

Krzysztof WIERZCHOLSKI*

CHARAKTERYSTYKI RESURSU OLEJÓW DLA SMAROWANYCH POŁĄCZEŃ TARCIOWYCH

CHARACTERISTICS OF OIL REGENERATION FOR LUBRICATED FRICTIONAL CONNECTIONS

Słowa kluczowe:

odnowa, resurs, oleje, nienewtonowskie oleje, inhibitory, czas eksploatacji, degeneracja oleju, emisja akustyczna

Key words:

oil renovation, non-newtonian oils, inhibitors, operation time, oil deterioration, acoustic waves

Streszczenie

W trakcie eksploatacji połączeń tarciovych w czynniku smarującym zachodzą procesy fizykochemiczne powodujące zmiany podstawowych własności oleju, takich jak lepkość i smarność. Zmiany te powstają na skutek wzajemnego oddziaływania elementów układu smarującego i mają często charakter trwały. Efekt degradacji oleju polega między innymi na spadku jego lepkości i decyduje o jego przydatności w procesie użytkowania. Specyfika zanieczyszczenia olejów silnikowych polega na ciągłym gromadzeniu się w nich zanie-

* Politechnika Koszalińska, Wydział Technologii i Edukacji, ul. Śniadeckich 2, 75-453 Koszalin, Polska, tel.+48 94 3478344, fax: +48 94 3426753, e-mail: krzysztof.wierzcholski@wp.pl.

czyszczeń, ponieważ układy smarowania są układami o obiegu zamkniętym. Intensywność zanieczyszczenia oleju silnikowego zależy między innymi od takich czynników jak: stan techniczny i warunki eksploatacji silnika, rodzaj i stan układu filtracji, rodzaj stosowanego oleju i ilość inhibitorów. Niniejsza praca podaje metody remodelingu i odnowy olejów smarujących węzły tarcia ślizgowego na bazie kilku charakterystyk uzyskanych w trakcie badań doświadczalnych. Przedstawione zostaną tak zwane wewnętrzne i zewnętrzne charakterystyki. Do wewnętrznych charakterystyk należą między innymi zmiany lepkości dynamicznej wynikające z własności nienewtonowskich olejów oraz powiązane z nimi zmiany reologiczne oleju w trakcie czasu trwania eksploatacji. Do zewnętrznych charakterystyk zaliczyć można skutki oddziaływania pola elektromagnetycznego i działania fal akustycznych.

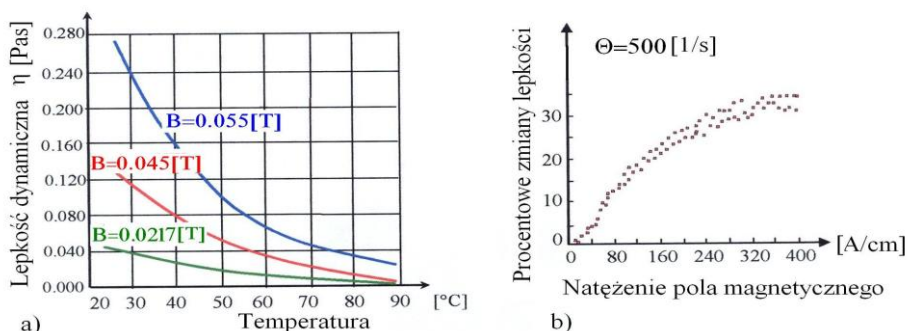
WPROWADZENIE

Praca porusza i omawia bardzo istotny problem dotyczący zmian właściwości olejów smarujących pod kątem ich odnowy w połączeniach tarciovych z uwzględnieniem parametrów eksploatacji maszyn. W zakresie smarowania połączeń tarciovych jedną z podstawowych cech oleju jest jego lepkość i smarność. Lepkość jest sumą tarć wewnętrznych pomiędzy cząsteczkami oleju w trakcie smarowania, natomiast smarność jest zdolnością oleju do wytworzenia trwałej warstewki granicznej zalegającej na powierzchni smarowanej oraz niezbędnej do prawidłowego realizowania procesu smarowania. Zwiększenie lepkości oleju powoduje wzrost ciśnienia hydrodynamicznego oraz wzrost wartości siły nośnej połączenia tarciovego, który jest korzystny dla łożysk. Wzrost lepkości oleju powoduje również pewien wzrost sił tarcia w węzłach tarcia, który jest korzystny dla sprzęgieł, a niekorzystny dla łożysk.

