

**Andrzej MŁYNARCZAK\***

**CHARAKTERYSTYKI TRIBOLOGICZNE OLEJU  
SMAROWEGO EKSPLOATOWANEGO  
W SILNIKU OKRĘTOWYM**

**TRIBOLOGICAL CHARACTERISTICS OF LUBRICATING  
OIL USED IN MARINE DIESEL ENGINE**

**Słowa kluczowe:**

olej smarowy, silnik okrętowy, aparat czterokulowy, obciążenie zacierające

**Key words:**

lubricating oil, marine diesel engine, four-ball apparatus, seizing load

**Streszczenie**

W artykule przedstawiono charakterystyki tribologiczne oleju obiegowego Titan Truck Plus 15W40 użytkowanego w bezwzduchowym silniku okrętowym Caterpillar 3512B. Badania wykonano na aparacie czterokulowym T-02 zgodnie z PN-76/C-04147. Producent silnika Caterpillar 3512B zaleca wymianę oleju co 1000 godzin. Na **Rys. 2–5** przedstawiono przebiegi zmian momentu tarcia i temperatury przy narastającym obciążeniu elementów węzła tarcia smarowanych różnymi próbkami oleju. Próbkę oleju pobierano z systemu smarowego silnika w zalecanym okresie eksploatacji. Na podstawie uzyskanych charakterystyk wyznaczono obciążenia zacierające. Stwierdzono, iż wartość obciążenia

---

\* Akademia Morska w Gdyni, ul. Morska 81-87, 81-225 Gdynia, Polska, tel. (058) 69-01-324, fax (058) 620-67-01, e-mail: mlynek@am.gdynia.pl

zacierającego nie jest miarodajnym wskaźnikiem oceny smarności oleju. Istotny jest przebieg zmian momentu tarcia w całym zakresie obciążenia w celu uzyskania odpowiedzi na pytanie, jaki przebieg ma proces niszczenia i odbudowywania warstwy granicznej w funkcji czasu.

## WPROWADZENIE

W silniku spalinowym olej smarowy poddawany jest działaniu wysokiej temperatury, ciśnienia i tlenu z powietrza, a ponadto ulega zanieczyszczeniu produktami zużycia współpracujących elementów, wodą, paliwem, produktami spalania paliwa w cylindrze silnika oraz zanieczyszczeniami pochodzącymi z otaczającej atmosfery. W rezultacie tych oddziaływań zachodzi złożony, wieloetapowy proces chemicznych i fizycznych przeobrażeń oleju smarowego określany jako starzenie się oleju. Proces ten wpływa niekorzystnie na jakość i zakres spełnianych przez olej smarowy funkcji w silniku, a stopień jego zaawansowania charakteryzowany jest wartościami poszczególnych właściwości użytkowych oleju (lepkość, zawartość zanieczyszczeń, liczba zasadowa) [L. 1, 5–7, 12]. Z drugiej strony, pewien rodzaj zanieczyszczeń powstających w procesie utleniania, tj. zanieczyszczenia organiczne, takie jak: kwasy organiczne, smoły, asfalteny to czynne powierzchniowo związki chemiczne o budowie niesymetrycznej – dipole elektryczne. Tworzą one na powierzchni metalu warstwę graniczną, co poprawia smarność eksploatowanych olejów [L. 3].

Chociaż pojęcie smarności pojawiło się w literaturze technicznej już pod koniec XIX wieku, do tej pory nie zostało jednoznacznie zdefiniowane (określa się ją na podstawie zespołu wskaźników). W Polsce obowiązuje norma PN-76/C-04147 dotycząca badania własności smarnych olejów i smarów na aparacie czterokulowym. Zgodnie z tą normą wyznacza się następujące wskaźniki własności smarnych: obciążenie zespawania  $P_z$ , obciążenie zacierające  $P_t$ , największe obciążenie niezacierające  $P_n$ , wskaźnik zużycia pod obciążeniem  $I_h$  oraz graniczne obciążenie zużycia  $G_{oz}$ . Wskaźniki  $P_n$ ,  $I_h$  i  $G_{oz}$  wyznacza się na podstawie średnicy skaz zmierzonej na nieruchomych kulkach. Pomiar ten jest obarczony błędem zwłaszcza w przypadku, gdy pomiaru średnic dokonuje się za pomocą wyskalowanego szkła powiększającego o dokładności 0,1 mm. Często ślady zużycia mają charakter nieregularny, co dodatkowo utrudnia określenie średnicy śladu. Poza tym średnica skaz nie jest pierwotną przyczyną, lecz skutkiem wzrostu oporów tarcia powodujących zwiększone zużycie kulek [L. 2]. Z kolei obciążenie zespawania  $P_z$  wyznacza się w warunkach ekstremalnego obciążenia węzła tarcia, przy którym następuje zespawanie obracającej się kulki z trzema kulkami nieruchomymi.

