

TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF LUBRICATING OIL USED IN BI-FUEL ENGINE (PETROL AND LPG) IN CONDITION OF BOUNDARY FRICTION

Wiesław Olszewski, Artur Maciąg

Radom Technical University, Institute of Maintenance of Vehicles and Machines

Al. Chrobrego 45, 26-600 Radom, Poland

tel.: +48 3617642, fax: +48 3617644

e-mail: iepim@pr.radom.pl

Abstract

Friction in condition of boundary lubrication (boundary friction, friction in boundary layers) has a fundamental meaning for non-failure work of friction of machines and systems. Very often in real working test condition kinematics knots work outside optimum its operational durability and reliability, range of lubrication so-called fluid friction. Analysis of many scientific research works concerning estimation of current quality of the motor oil in any phase of used time shows that information necessary to evaluate the procedure is based on measurements of normative refers to physic-chemical properties for ex .viscosity, contamination content, viscosity index, basic number etc. In authors opinion it is large mistake to conclusion about degree of serving its function in friction knot in working condition. There are many well-known cases (from point of view of physic-chemical properties) that oil should serve its function while it is observed increase wear its kinematics' pairs in consequence of deterioration of tribological properties.

The article presents the results of the test tribological properties LOTOS SYNTHETIC SAE 5W/40 API SJ/CF sampled from ZI bi-fuel engine (petrol and LPG) in MT-1 machine. The tests of measurement resistance of boundary lubricating layer to break were done resulting from running-in period of tribological knot.

During the test .decrease of resistance of boundary layer on break in initial working time (about 5000km) its increase in comparison with fresh one in all measurement range was observed. Such a change of tribological run testifies that in initial time in motor oil occurs running-in process. These changes did not cause directly to change of physico-chemical properties such as: viscosity. It can state only existence certain dependence between test tribological properties and basic number and LUBRI-SENSOR index which indirectly inform about polar compounds present in motor oil.

Keywords: motor oil, tribological properties, boundary friction, bi-fuel engine, working tests

WŁASNOŚCI TRIBOLOGICZNE OLEJU SMAROWEGO, EKSPLOATOWANEGO W SILNIKU ZASILANYM DWUPALIOWO (BENZYNA +LPG) W WARUNKACH TARCIA GRANICZNEGO

Streszczenie

Tarcie w warunkach smarowania granicznego (inne określenia: tarcie graniczne, tarcie w warstwach granicznych) ma istotne znaczenie dla bezawaryjnej pracy węzłów tarcia maszyn i urządzeń. W rzeczywistych bowiem warunkach eksploatacji bardzo często węzły kinematyczne inaczej węzły tarcia, węzły tribologiczne (pary trące) pracują poza optymalnym z punktu widzenia ich trwałości i niezawodności, zakresem smarowania zwanym tarcie płynnym. Analiza wielu prac naukowo-badawczych dotyczących oceny aktualnego stanu jakości oleju silnikowego w dowolnej fazie eksploatacji wskazuje, że niezbędne do oceny informacje uzyskiwane są na podstawie pomiarów wartości parametrów normatywnych, odnoszących się do własności fizykochemicznych oleju np. lepkość, zawartość zanieczyszczeń, wskaźnik lepkości, liczba zasadowa itp. Zdaniem Autorów artykułu wnioskowanie o stopniu spełnienia przez olej silnikowy funkcji w węźle kinematycznym w warunkach eksploatacji, na tej podstawie obarczone jest dużym błędem. Są liczne znane przypadki, w których z punktu widzenia zmian własności fizykochemicznych olej powinien dobrze spełniać swoje funkcje, podczas gdy w węźle kinematycznym obserwuje się zwiększone zużycie jego par trących na skutek pogorszenia własności tribologicznych.

W artykule przedstawiono wyniki badań własności tribologicznych oleju silnikowego LOTOS SYNTHETIC SAE

5W/40 API SJ/CF pobieranego z silnika oZI zasilanego dwupaliwowo (benzyna + LPG) w węźle tarcia tribometru MT-1 dokonując po ukonstytuowaniu (docieraniu) pomiaru wytrzymałości granicznej warstwy smarowej na przerwanie oraz oporów tarcia w wyniku docierania węzła tribologicznego.