Problem starzenia i degradacji olejów związany z utratą jego lepkości wywołanej między innymi zanieczyszczeniami, warunkami eksploatacji silnika, rodzajem i stanem układu filtracji, wadliwym sposobem wymiany oleju w trakcie długotrwałego procesu eksploatacji był rozpatrywany w pracach [L. 1–4]. Problem związany ze zwiększeniem utraconej lepkości za pomocą pola elektromagnetycznego ilustrują prace [L. 5, 6]. Zwiększenie lepkości czynnika smarującego mikrołożyska za pomocą nanododatków oraz możliwość powiększenia wartości lepkości i renowację oleju w szczelinach łożysk poprzez działanie fal emisji akustycznej oraz dodatków polimerowych przedstawiają prace [L. 7–9]. Tak więc charakterystyki zmian lepkości oleju należy dostosowywać w zależności od przeznaczenia eksploatacyjnego czynnika smarującego. Omówimy teraz szczegółowo kilka istotnie ważnych charakterystyk oleju pod kątem zwiększenia jego lepkości implikującej trwałość, odnowę i resurs czynnika smarującego.

CHARAKTERYSTYKA LEPKOŚCI OLEJU Z DODATKAMI CHEMICZNYMI I ZANIECZYSZCZENIAMI

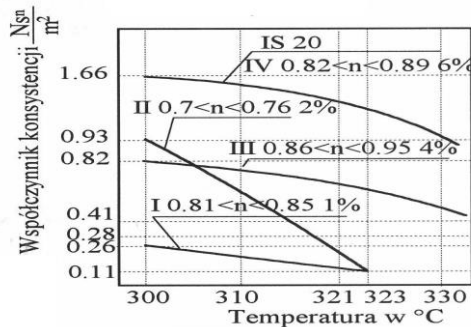
Jako pierwszą charakterystykę wymienimy nie newtonowskie właściwości oleju. Oleje zyskują właściwości nienewtonowskie na ogół z powodu dwu przyczyn. Pierwszą przyczyną jest dodanie do olejów wszelkiego rodzaju dodatków uszlachetniających, między innymi dodatków polimerowych lub nanocząsteczek ferromagnetycznych przy oddziaływaniu pola indukcji magnetycznej, a także przy zmieniających się temperaturach. Takie dodatki wiążą się najczęściej ze wzrostem lepkości dynamicznej. Zmiany lepkości pokazano na **Rys. 1a, b** i **Rys. 2**. Na **Rys. 2** pokazano pomierzone wartości lepkości dynamicznej oleju dla kolejnych prób I, II, II, IV odpowiadające kolejno 1, 2, 4, 6% dodatków polimerowych. Dane dla prób I, II pochodzą z japońskich badań [L. 10], natomiast dane dla prób III, IV zostały zaczerpnięte z białoruskich badań autora w ramach aktualnie prowadzonego grantu IRSES [L. 11].



Rys. 1. Przykładowe zmiany lepkości dynamicznej ferrocieczy: a) ze zmianą temperatury i indukcji pola magnetycznego według R.E. Rosensweiga, R. Kaisera, G. Miskolczy, *Journal of Colloid & Interfacial Science* 4, 1969, pp. 680; b) ze zmianą indukcji pola magnetycznego dla określonej prędkości deformacji na podstawie badań K. Melznera, J. Fleischera, S. Odenbacha, *Magneto hydrodynamics*, Vol. 37, No. 3, 2001, pp. 285

