- $p = 0,52P_t/d^2$  – ciśnienie istniejące w warstwie granicznej [MPa],
- $P_t$  – obciążenie zacierające powodujące niszczenie warstwy granicznej [N],
- $d$  – średnia średnica szkodliwych kulek w chwili przerwania warstwy granicznej [mm],
- $v$  – prędkość poślizgu kulek maszyny czterokulowej [m/s],
- $\tau$  – czas przerwania warstwy granicznej oleju smarowego w maszynie czterokulowej [s],
- $t$  – czas eksploatacji oleju smarowego w układzie tribologicznym silnika o ZS.

W rzeczywistości działanie niszczące warstwę graniczną oleju smarowego powinno być rozpatrywane w określonym czasie, gdyż z upływem czasu następuje zużycie układu tribologicznego, zmniejszające odporność warstwy granicznej. Oznacza to, że praca, która spowoduje zniszczenie tej warstwy będzie mniejsza. Wskutek tego praca  $l_p$  po upływie określonego czasu, przyjmie tak małą wartość, że dalsze użytkowanie oleju smarowego lub całego układu tribologicznego będzie niemożliwe.

Tak rozumiane działanie układu tribologicznego w formie węzła tarcia maszyny czterokulowej może być przedstawione na wykresie (rys. 1).



Rys. 1. Przykładowy wykres działania warstwy granicznej [2];  $l_{p0}$  – praca potrzebna do przerwania warstwy granicznej w chwili  $t_0$ ,  $l_{pn}$  – praca potrzebna do przerwania warstwy granicznej w chwili  $t_n$

Fig. 1. Example of a boundary layer action diagram [2];  $l_{p0}$  – work needed to break the boundary layer at the  $t_0$  instant,  $l_{pn}$  – work needed to break the boundary layer at the  $t_n$  instant

### Pomiary działania niszczącego warstwy granicznej

Badania przeprowadzone zostały w czterech etapach na aparacie czterokulowym T-02 firmy ITeE Radom [3]. Substancją analizowaną był olej smarowy Marinol RG1240 silnika 8S20UD-H. Cegielski-Sulzer:

- w stanie czystym (olej nie był użyty do smarowania);
- olej eksploatowany;

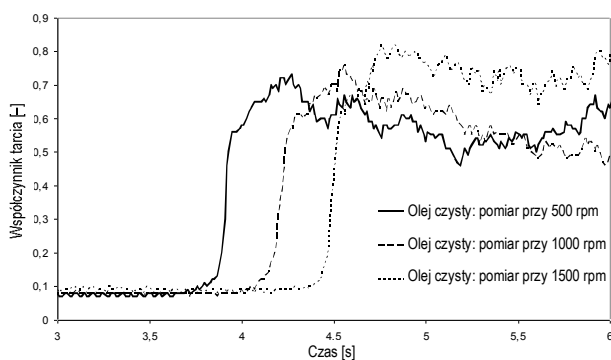
- olej eksploatawany z zawartością 5% paliwa MDO, którym zasilany jest silnik;
- olej eksploatawany z zawartością 5% wody destylowanej.

Aby wyznaczyć w jak największym zakresie wartości pracy powodującej zniszczenie warstwy granicznej w węźle tarcia, ustalono następujące parametry badań:

- prędkość obrotowa wrzeciona: 500 obr/min, 1000 obr/min, 1500 obr/min,
- prędkość narastania obciążenia: 409 N/s,
- obciążenie początkowe: 0 N,
- obciążenie maksymalne:  $7400 \pm 100$  N,
- temperatura oleju smarowego:  $60^{\circ}\text{C}$ .

Węzeł tarcia stanowiły kulki łożyskowe, o średnicy 12,7 mm wykonane ze stali ŁH15 (stop żelaza Fe zawierający średnio 1% C, 0,02% S, 0,3% Ni, 0,3% Cu) w klasie dokładności 16 według normy PN-83/M-86452, zanurzone w badanym oleju smarowym.