Stwierdzono obniżenie wytrzymałości warstwy granicznej na przerwanie w początkowym okresie eksploatacji (do około 5000 km), następnie jej wzrost w stosunku do oleju nieeksploatowanego, a także spadek wartości współczynnika tarcia, w całym zakresie pomiarowym. Taki przebieg zmian tribologicznych oleju świadczy o tym, że w początkowym okresie eksploatacji olej silnikowy „dociera się”. Zmiany te nie przekładają się wprost na zmiany parametrów fizykochemicznych oleju takich jak np. lepkość. Można stwierdzić jedynie istnienie pewnych zależności pomiędzy badanymi własnościami tribologicznymi a liczbą zasadową i wartościami wskazań LUBRI-SENSORA, które pośrednio informują o zawartości w oleju silnikowym związków polarnych.

Słowa kluczowe: olej silnikowy, własności tribologiczne, tarcie graniczne, silnik dwupaliwowy, badania eksploatacyjne

1. Wprowadzenie

Odpowiednia jakość oleju silnikowego w czasie eksploatacji w silniku spalinowym ma kluczowe znaczenie dla jego trwałości, niezawodnej, efektywnej i ekonomicznej pracy w różnych warunkach. Dlatego też poszukuje się coraz bardziej doskonałych metod (testów) umożliwiających na wysokim poziomie wiarygodności ocenę aktualnego poziomu jakości eksploatowanego oleju silnikowego. Świadczą o tym chociażby testy (niestety utajnione) używane na wyścigach Formuły 1.

Z metodologicznego punktu widzenia najbardziej wiarygodna byłaby ocena jakości oleju dokonana na podstawie pomiaru stopnia wypełnienia przez olej funkcji bezpośrednio w silniku w czasie pracy. Niestety jak dotąd pomiary takie są niezwykle trudne lub wręcz niemożliwe, co nie oznacza, że bariera ta nie zostanie pokonana. Przykład - próby wykorzystania odpowiednich czujników diagnostyki pokładowej. Dlatego też, w metodyce badań olejów silnikowych w eksploatacji przyjmuje się rozwiązanie pośrednie polegające na ocenie stopnia spełnienia przez olej funkcji w silniku poprzez pomiary tych własności oleju a ściślej parametrów charakteryzujących dane własności, które mają udokumentowany lub prawdopodobny związek z odpowiednimi funkcjami oleju w silniku.

Wybór parametrów pomiarowych, za pomocą których dokonuje się oceny jakości oleju jest kwestią decyzyjną i wynika z wielu przesłanek, między innymi: celu i dokładności oceny, możliwości pomiarowych, sprawdzonych schematów procedury badawczej, systemu oceny (indywidualnej czy populacyjnej), wartości informacyjnej.

Analiza materiału badawczego dotyczącego bezpośrednio lub pośrednio oceny aktualnego stanu oleju w eksploatacji wskazuje, że ze względu na łatwość operacyjną, konieczne do dokonania oceny informacje uzyskiwane są na podstawie pomiarów parametrów normatywnych – podstawowych, bez których opis oleju byłby niekompletny jak i pomocniczych stosowanych do wyjaśnienia szczególnych sytuacji. Parametry normatywne posiadają nad innymi i tę przewagę, że pomiar ich jest łatwy, standardowymi przyrządami pomiarowymi, a w przypadkach konfliktowych może mieć wartość arbitrażową. Niestety w wielu przypadkach wartość informacyjna tych parametrów jest ograniczona ze względu na kryterium reprezentatywności procesów, którym olej podlega w czasie eksploatacji w silniku. Stąd poszukiwania innych parametrów na przykład spośród własności tribologicznych.

2. Przedmiot, zakres i cel badań

Przedmiotem badań był syntetyczny olej silnikowy LOTOS-SYNTETIC SAE 5W/40 API SJ/CF pobierany systematycznie z silnika (silnik OHC poj.1,5 dm³ zasilany dwupaliwowo: benzyna - LPG) samochodu osobowego NEXIA eksploatowanego intensywnie w warunkach jazdy międzymiejskiej, średnio 2500 km miesięcznie. Eksploatacja samochodu na benzynie stanowiła 20% ogólnego przebiegu. Próbkę oleju z silnika w ilości 0,2dm³ pobierane były z przebiegu od 0 do 32 978 km. W stosunku do zaleceń producenta samochodu, czas pomiędzy kolejnymi wymianami oleju został wydłużony ponad trzykrotnie (zalecana wymiana co 10 000 km).