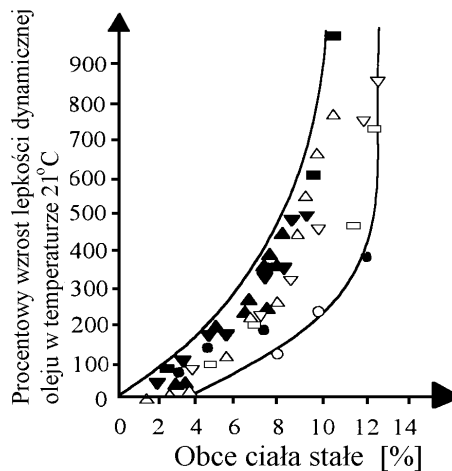
Fig. 1. The influence of the magnetic induction field in [T] versus temperature in °C on the dynamic coefficient of viscosity in cP for the oil with ferromagnetic additives

Na **Rys. 2** jest widoczne, że prędkość spadku lepkości oleju ze wzrostem temperatury zależy od rodzaju inhibitorów. Dla różnych czynników smarujących lepkość dynamiczna oleju maleje niejednakowo ze wzrostem temperatury, a temperatura od chwili rozruchu silnika aż do pełnej zdolności eksploatacyjnej węzła tarcia najczęściej rośnie. Dlatego też w badaniach dotyczących przydatności oleju do jego odnowy w aspekcie smarowania połączeń tarciovych należy uwzględniać zmiany lepkości w czasie czasu trwania eksploatacji w zakresie różnych możliwych temperatur.



Rys. 2. Wpływ różnych ilości dodatków polimerowych dających różne własności nieneutonowskie oleju przy uwzględnieniu zmian temperatury na wartość współczynnika konsystencji odpowiednika lepkości dynamicznej dla newtonowskiego ($n = 1$) czynnika smarującego

Fig. 2. The influence of various polymer additives denoting various non-newtonian oil properties versus temperature changes, on the consistency coefficient corresponding to the dynamic viscosity for classical newtonian oil ($n = 1$)



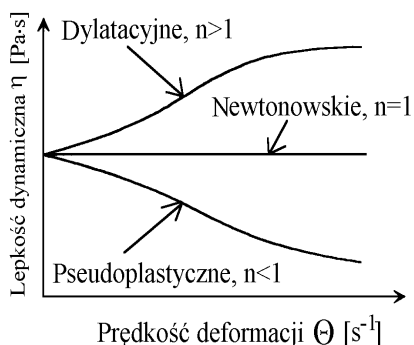
Rys. 3. Wpływ zanieczyszczeń w postaci obcych ciał sprężystych, takich jak sole ołowiu, produkty spalania na procentowy wzrost lepkości dynamicznej oleju SAE W-50 przy ustalonej temperaturze 21°C, gdzie: \blacktriangledown ustalone sole ołowiu, \bullet ustalone produkty spalania, \triangle ∇ płynne sole ołowiu, \circ \square - płynne produkty spalania według D. Wisusska i A. Reglitzkyego

Fig. 3. The influence of the oil impurities in the form of elastic bodies such as salt leads, combustion products on the percentage dynamic viscosity increments of the oil SAE W-50 for the constant temperature 21°C, where are denoted: \blacktriangledown salt leads elastic bodies, \bullet elastic bodies of combustion products, \triangle ∇ liquids of salt leads, \circ \square - liquids of combustion bodies after D. Wissussek and A. Reglitzky

Inną przyczyną powstawania nienewtonowskich właściwości są liczne i rozmaite zanieczyszczenia oleju w trakcie trwania procesu eksploatacyjnego. Olej zostaje zanieczyszczony solami ołowiu, sadzami, produktami spalania itp., które to dodatki powodują, że czysty olej o właściwościach newtonowskich na początku pracy zmienia się w krótkim okresie na olej binghamowski, pseudoplastyczny lub czasem dylatacyjny o właściwościach nienewtonowskich [L. 12]. Właściwości nienewtonowskie zmieniają lepkość oleju z lepkości klasycznej na lepkość pozorną (apparent viscosity), która w zależności od zanieczyszczeń jest mniejsza, a czasami nawet trochę większa od klasycznej lepkości. W tym miejscu tkwi poważny niewyjaśniony do końca problem badawczy. Wyniki badań uzyskane przez autora w ramach współpracy z GH Essen oraz Hochschule Giessen-Friedberg pokazano na **Rys. 3**.