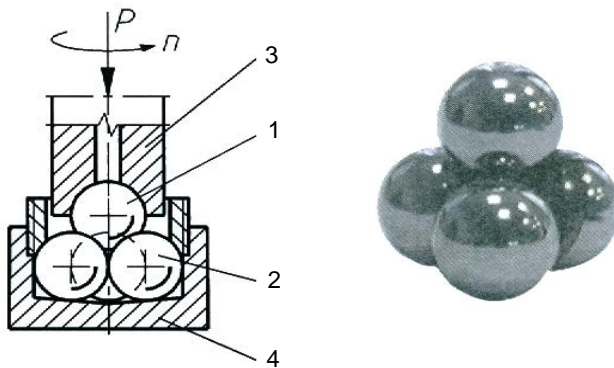
Zdaniem autora obciążenie zacierające  $P_t$  wyznaczone przy liniowo narastającym obciążeniu, przy którym następuje szybki wzrost momentu tarcia związany z przerwaniem pierwotnej warstwy granicznej ma większy związek

z dopuszczalnym obciążeniem węzła tarcia w maszynach roboczych niż pozostałe, określone w normie PN-76/C-04147 parametry. W związku z tym w artykule badano smarność oleju eksploатовanego w silniku Caterpillar 3512B na podstawie procedury oznaczenia obciążenia zacierającego  $P_r$ .

Artykuł stanowi fragment szerszych badań mających na celu znalezienie korelacji pomiędzy wynikami testów znormalizowanych a czasem eksploatacji olejów smarowych użytkowanych w silnikach okrętowych.

## STANOWISKO BADAWCZE I METODYKA BADAŃ

Do przeprowadzenia badań tribologicznych użyto aparatu czterokulowego T-02 wyposażonego we wspomagane komputerowo systemy sterowania i pomiarów. Urządzenie zostało zaprojektowane i wykonane w Instytucie Technologii Eksploatacji w Radomiu. Metodologia pomiarów opisana została w pozycjach [L. 8–11]. Węzeł tarcia przedstawiony na **Rys. 1** składał się z czterech kulek ze stali 100 Cr6 o średnicy 12,7 mm, chropowatości powierzchni wyrażonej parametrem  $R_a = 0,032 \mu\text{m}$  i twardości według Rockwella 60 HRC. Trzy dolne kulki 2 osadzone nieruchomo w uchwycie 4 dociskane są siłą  $P$  do obracającej się z prędkością  $n$  kulki górnej 1. Dolne kulki zanurzone są całkowicie w badanym oleju [L. 11].



**Rys. 1. Schemat węzła tarcia: 1 – kulka górna, 2 – kulki dolne, 3 – uchwyt kulki, 4 – gniazdo kulek [L. 11]**

Fig. 1. Scheme of the friction node: 1 – top ball, 2 – lower balls, 3 – top ball holder, 4 – lower balls seat [L. 11]

Badania przeprowadzono dla oleju silnikowego Titan Truck Plus 15W40 stosowanego do smarowania łożysk oraz tulei cylindrowych bezwodzikowych silników okrętowych. Jest to olej silnikowy typu SHPD (*Super High Performance Diesel*) oparty na bazie mineralnej z pakietem dodatków uszlachetniających zapewniającym (wg producenta oleju) „bardzo dobre właściwości smar-

ne”. Badany olej użytkowany był w silniku Caterpillar 3512B napędu głównego holownika portowo-redowego. Producent silnika zaleca wymianę oleju co 1000 godzin. Próbkę oleju pobierano z systemu smarowego silnika w nieregularnych odstępach czasu, w całym zalecanym przez producenta silnika okresie eksploatacji oleju smarowego (ostatnią próbkę pobrano po 1034 godzinach pracy oleju, kiedy to nastąpiła jego wymiana).