Szczegółowe informacje dotyczące warunków badań, to jest sposobu pobierania próbek oleju i uzupełniania układu smarowania silnika olejem świeżym, metod pomiaru własności tribologicznych (jedna z własności użytkowych) przy tarciu w warunkach smarowania granicznego przedstawione są w sprawozdaniach z prac badawczych realizowanych w latach 2001 - 2003 [1 - 3].

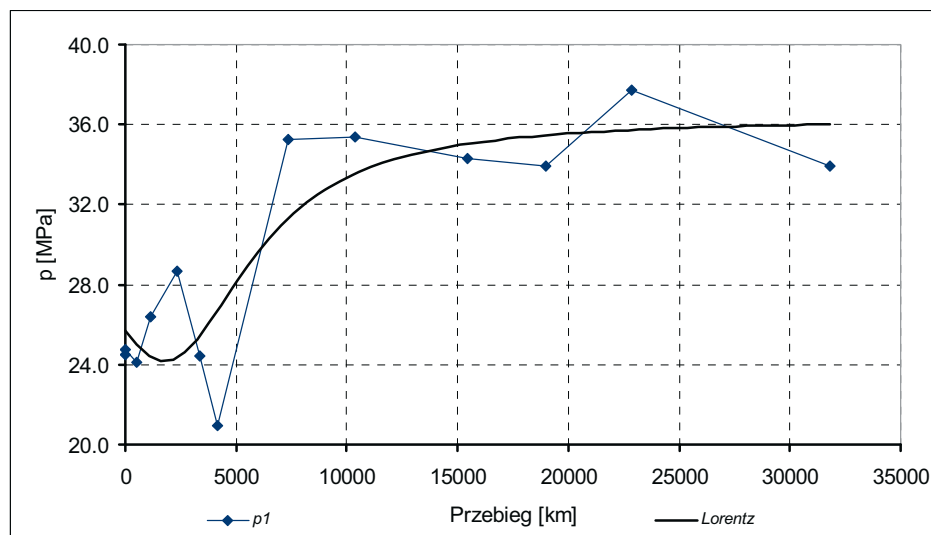
Celem badań było uzyskanie danych o zmianach własności tribologicznych oleju silnikowego w wydłużonym w stosunku do zaleceń producenta okresie eksploatacji do wymiany w silniku zasilanym dwupaliwowo to jest benzyną i LPG. Badano także zmiany wybranych własności fizykochemicznych i absorpcji promieniowania w poczerwieni (IR) w pasmach charakterystycznych dla produktów utleniania oleju.

W szczególności badania miały pokazać jaka przy tym sposobie zasilania jest dynamika zmian wytrzymałości granicznej warstwy smarowej na przerwanie oraz oporów tarcia tej warstwy w chwili przzerwania i przy obciążeniu 7,5 MPa w funkcji przebiegu oleju.

3. Wyniki badań

Badania własności tribologicznych w węźle tarcia tribometru MT-1 przeprowadzono zgodnie z metodyką opracowaną i przedstawioną w sprawozdaniach z prac badawczych i publikacjach [1 - 7] wyznaczając po ukonstytuowaniu (docieraniu), wytrzymałość granicznej warstwy smarowej na przerwanie oraz opory tarcia w wyniku docierania węzła tribologicznego smarowanego olejem z eksploatacji.

Stosowne charakterystyki tribologiczne uzyskane w toku badań dla badanego oleju o różnym przebiegu przedstawiono na rysunkach 1 - 3 i tabelarycznie w Tab. 1 podając jednocześnie kwadrat współczynnika korelacji liniowej R^2 z przebiegiem oleju oraz wskazaniem przyrządu LUBRI-SENSOR i liczbą zasadową.