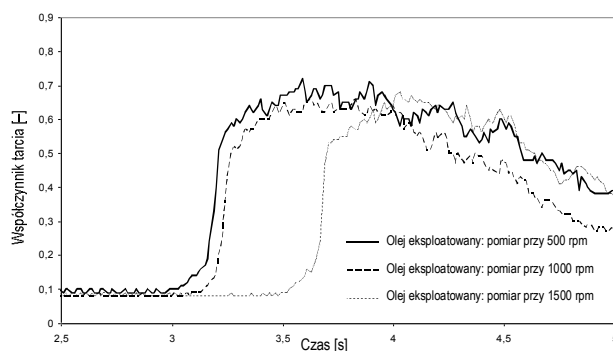
Łącznie wykonano 12 pomiarów trwających 18 sekund przy ciągłym narastaniu obciążenia na węzeł tarcia i stałych prędkościach obrotowych wrzeciona. Gdy dochodziło do przerywania warstwy granicznej oleju smarowego, następował bardzo gwałtowny przyrost współczynnika tarcia kinematycznego, określający początek zacierania  $\mu_p$ . Wszystkie te sytuacje przedstawione są na rysunkach 2–5. Wyznaczenia pracy niszczenia warstwy granicznej  $l_p$  dokonano na podstawie wyników pomiarów zawartych w tabeli 1.



Rys. 2. Niszczenie warstwy granicznej węzła tarcia zanurzonego w czystym oleju smarowym Marinol RG1240

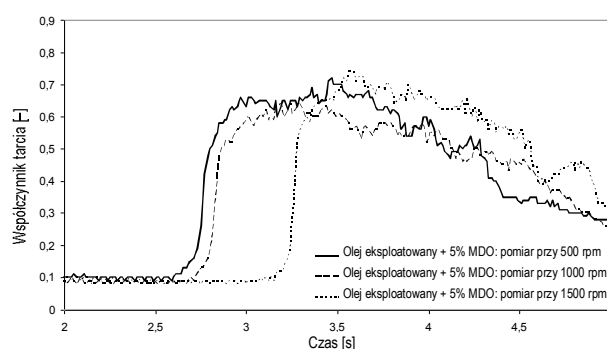
Fig. 2. Deterioration of the boundary layer of a friction node submerged in the pure Marinol RG1240 lubricating oil

Z danych zebranych w tabeli 1 wynika, że olej smarowy czysty wymaga największej pracy jednostkowej powodującej zniszczenie warstwy granicznej, zatem taki układ tribologiczny jest zdolny do przenoszenia najwyższej energii, czyli znajduje się w pełnym stanie zdadności pod względem energetycznym.



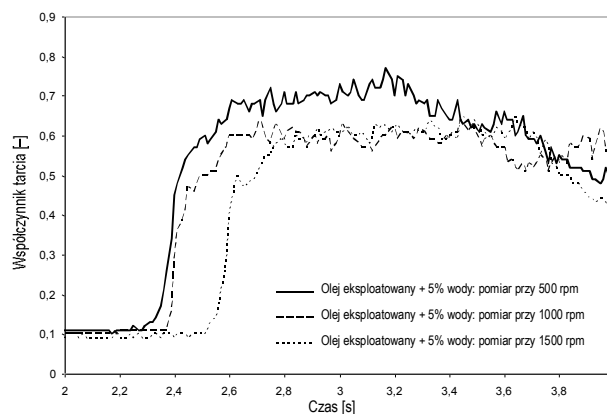
Rys. 3. Niszczenie warstwy granicznej węzła tarcia zanurzonego w eksploatawanym oleju smarowym Marinol RG1240

Fig. 3. Deterioration of the boundary layer of a friction node submerged in the used Marinol RG1240 lubricating oil



Rys. 4. Niszczenie warstwy granicznej węzła tarcia zanurzonego w eksploatawanym oleju smarowym Marinol RG1240 z domieszką 5% paliwa MDO

Fig. 4. Deterioration of the boundary layer of a friction node submerged in the used Marinol RG1240 lubricating oil with a 5% MDO fuel admixture



Rys. 5. Niszczenie warstwy granicznej węzła tarcia zanurzonego w eksploatawanym oleju smarowym Marinol RG1240 z domieszką 5% wody destylowanej

Fig. 5. Deterioration of the boundary layer of a friction node submerged in the pure Marinol RG1240 lubricating oil with a 5% content of distilled water

W celu określenia zakresu pogarszania działania warstwy granicznej można przyjąć model stochastyczny zmniejszania pracy  $l_p$  potrzebnej do przerywania tej warstwy, w formie procesu losowego