Badania polegały na wyznaczeniu zgodnie z normą [L. 9] obciążenia zacierającego  $P_t$  charakteryzującego trwałość warstwy smarowej. Wyznaczenie wskaźnika  $P_t$  odbywało się pod wzrastającym w sposób ciągły obciążeniem (zaczynającym się od obciążenia równego zero), aż do uzyskania gwałtownego wzrostu oporów ruchu definiowanego jako przerwanie warstwy smarowej i rozpoczęcie zacierania.

Sposób wyznaczenia wskaźnika  $P_t$  przedstawiono na **Rys. 2**. Miejsce, które wskazuje strzałka jest obciążeniem, przy którym następuje gwałtowny wzrost oporów ruchu (gwałtowny wzrost momentu tarcia) wskazujący na rozpoczęcie zacierania. Za wynik oznaczenia obciążenia zacierającego  $P_t$  przyjmuje się średnią arytmetyczną wyników co najmniej trzech oznaczeń nieróżniących się od jej średniej arytmetycznej więcej niż o 10%.

## WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

Charakterystyki tribologiczne oleju Titan Truck Plus 15W40 dla różnej liczby godzin pracy oleju w silniku przedstawiono na **Rys. 2–5**.

**Rysunek 2** przedstawia przykładowy przebieg momentu tarcia i temperatury dla oleju świeżego (0 godzin pracy) oraz sposób wyznaczenia wskaźnika,  $P_t$ . Z rysunku wynika, że przerwanie warstwy granicznej nastąpiło po ok. 5,5 s. Moment tarcia w chwili początku przerywania wynosił ok. 0,8 Nm i wzrósł do wartości 3,5 Nm. Następnie moment tarcia nieznacznie spada (początek procesu regeneracji warstwy granicznej) i stabilizuje się z niewielką tendencją wzrostową, osiągając pod koniec próby wartość 5 Nm. Podobne przebiegi uzyskano również dla innych oznaczeń oleju świeżego. Średnia wartość obciążenia zacierającego  $P_t$  wynosiła 2200 N.

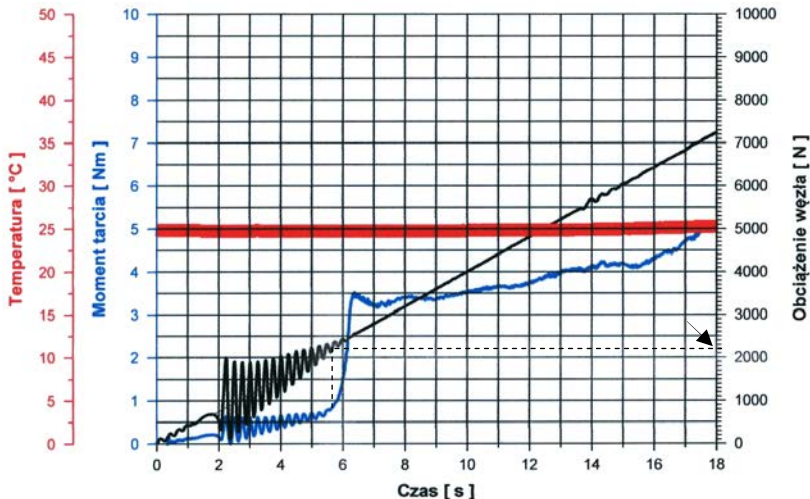
Jeden z trzech przebiegów zmian momentu tarcia i temperatury dla oleju pobranego z silnika po 342 godzinach pracy przedstawiono na **Rys. 3**. Przerwanie warstwy granicznej nastąpiło w tym przypadku później niż dla oleju świeżego (po ok. 6,5 s), po czym nastąpił bardzo gwałtowny wzrost momentu tarcia do wartości 10 Nm i okres intensywnego zużywania stalowych kulek. Po ok. 13 s rozpoczyna się okres stabilizacji oporów tarcia z tendencją wzrostową. Średnia wartość obciążenia zacierającego  $P_t$  wynosiła 2350 N.