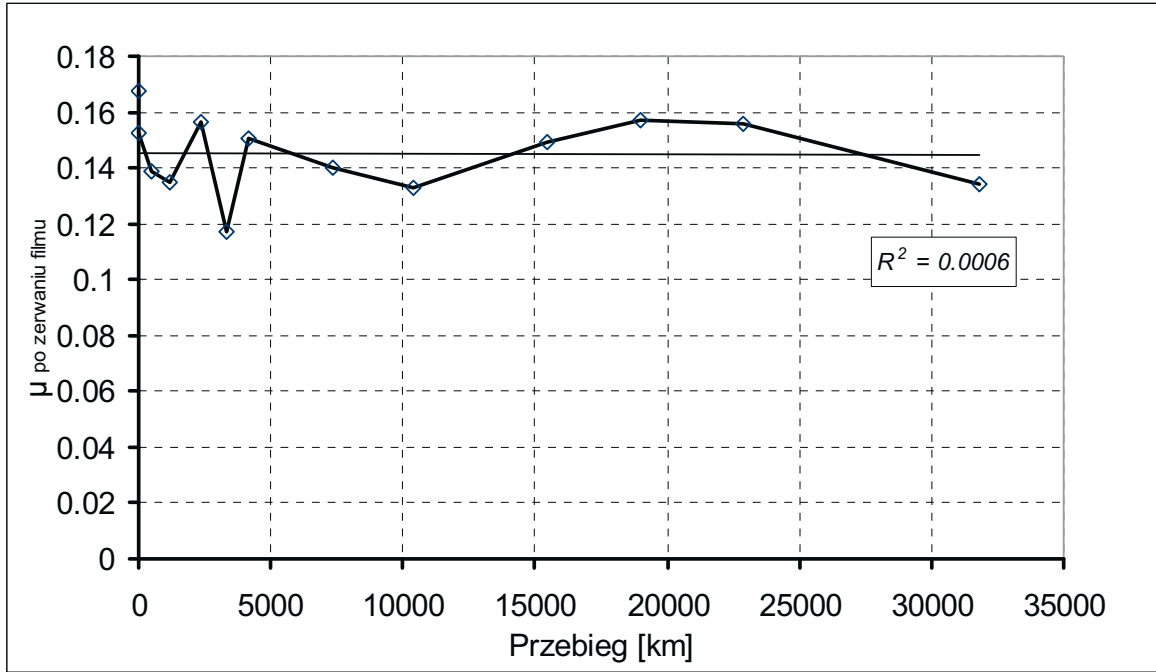
Rys. 1. Zmiana wytrzymałości granicznej warstwy smarowej na przerwanie ukonstytuowanej z eksploатовanego oleju w funkcji przebiegu oleju

Fig. 1. Change of resistance of boundary lubricating layer on break during running-in process in used oil as a function of oil run

Aproksymacja krzywą Lorentza:

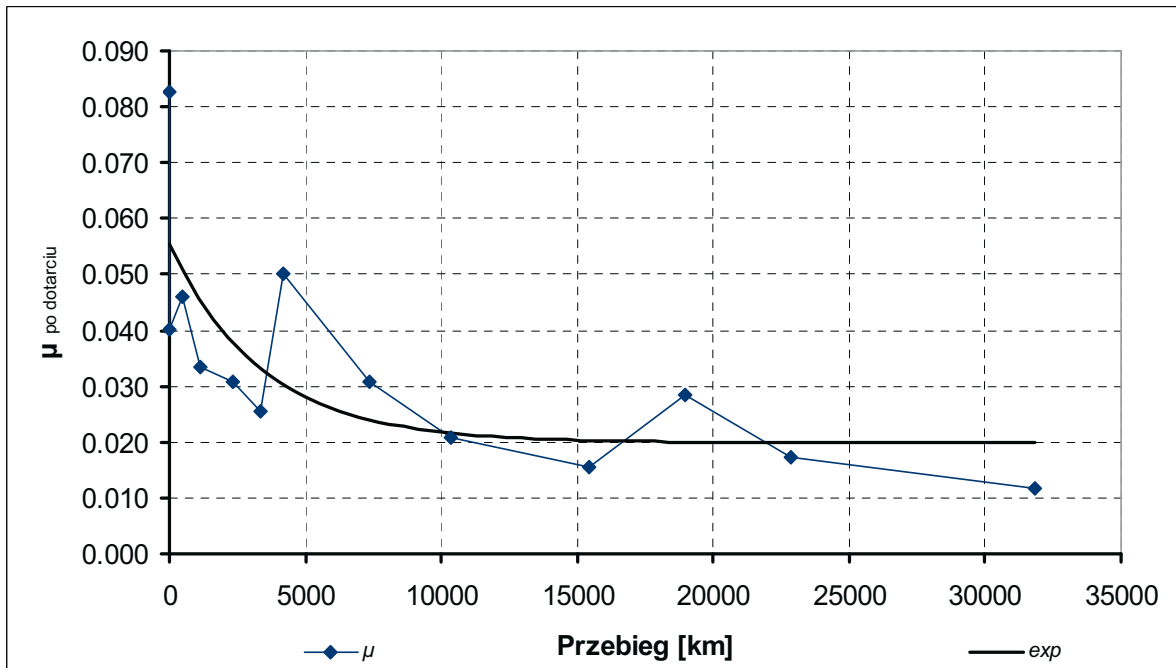
$$y = 36.29 - \frac{354010}{\pi} \cdot \frac{9298}{4 \cdot (x - 1782)^2 + 9298^2}, \quad (1)$$