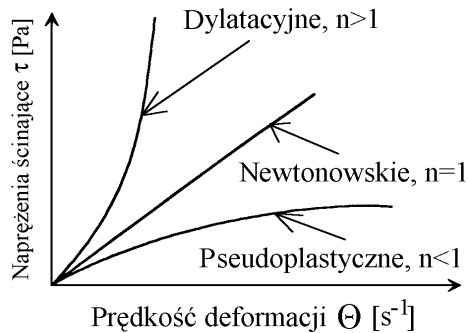
PRĘDKOŚĆ DEFORMACJI PRZEPLYWU JAKO CHARAKTERYSTYKA LEPKOŚCI OLEJU

Ważną charakterystyką oleju w aspekcie jego odnowy jest uwzględnienie wpływu prędkości deformacji w zakresie różnych temperatur (uzależnionej od prędkości w trakcie przepływu) na jego lepkość pozorną. Należy wyraźnie podkreślić, że ten problem jest istotny tylko dla olejów o nienewtonowskich właściwościach, a rozpatrywane w niniejszej pracy zanieczyszczone oleje właśnie takie własności posiadają. Oleje klasyczne o właściwościach newtonowskich nie zmieniają swojej lepkości ze zmianą prędkości deformacji. Ten problem zilustrowano na **Rys. 4–6**.



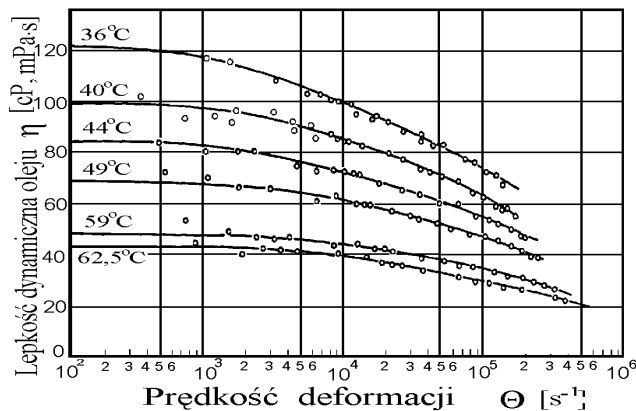
Rys. 4. Wpływ prędkości deformacji dla przepływów dylatacyjnych ($n > 1$) i pseudoplastycznych ($n < 1$) olejów o własnościach nienewtonowskich na lepkość dynamiczną czynnika smarującego

Fig. 4. The flow shear rate influence for pseudo-plastic and dilatation non Newtonian oils on the dynamic viscosity coefficient of the lubricant



Rys. 5. Wpływ prędkości deformacji dla przepływu dylatacyjnych i pseudoplastycznych olejów o własnościach nienewtonowskich na naprężenia ścinające w trakcie przepływu czynnika smarującego

Fig. 5. The flow shear rate influence for pseudo-plastic and dilatation non newtonian oils on the shear stresses during the lubricant flow



Rys. 6. Wpływ prędkości deformacji dla przepływu oleju SAE W-50 przy temperaturach w zakresie od 36 do 63°C na spadek lepkości dynamicznej czynnika smarującego

Fig. 6. The flow shear rate influence for oil SAE W-50 in temperature interval from 36 to 63°C on the lubricant dynamic viscosity decreases

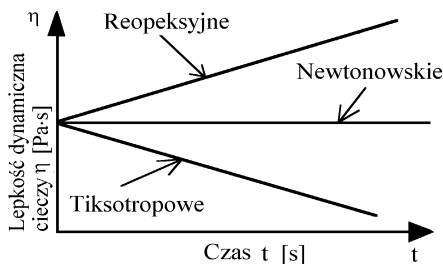
Utraconą lepkość oleju w trakcie przepływu smarującego, czyli ze wzrostem prędkości deformacji przepływu pokazaną na **Rys. 6** można rekompensować inhibitorami cieczowymi o właściwościach dylatacyjnych, które zwiększają lepkość dynamiczną ze wzrostem prędkości deformacji ilustrowaną na **Rys. 4**. Na **Rys. 6** pokazano również własność oleju SAE W-50 ilustrującą zmniejszanie się spadku lepkości ze wzrostem prędkości deformacji wraz ze wzrostem temperatury od 36 do 63°C.