Podobny przebieg zmian momentu tarcia uzyskano dla oleju pobranego z silnika po 593 godzinach pracy (**Rys. 4**). Przerwanie warstwy granicznej nastąpiło nieco wcześniej (po ok. 6 s) i wcześniej (po ok. 12 s) rozpoczął się okres

stabilizacji oporów ruchu również z tendencją wzrostową. Średnia wartość obciążenia zacierającego  $P_t$  wyniosła 2366 N.

Najpóźniej, bo po ok. 7 sekundach nastąpiło przerwanie warstwy granicznej dla oleju, który przepracował w silniku 1024 godziny (**Rys. 5**). Dalszy przebieg zmian momentu tarcia różni się jednak od poprzednich. Moment tarcia gwałtownie rośnie do poziomu 10 Nm i już nie spada do końca próby. Warstwa graniczna nie zregenerowała się – nastąpiło zatarcie kulek. Średnia wartość obciążenia zacierającego  $P_t$  wyniosła 2733 N.

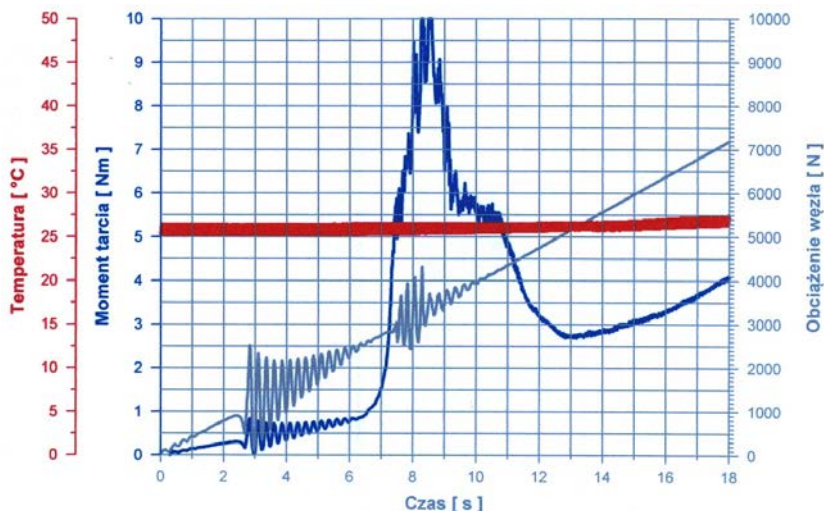
Reasumując, z uzyskanych przebiegów wynika, że wraz ze wzrostem liczby godzin pracy oleju w silniku później następuje przerwanie warstwy granicznej (5,5 s dla oleju świeżego i 7 s dla oleju po 1024 h pracy) i rośnie wartość parametru  $P_t$  (2200 N dla oleju świeżego i 2366 dla oleju po 1024 h pracy). Można by na tej podstawie wyciągnąć wniosek, że olej przepracowany wykazuje się większą trwałością warstwy smarowej. Wniosek ten nie daje jednak pełnego obrazu zachowania się oleju w określonym metodą badania zakresie obciążalności. O ile w przypadku oleju świeżego przerwanie warstwy granicznej następuje stosunkowo wcześnie, to wcześniej również rozpoczyna się okres stabilizacji oporów tarcia. Maksymalny moment tarcia i średnice skaz kulek osiągają niższe wartości (3,5 Nm i 1,8 mm) niż w przypadku olejów pracujących w silniku 342 i 593 h (odpowiednio 10 Nm i 2÷2,5 mm). Zatem im później



**Rys. 2. Przebieg momentu tarcia i temperatury przy narastającym obciążeniu węzła tarcia smarowanego świeżym olejem Titan Truck Plus 15W40**