$$R^2 = 0.76118.$$



B

Rys. 2. Zmiana współczynnika tarcia w momencie przerwania filmu smarowego
 Fig. 2. Change of frictional resistance in condition of break of lubricating film



Rys. 3. Zmiana oporów tarcia granicznej warstwy smarowej pod obciążeniem 7,5MPa
 Fig. 3 Change of frictional resistance of boundary lubricating oil 7,5MPa loaded

Aproksymacja funkcją eksponentialną:

$$y = 0.0199 + 0.0356 \cdot e^{-\frac{x}{3398}}, \quad R^2 = 0.56362. \quad (2)$$

Tab. 1. Wartości mierzonych parametrów tribologicznych i kwadratu współczynnika korelacji R^2 z przebiegiem, liczbą zasadową i wskaźnikiem LUBRI-SENSORTab. 1. Value of measure of tribological parameters and quadratic coefficient of correlation R^2 with oil run, basic number and LUBRI-SENSOR index

przebieg (km)	Parametry tribologiczne				
	$P_{\text{przeg.}}$	$F_{\text{przeg.}}$	R	μ_{przerw}	μ_{dotarcia}
0	24.5	0.3	16.1	0.168	0.083
1	24.8	0.24	9	0.153	0.040
487	24.1	0.21	109	0.139	0.046
1157	26.4	0.18	3141	0.135	0.034
2354	28.7	0.07	3589	0.156	0.031
3359	24.5	0.13	5494	0.117	0.025
4184	20.9	0.20	3571	0.150	0.050
7375	35.3	0.31	3764	0.140	0.031
10371	35.4	0.29	3701	0.133	0.021
15461	34.3	0.32	1987	0.149	0.016
18972	33.9	0.33	1665	0.157	0.028
22851	37.7	0.37	900	0.156	0.017
31835	33.9	0.28	1291	0.134	0.012
R^2 z przebiegiem	0.537	0.456	0.075	0.017	0.587
R^2 z LS	0.683	0.349	0.015	0.004	0.579
R^2 z LZ	0.757	0.683	0.032	0.040	0.553

P - wytrzymałość filmu na zerwanie,
 F - siła tarcia w momencie zerwania,
 R - rezystancja styku w momencie zerwania,
 μ - współczynnik tarcia.

4. Analiza wyników badań

Z przedstawionych na rysunkach 1 - 3 wykresów wyraźnie widać dwa okresy czasu pracy oleju o różnej dynamice zmian mierzonych parametrów. Podobnie jak w przypadku zmian parametrów oceniających własności fizykochemiczne, występuje początkowy okres o dużej dynamice zmian mierzonych wielkości i dalszy okres stabilizacji. Granica rozdzielająca oba przedziały występuje przy około 5000 km, czyli praktycznie tak jak w przypadku zmian parametrów oceny własności fizykochemicznych.

Wytrzymałość granicznej warstwy smarowej na przerwanie po początkowym nieznacznym wzroście do 28,7 MPa od 24,5 MPa dla oleju nieeksploatowanego maleje do 20,9 MPa przy około 5000 km. W czasie dalszej eksploatacji rośnie i po przebiegu około 7000 km ulega stabilizacji na poziomie około 35 Mpa (Rys. 1.).