CZAS EKSPLOATACJI JAKO CHARAKTERYSTYKA W ASPEKTCIE ODNOWY LUB STARZENIA OLEJU

Następną charakterystyką eksploatacyjną oleju jest jego starzenie oraz problem regeneracji w zależności od charakteru nienewtonowskich właściwości oleju. Charakterystyka ta wiąże się ze zmianą lepkości oleju wyłącznie w czasie trwania eksploatacji. Problem spadku lepkości w czasie, czyli problem starzenia się oleju, podejmowany jest w licznych pracach badawczych. Warto by tu zwrócić uwagę na problem odnowy oleju, czyli proces odwrotny do starzenia, zwany procesem regeneracji polegający na wymuszonym wzroście lepkości oleju w czasie.

Na **Rys. 7** przedstawiono dwa typy olejów, a mianowicie najczęściej spotykane oleje tiksotropowe oraz rzadko spotykane lub odpowiednio produkowane oleje reopeksyjne. W powszechnie spotykanych olejach o właściwościach tiksotropowych lepkość dynamiczna maleje w czasie trwania eksploatacji.

Proces ten nazywamy starzeniem oleju. Ciecze o właściwościach reopeksyjnych zwiększają lepkość w czasie eksploatacji. Ciecze takie dodawane jako inhibitory do cieczy klasycznych spowalniają ich starzenie, czyli zmniejszają spadki lepkości w trakcie procesu eksploatacji.



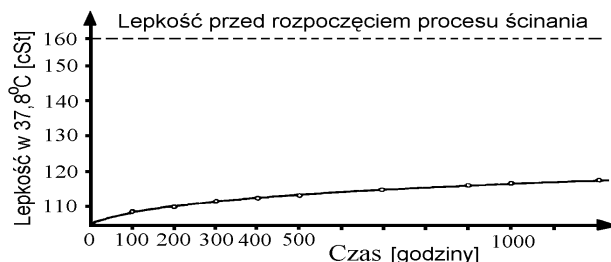
Rys. 7. Wpływ czasu eksploatacji tiksotropowych (reopeksyjnych) nienewtonowskich czynników smarujących na spadki (wzrosty) lepkości dynamicznej oleju

Fig. 7. The time of operation influence of non-newtonian thixotropic (rheotropic) lubricants on the increments (decrements) of the dynamic viscosity

Dodatkami o reopeksyjnych właściwościach są między innymi pewne typy polimerów. Efekt pomiaru lepkości kinematycznej oleju z 5% dodatkiem reopeksyjnego inhibitora został pokazany na **Rys. 8**. Uwidoczniono na nim wzrost lepkości dynamicznej oleju z dodatkiem inhibitora przy ustalonej temperaturze w czasie eksploatacji wyrażonym w godzinach.

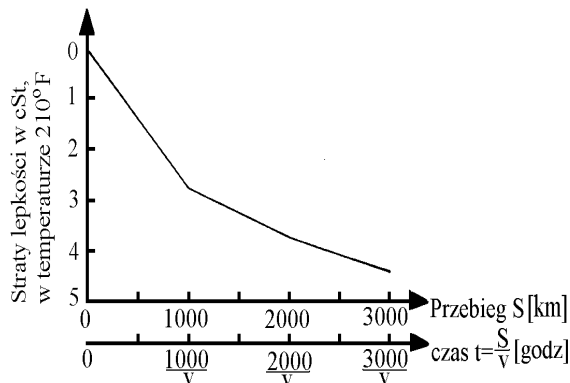
Badania regeneracji oleju w czasie jego eksploatacji były już rozpoczęte w Niemczech przez W.J. Barta i D. Wissuska [**L. 13, 14**]. Wyniki tych badań zostały aktualnie potwierdzone w ramach grantu EU [**L. 11**] we współpracy z Instytutem Heat and Mass Transfer Białoruskiej Akademii Nauk. Dla przy-