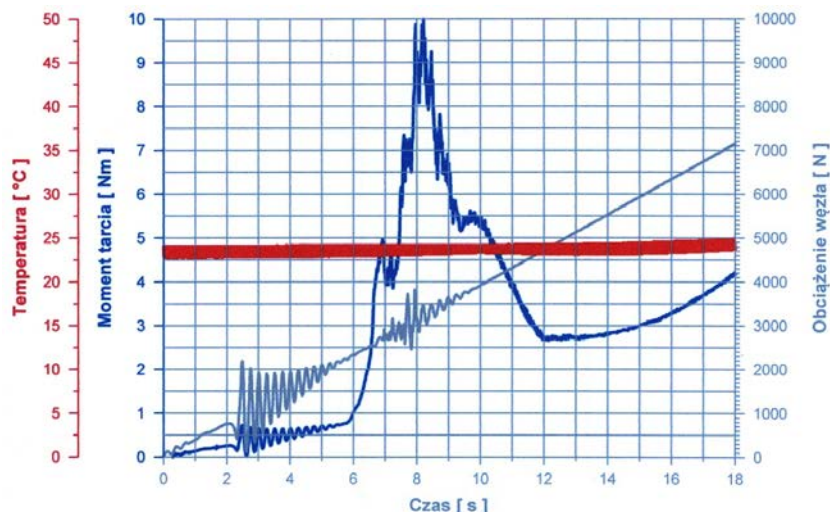
Fig. 2. The moment of friction and temperature for an increasing load of the friction node lubricated by Titan Truck Plus 15W40 fresh engine oil

następowało przerwanie warstwy granicznej, tym intensywniejsze było zużycie współpracujących kulek. W przypadku oleju pracującego w silniku 1024 h warstwa graniczna po przerwaniu nie zregenerowała się – nastąpiło zatarcie kulek.



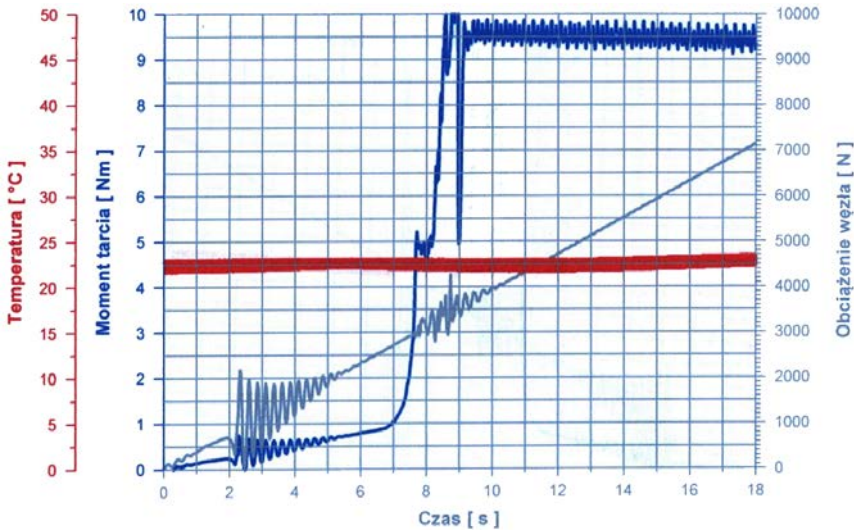
Rys. 3. Przebieg momentu tarcia i temperatury przy narastającym obciążeniu wężla tarcia smarowanego olejem Titan Truck Plus 15W40 po 342 h pracy

Fig. 3. The moment of friction and temperature for an increasing load of the friction node lubricated by Titan Truck Plus 15W40 engine oil after 342 hours of operation



Rys. 4. Przebieg momentu tarcia i temperatury przy narastającym obciążeniu wężla tarcia smarowanego olejem Titan Truck Plus 15W40 po 593 h pracy

Fig. 4. The moment of friction and temperature for an increasing load of the friction node lubricated by Titan Truck Plus 15W40 engine oil after 593 hours of operation



Rys. 5. Przebieg momentu tarcia i temperatury przy narastającym obciążeniu wężła tarcia smarowanego olejem Titan Truck Plus 15W40 po 1024 h pracy

Fig. 5. The moment of friction and temperature for an increasing load of the friction node lubricated by Titan Truck Plus 15W40 engine oil after 1024 hours of operation