Jednocześnie opory tarcia określone współczynnikiem tarcia μ pod obciążeniem 7,5 MPa po dotarciu (Rys. 3) stopniowo maleją od wartości 0,040 dla oleju nieeksploatowanego do wartości 0,020 ulegając praktycznie stabilizacji od około 10 000 km. Także współczynnik tarcia w momencie przzerwania filmu smarowego (Rys. 2) maleje w stosunku do oleju nieeksploatowanego.

Taki przebieg zmian własności tribologicznych oleju świadczy o tym, że w początkowym okresie olej „dociera” się skutkiem czego jest poprawa parametrów tribologicznych w zakresie wytrzymałości warstwy granicznej na przerwanie o około 50% i zmniejszenie oporów tarcia w warstwie granicznej ponad dwukrotnie.

O ile początkowy wysoki poziom oporów w warstwie granicznej może jedynie wpływać na wzrost zużycia paliwa, to tak znaczny spadek wytrzymałości granicznej warstwy smarowej na przerwanie obserwowany do ok. 5000 km może mieć znaczny wpływ na intensyfikację procesów zużywania węzłów kinematycznych szczególnie w stanach nieustalonych.

Obserwowany trend zmian właściwości tribologicznych może być spowodowany zmianami składu i budowy granicznych warstw smarowych. Zależą one istotnie od zawartości polarnych składników oleju smarowego, zawartości dodatków uszlachetniających, polarnych produktów termooksydacji bazy olejowej i produktów ich neutralizacji przez składniki rezerwy alkalicznej. Zawartość polarnych produktów termooksydacji oleju z kolei w przybliżeniu charakteryzowana przez zmiany liczby zasadowej.

Z mierzonych parametrów tribologicznych tylko wytrzymałość granicznej warstwy smarowej na przerwanie jest silnie skorelowana z przebiegiem oleju a także liczbą zasadową i wskazaniem przyrządu LUBRI-SENSOR.

5. Wnioski

1. Właściwości użytkowe oleju silnikowego w każdej fazie eksploatacji w sposób wiarygodny mogą być oceniane za pomocą parametrów charakteryzujących własności tribologiczne w warstwach granicznych takich jak:
 - a. wytrzymałość granicznej warstwy smarowej na przerwanie
 - b. opory tarcia w chwili przerywania granicznej warstwy smarowej
 - c. opory tarcia granicznej warstwy smarowej pod obciążeniem 7,5 MPa
2. Zarówno na charakterystykach zmian własności tribologicznych i fizykochemicznych (w niniejszym artykule nie przedstawiono) oleju w funkcji czasu pracy można wyróżnić dwa przedziały o różnej dynamice. Pierwszy, w zakresie czasu pracy oleju od wymiany do 5000 km charakteryzujący się niewielkimi zmianami własności fizykochemicznymi a istotnymi własnościami tribologicznymi w warunkach tarcia granicznego oraz drugi w dalszym okresie eksploatacji, w którym własności fizykochemiczne ulegają zmianom podczas gdy własności tribologiczne są ustabilizowane na określonym poziomie.
3. Własności tribologiczne w warunkach tarcia granicznego nie wykazują istotnej korelacji liniowej (mała wartość R^2) z parametrami znormalizowanymi własności fizykochemicznych. Oznacza to, że pomiary własności fizykochemicznych oleju nie dostarczają istotnych informacji o aktualnych własnościach tribologicznych oleju w węźle kinematycznym w warunkach tarcia granicznego. Zdaniem Autorów pracy pomiary parametrów fizykochemicznych powszechnie stosowane w systemach diagnostycznych stanu oleju silnikowego w eksploatacji odnoszą się do makroskopowych własności oleju. Tak więc wnioskowanie o własnościach tribologicznych w warstwach granicznych, które są własnościami użytkowymi (eksploatacyjnymi) na podstawie zmian parametrów fizykochemicznych takich jak np. lepkość, wskaźnik lepkości, zawartość zanieczyszczeń nierozpuszczalnych w oleju, liczba zasadowa jest obarczone dużym błędem. Można bowiem uznać, z punktu widzenia zmian parametrów fizykochemicznych, że olej dobrze spełnia swoją rolę, podczas gdy w węźle kinematycznym mogą zachodzić procesy negatywne, których skutkiem jest np. zwiększone zużywanie par trących węzła kinematycznego.
4. Także widma IR nie dają wprost istotnych informacji o własnościach tribologicznych w warstwach granicznych. Zmiany absorbancji w pasmach absorpcji związków tlenowych to jest w zakresie $1800 - 1500\text{cm}^{-1}$ nie przekładają się na charakterystyczne zmiany własności tribologicznych. Odnoszą się one podobnie jak zmiany parametrów fizykochemicznych do