kładu pokazany został na **Rys. 9** spadek lepkości czystego oleju, który uprzednio po dodaniu odpowiednich dodatków wykazywał na **Rys. 8** wzrost lepkości w trakcie procesu eksploatacji. Przebieg spadku lepkości kinematycznej takiego klasycznego oleju o właściwościach tiksotropowych wraz z przebiegiem czasu wyrażonym w godzinach dla ustalonej wartości temperatury pokazano na **Rys. 9**. Spadek lepkości jest w przybliżeniu liniowy i bardziej intensywny w czasie przebiegu pierwszego 1000 km dla Fiata 124.



Rys. 8. Wpływ czasu regeneracji zużytego oleju na wzrost jego lepkości kinematycznej od 83,1 cSt do 120 cSt przy ustalonej temperaturze 37,8°C według D. Wissuska i M. Freuda przy 5% dodatku Poly-etyl- meta-crylatu dla przepływu ścinającego o 600 cyklach [L. 9]

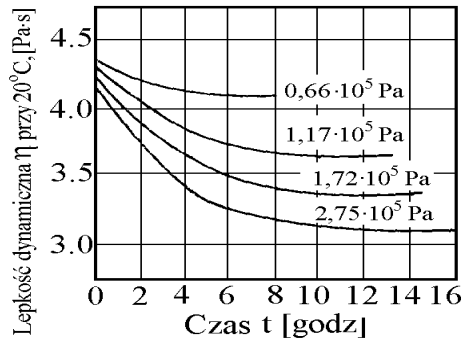
Fig. 8. The time of regeneration influence of the used oil on the cinematic viscosity in interval from 83.1 cSt to 120 cSt for constant temperature 37.8°C and for 5% polymer (Poly-meta-crylate) additive and flow of 600 cycles after D. Wissussek and M. Freuda [L. 9]



Rys. 9. Wpływ przebytej drogi w kilometrach odniesionej do czasu jazdy w godzinach przy zadanej prędkości v Fiata 124 na utracone wartości lepkości kinematycznej w cSt dla oleju smarującego łożyska w temperaturze 90°C (210°F)

Fig. 9. The time of running (quotient of the way S per velocity v of the Fiat 124) influence on the cinematic viscosity decrements in cSt for oil during the bearing lubrication with temperature 90°C (210°F)

Na **Rys. 10** pokazano, że tempo spadku lepkości dynamicznej oleju o właściwościach tiksotropowych przy ustalonej temperaturze wzrasta ze spadkiem naprężeń ścinających od 275 000 Pa do 66 000 Pa. Jednocześnie pokazano, że dodany do oleju opisany inhibitor polimerowy o właściwościach reopeksyjnych łagodzi spadki lepkości dynamicznej oleju po około 10 godzinach trwania eksploatacji czynnika smarującego.



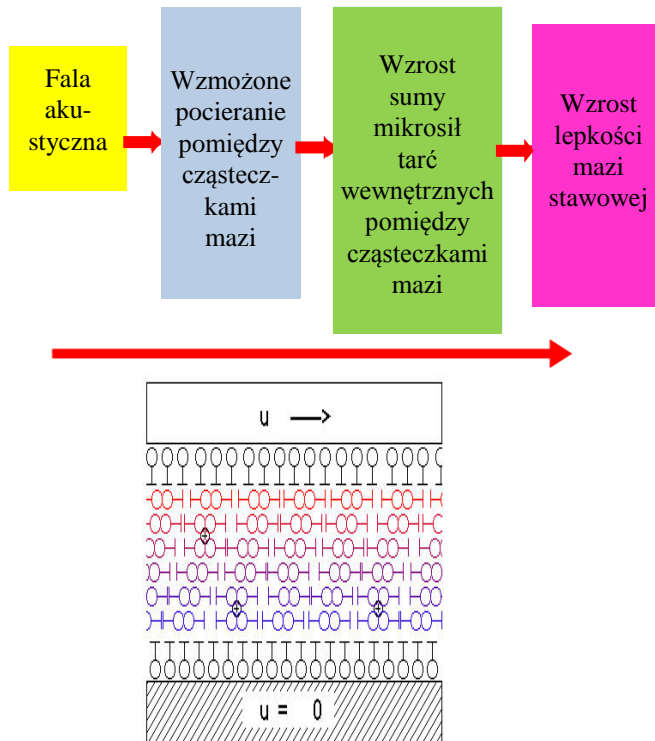
Rys. 10. Wpływ czasu eksploatacji w godzinach na spadek lepkości dynamicznej oleju smarującego łożyska z dodatkiem poliizobutyleny o masie cząsteczkowej 21000 przy ustalonej temperaturze 20°C oraz przy różnych wartościach naprężeń ścinających w zakresie od 66000 Pa do 275 000 Pa