Tabela 1. Wartości obliczonych parametrów diagnostycznych  
Table 1. Values of the calculated diagnostic parameters

| Lp. | Pomiary  | $P_t$  | $\tau$ | $d$  | $p$ | $\nu$ | $l_p$ |
|-----|--|--------|--------|------|-----|-------|-------|
| 1   | Olej czysty: pomiar przy 500 obr/min                               | 1604   | 3,89   | 1,2  | 579 | 0,19  | 430   |
| 2   | Olej czysty: pomiar przy 1000 obr/min                              | 1610   | 4,17   | 1,3  | 495 | 0,38  | 784   |
| 3   | Olej czysty: pomiar przy 1500 obr/min                              | 1621   | 4,43   | 1,33 | 477 | 0,57  | 1204  |
| 4   | Olej eksploatowany: pomiar przy 500 obr/min                        | 1237,2 | 3,12   | 1,3  | 381 | 0,19  | 226   |
| 5   | Olej eksploatowany: pomiar przy 1000 obr/min                       | 1351,2 | 3,19   | 1,4  | 358 | 0,38  | 434   |
| 6   | Olej eksploatowany: pomiar przy 1500 obr/min                       | 1380   | 3,55   | 1,44 | 346 | 0,57  | 700   |
| 7   | Olej eksploatowany + 5% MDO: pomiar przy 500 obr/min               | 1156,8 | 2,65   | 1,4  | 307 | 0,19  | 61    |
| 8   | Olej eksploatowany + 5% MDO: pomiar przy 1000 obr/min              | 1244,4 | 2,73   | 1,5  | 288 | 0,38  | 299   |
| 9   | Olej eksploatowany + 5% MDO: pomiar przy 1500 obr/min              | 1294,8 | 3,13   | 1,6  | 263 | 0,57  | 469   |
| 10  | Olej eksploatowany + 5% H <sub>2</sub> O: pomiar przy 500 obr/min  | 949,2  | 2,29   | 1,7  | 171 | 0,19  | 35    |
| 11  | Olej eksploatowany + 5% H <sub>2</sub> O: pomiar przy 1000 obr/min | 1017,6 | 2,32   | 1,8  | 163 | 0,38  | 144   |
| 12  | Olej eksploatowany + 5% H <sub>2</sub> O: pomiar przy 1500 obr/min | 1114,8 | 2,53   | 1,9  | 161 | 0,57  | 232   |

(rys. 1). Wymaga to jednak badań działania warstwy przez wykonanie precyzyjnych pomiarów z wykorzystaniem np. badań emisji akustycznej.

### Wykorzystanie badań emisji akustycznej na węzle tarcia maszyny czterokulowej

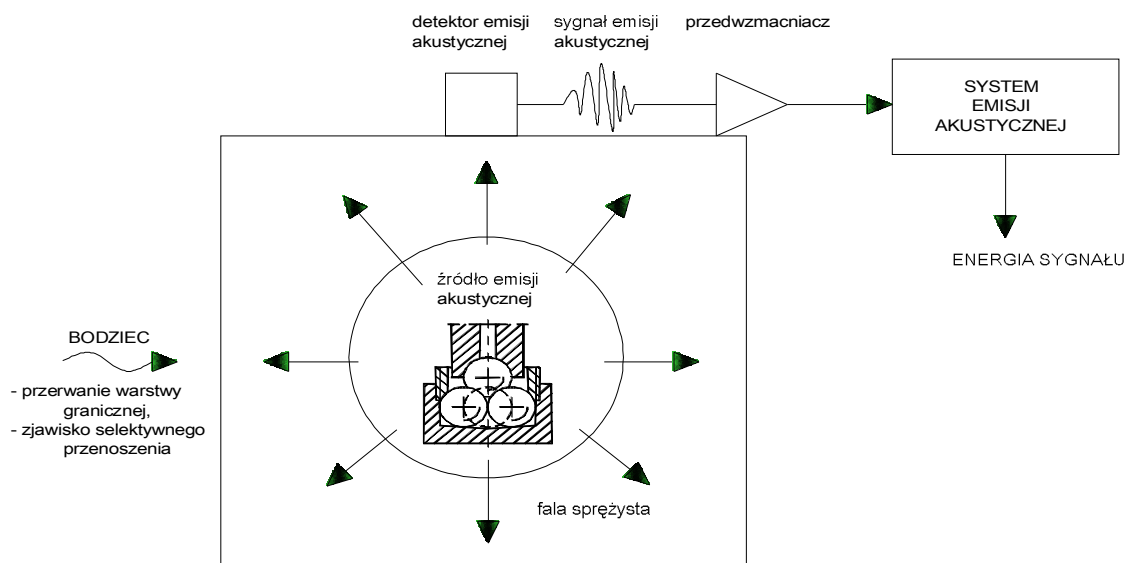
Ponieważ bezpośrednim skutkiem tak interpretowanego działania warstwy granicznej jest energia przez nią przenoszona oraz czas, w którym wspomniana energia może być przenoszona, warto zastosować metodę emisji akustycznej.