makroskopowych własności oleju a nie do warstw granicznych.

5. Parametry oceny własności tribologicznych w warunkach tarcia granicznego, takie jak zaproponowane przez Autorów pracy opory tarcia i wytrzymałość granicznej warstwy smarowej na przerwanie nie nadają się do zastosowania jako parametry diagnostyczne z uwagi na dużą czasochłonność i wysokie wymagania w zakresie aparatury pomiarowej, mimo, że dostarczają wiarygodnej informacji o zachowaniu się oleju w węźle tarcia. Należy zatem poszukiwać parametrów z grupy parametrów fizykochemicznych, które cechuje łatwość operacyjna, reprezentatywność i duża wartość informacyjna o zachowaniu się oleju w warunkach tarcia granicznego.
6. Jak wykazują dotychczasowe badania istotne z punktu widzenia konstytuowania warstw granicznych o dużej wytrzymałości na przerwanie i niskich oporach tarcia są właściwości polarne oleju. W tym kierunku powinny zmierzać badania, aby znaleźć parametr, który charakteryzowałby te właściwości. Być może byłby to np. jakiś wskaźnik polarności. W jakimś sensie (pośrednio) o tych właściwościach informuje liczba zasadowa oleju, ale jak pokazują badania nie zawsze to się sprawdza. Nie stwierdzono istnienia istotnego związku pomiędzy zmianami liczby zasadowej i własnościami tribologicznymi. Lepiej o zmianach własności tribologicznych informuje pośrednio poprzez pomiar własności elektrycznych oleju wskaźnik LUBRI-SENSOR.

Literatura

- [1] Olszewski, W., Maciąg, A., i in., *Badanie wpływu stopnia przepracowania syntetycznego oleju silnikowego na parametry tarcia*, Praca własna nr 1919/07/B, Politechnika Radomska 2001.
- [2] Olszewski, W., Maciąg, A., i in., *Badanie właściwości tribologicznych olejów silnikowych z eksploatacji w warunkach zmiennych wymuszeń*, Praca statutowa nr 1979/07/P, Politechnika Radomska 2002, Etap I.
- [3] Olszewski, W., Maciąg, A., i in., *Badanie właściwości tribologicznych olejów silnikowych z eksploatacji w warunkach zmiennych wymuszeń*, Praca statutowa nr 1979/07/P, Politechnika Radomska 2003, Etap II.
- [4] Olszewski, W., Maciąg, A., i in., *Badanie wpływu rodzaju paliwa na własności tribologiczne olejów silnikowych z eksploatacji w warunkach zmiennych wymuszeń*, Praca statutowa nr 2137/24/P, Politechnika Radomska 2004, Etap I.
- [5] Maciąg, A., Olszewski, W., *Proces „docierania” oleju silnikowego w czasie eksploatacji*, *Tribologia* 3/2004 (195).
- [6] Olszewski, W., Maciąg, A., i inni., *Badania wpływu rodzaju paliwa na własności tribologiczne olejów silnikowych z eksploatacji w warunkach zmiennych wymuszeń*, Praca statutowa nr 2137/24/P, Politechnika Radomska 2005, Etap II.
- [7] Olszewski, W., Maciąg, A., i inni., *Badania wpływu rodzaju paliwa na własności tribologiczne olejów silnikowych z eksploatacji w warunkach zmiennych wymuszeń*, Praca statutowa nr 2137/24/P, Politechnika Radomska 2006, Etap III - *Badania własności tribologicznych oleju silnikowego z eksploatacji w silniku zasilanym benzyną*.