Fig. 10. The influence of operating time in hours on the dynamic oil viscosity increments during the bearing lubrication using poly-isobutylene additives with the formula 21000, for constant temperature 20°C and for various shear tangential stresses in interval from 66000 Pa to 275 000 Pa

REGENERACJA A DIAGNOZA AKUSTYCZNA

W przeprowadzonych badaniach naukowo-doświadczalnych autora stwierdzono, że emisją fal akustycznych można diagnozować zmiany lepkości oleju w trakcie smarowania. Wzajemne ocieranie się cząsteczek oleju identyfikujące lepkość oleju jest sygnalizowane falą emisji akustycznej. Jest to tak zwana diagnoza lepkości czynnika smarującego przeprowadzona metodą emisji akustycznej.

Tak więc jest możliwy proces odwrotny do diagnozowania lepkości będący procesem zwiększania lepkości poprzez działanie fal akustycznych. Proces ten polega na tym, że fala akustyczna generowana poprzez odpowiednie aplikatory i skierowana na badany olej powoduje dodatkowy proces wzajemnego pocierania się nanocząsteczek oleju, a więc zwiększa jego lepkość. Tak opisany proces odwrotny pokazany na **Rys. 11** stanowi regenerację oleju za pomocą fal akustycznych.



Rys. 11. Proces odwrotny do diagnozy emisją akustyczną jako odnowa akustyczna polegająca na wzroście lepkości oleju powodowanym wzrostem natężenia fal akustycznych: a) implikacja logiczna, b) molekularne uzasadnienie. Symbol \oplus oznacza miejsca, w których fala akustyczna wywołuje styk i pocieranie się dwu molekul powodujące wzrost lepkości oleju

Fig. 11. The reciprocal process with regard to AE diagnosis as the AE renovation phenomenon of dynamic viscosity increases in the lubricant caused by intensity of acoustic waves increases: a) logical implications, b) molecular substantiation. The \oplus - symbols are marking the places in which an elementary acoustic wave provokes the bumping of two molecules and generates the friction effect connected with the dynamic viscosity increments

WNIOSKI

Lepkością czynnika smarującego można sterować od wewnątrz i od zewnątrz.

Jedną z najbardziej powszechnych metod sterowania od wewnątrz na zwiększenie lepkości czynnika smarującego jest dozowanie odpowiednich inhibitorów i olejów jako dodatków powodujących takie nienewtonowskie właściwości czynnika smarującego, które zwiększają lepkość i smarność.

Zwiększenia lepkości czynnika smarującego od zewnętrznej strony można dokonać poprzez obwody pola elektromagnetycznego w otoczeniu węzła tarcia.

Możliwą, lecz niestosowaną do tej pory, metodą sterowania lepkością od zewnątrz jest również działanie fal emisji akustycznej generowanej poprzez odpowiednie urządzenia.