Zjawisko emisji akustycznej objawia się powstawaniem i propagacją fal sprężystych wygenerowanych w ośrodku podczas zachodzących w nim procesów dynamicznych. Fala sprężysta rozchodzi się od źródła do granic ośrodka i może zostać zarejestrowana przez czujnik akustyczny, jako sygnał (impuls) akustyczny (rys. 6).

Badania realizowane na aparacie czterokulowym T-02 z podłączonymi czujnikami piezoelektrycznymi, w którym węzłem tarcia jest zespół czterech stalowych kulek zanurzonych w badanym oleju smarowym, będą miały wówczas na celu monitorowanie procesu niszczenia warstwy granicznej.

### Uwagi końcowe i wnioski

Działanie warstwy granicznej układu tribologicznego jest rozumiane jako przenoszenie przez nią energii, wynikającej z obciążenia węzła tarcia w określonym czasie w formie pracy  $l_p$ . Na podstawie wartości pracy  $l_p$  można ustalić stany energetyczne badanych układów tribologicznych. Mogą to być stany pełnej zdatności, częściowej zdatności i niezdatności pod względem energetycznym. Wraz z pogarszaniem się własności fizykochemicznych oleju smarowego (np. dostanie się wody, bądź



Rys. 6. -02  
Fig. 6. The acoustic emission phenomenon in the T-02 four-ball tester friction node

paliwa) w ustalonych warunkach i określonym czasie, wartość tak rozumianego działania będzie malała wskutek niższej smarności i tym samym zmniejszania pracy potrzebnej do przzerwania warstwy granicznej oleju układu tribologicznego.

Aby zwiększyć wiarygodność wyników badań na aparacie czterokulowym T-02 i umożliwić rozdzielenie stanów energetycznych, należy:

- pobierać próbki oleju smarowego z całego okresu eksploatacji silnika o ZS i stworzyć biografię wyników badań;
- sprawdzić czy kulki wężła tarcia maszyny czterokulowej mają taką samą budowę warstwy ślizgowej, jak np. panwie głównych łożysk ślizgowych;
- zamocować na wężle tarcia maszyny czterokulowej czujniki piezoelektryczne umożliwiające wyznaczenie energii, która zostaje wyzwolona podczas niszczenia warstwy granicznej (sygnały emisji akustycznej).

Analiza działania warstwy w przedstawionej wersji ma także tę dodatkową zaletę, że umożliwia wykonanie precyzyjnych pomiarów, a następnie wyrażenie ich w formie liczby z jednostką miary nazywaną dżulosekundą oraz graficznie, jako pole działania (rys. 1).

### Bibliografia

1. GIRTLE J.: Analiza i synteza sytuacji decyzyjnej w procesie eksploatacji urządzeń i systemów energetycznych. Praca wykonana w ramach projektu finansowanego przez MNiSW Nr N509 045 31/3500.
2. GIRTLE J.: Metoda oceny smarności olejów i paliw w ujęciu energetycznym. XXIV Międzynarodowe Sympozjum Siłowni Okrętowych 2003, Szczecin 2003, 131–141.
3. SZCZEREK M., MUSZYŃSKI W.: Badanie tribologiczne. Zacieranie. Biblioteka Problemów Eksploatacyjnych, Radom 2000.

*Recenzent:*

*dr hab. inż. Andrzej Adamkiewicz  
profesor Akademii Morskiej w Szczecinie*