## WNIOSKI

1. Obciążenie zacierające  $P_t$ , przy którym następuje szybki wzrost momentu tarcia związany z przerwaniem pierwotnej warstwy granicznej nie jest obarczone błędem wynikającym z pomiaru średnicy skaz zużycia kulek. Mniejsza prędkość narastania obciążenia pozwoliłaby jednak na dokładniejsze określenie punktu inicjacji zacierania.
2. Olej przepracowany wykazuje się większą trwałością warstwy smarowej – wraz ze wzrostem liczby godzin pracy oleju w silniku później następuje przerwanie warstwy granicznej i rośnie wartość parametru  $P_t$ .
3. Im później następowało przerwanie warstwy granicznej, tym intensywniejsze było zużywanie współpracujących kulek. W przypadku oleju świeżego przerwanie warstwy granicznej następuje najszybciej, ale wcześniej rozpoczyna się okres stabilizacji oporów tarcia. Maksymalny moment tarcia i średnice skaz kulek osiągają niższe wartości niż w przypadku olejów pracujących w silniku 342 i 593 h. W przypadku oleju pracującego w silniku 1024 h warstwa graniczna po przerwaniu nie zregenerowała się – nastąpiło zatarcie kulek.
4. Na podstawie przedstawionych w niniejszym artykule wyników badań można stwierdzić, iż wartość obciążenia zacierającego nie jest miarodajnym wskaźnikiem oceny smarności oleju. Istotny jest przebieg zmian momentu

tarcia w całym zakresie obciążenia w celu uzyskania odpowiedzi na pytanie, jaki przebieg ma proces niszczenia i odbudowywania warstwy granicznej w funkcji czasu. Potwierdzenie tego wniosku wymaga jednak szerszych badań olejów smarowych, gdyż ich jakość zależy od wielu czynników, które mogą mieć zróżnicowany wpływ na wartość badanych parametrów.

## LITERATURA

1. Cyulin W., Lemski J., Młynarczak A.: Badanie procesu starzenia obiegowego oleju smarowego w silniku Sulzer S20U. XXII Sympozjum Siłowni Okrętowych, Szczecin 2001.
2. Guzik J.: Charakterystyki tribologiczne płynów eksploatacyjnych. *Tribologia*, nr 2/2008.
3. Hebda M., Wachal A.: *Tribologia*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne. Warszawa 1980.
4. Kałdoński T.: O normatywnych badaniach smarności w aparacie czterokulowym. *Tribologia*, nr 1/1990.
5. Kulczycki A., Wachal A.: Zmiany w silnikowym oleju smarowym w wyniku oddziaływań cieplnych. *Paliwa, Oleje i Smary w Eksploatacji*, nr 27/1996.
6. Młynarczak A.: Badanie procesu starzenia się olejów smarowych w bezwzdukowych silnikach okrętowych. *Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Gdyni*. Gdynia 2003.
7. Młynarczak A., Włodarski J.K.: Zmiany lepkości olejów smarowych użytkowanych w bezwzdukowych silnikach okrętowych. *Tribologia*, nr 1/2007.
8. Piekoszewski W., Szczerek M., Tuszyński W.: The action of lubricants under extreme pressure conditions in a modified four-ball tester. *Wear*, vol. 240, 2001, p.183–193.
9. PN-76/C-04147 Badanie własności smarnych olejów i smarów.
10. Szczerek, M., Tuszyński, W.: *Tribological Tests, Scuffing*. Publ. ITeE, Radom, Poland 2000.
11. T-02U Aparat czterokulowy. Instrukcja obsługi. Instytut Technologii Eksploatacji, Radom 2011.
12. Włodarski J.K.: *Podstawy eksploatacji maszyn okrętowych. Tarcie i zużycie*. Wydawnictwo Akademii Morskiej w Gdyni, 2006.

## Summary

**The paper presents tribological characteristics of Titan Truck Plus 15W40 lubricating oil used in trunk piston marine diesel engine Caterpillar 3512B. The test results were collected by means of a four-ball extreme pressure tester T-02 according to PN-76/C-04147. The manufacturer of Caterpillar 3512B engine recommends lubricating oil change after every 1000 hours of operation. Figures 2 to 5 present the moment of friction and temperature courses for an increasing load of the friction nodes lubricated**



by different oil samples. Lubricating oil samples were taken from an engine oil system in recommended operating period.

Based on obtained characteristics, seizure points  $P_1$  were determined. It was found that seizure point is not an authoritative index to assess lubricating oil. The essential is the change of friction moment in whole load range that makes it possible to determine the boundary layer destruction and its regeneration process in time.