LITERATURA

1. Mruk A.: Wpływ obecności sadzy w oleju silnikowym na jego własności tribologiczne, *Czasopismo Techniczne. Mechatronika*, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, z.-7M/2008, s. 251–263.
2. Laber S., Laber A., Cedro K.: Badania w zakresie nowej technologii wymiany oleju w silnikach spalinowych, *Problemy Maszyn Roboczych*. Zeszyt 15. ITeE, Radom 2000.
3. Oleksiak S. Łukasik, Z.: Nowoczesne układy wtrysku paliwa w silnikach Diesla i ich wpływ na jakość paliw i dodatków detergentowo-dyspergujących, *Nafta-GAZ* 65 nr 1, Kraków 2009, s. 58–64.
4. Pytko S., Wierzcholski K.: Calculation of cylindrical slide bearing lubricated by non Newtonian characteristics oils. (in Polish). Obliczenia walcowych łożysk ślizgowych smarowanych olejami o własnościach nienewtonowskich. *Exploitation Problems of Machines Polish. Academy. of Sciences. (Zag. Eksploatacji Maszyn Kw. PAN)*, z. 4, (84), vol. 25, 1990, pp. 383–391.
5. Bharat Bhushan: Nano-tribology and nano-mechanics of MEMS/NEMS and BioMEMS, BioNEMS materials and devices. *Microelectronic Engineering* 84, 2007, pp. 387–412.
6. Wierzcholski K.: Magneto-hydrodynamic, ferrohydrodynamic bearing computations. *Communication. Sixth International Conference of Magnetic Fluids, Paris, July 20–24, 1992, Abstracts P6/17*, pp. 532–533.
7. Wierzcholski K., Miszczak A., Khudoley A.: Measurement of non used micro-bearing occurring in computer HDD Seagate Barakuda. *Journal of Kones Powertrain and Transport, Warsaw 2011, Vol. 18, No. 2*, pp. 477–482.
8. Ziegler B., Wierzcholski K., Miszczak A.: A new measurements method of friction forces regarding slide journal bearing by using acoustic emission-Continuation. *Nowe pomiary sił tarcia w łożyskach ślizgowych przeprowadzone metodą emisji akustycznej. Kontynuacja. Tribologia*, 2010, 1 (229), pp. 149–156.
9. Freud M. at all: Rheologische Eigenschaften der mit Polymerzusätzen legierten Motorenschmieröle, *Schmieretechnik* 11, 151/156, 1965.
10. Wada Sanae, Hayashi Hirotsugu: Hydrodynamic Lubrication of Journal bearing by Pseudoplastic Lubricants, *JSME* 1(69), pp. 268–286, 1971.
11. Towards Intelligent Micro-Bearing, UE Grant IRSES, 612593, 2013–2016.
12. Reglitzky A.A., Allen R.L., Calow J.R.B.: Neue Fortschritte in der Entwicklung von Ölen für Schnelllaufende Dieselmotoren. *Mineralöltechnik* 18, 13/14, 1/40, 1973.
13. Bartz W.J., Wissussek D.: Experimentelle Untersuchungen zur Scherempfindlichkeit moderner Meherbereichmotoröle, *VDI-Ber*, Nr. 177, 71/83, 1972.
14. Ferguson J., Kembłowski Z.: Reologia stosowana płynów, Wydawnictwo Marcus sc. Łódź 1995.

PODZIĘKOWANIE

This paper was supported by UE Grant IRSES,612593, 2013-2016.

Summary

During the lubrication of frictional connections, physical and chemical processes causing changes in the fundamental properties of oil, such as lubricity and viscosity, take place. Such changes are from mutual interactions of the considered lubrication system and have a permanent state. The effect of the oil degradation denotes the decrement of oil viscosity, which denotes the decrease in the usability of the oil in lubrication process. Motor oil contamination denotes the continuous accumulation of impurities, because the lubrication system works in a closed circuit. Motor oil contamination intensity depends on the following: the technical state, operational conditions, the kind of filtration, the kind of the lubricant, the volume of inhibitors, and others. The paper shows the methods of oil remodelling for sliding frictional nodes based on some characteristics obtained during the experimental performances. This paper also presents the internal and external characteristics already mentioned. The internal characteristics include the changes of oil viscosity for non-Newtonian oil properties connected with the rheology features during the operational time. The external characteristics include the electro-magnetic field and acoustic waves.