

Adam CZABAN*, Andrzej MISZCZAK*

WYZNACZANIE WSPÓŁCZYNNIKÓW PSEUDOLEPKOŚCI OLEJÓW SILNIKOWYCH

DETERMINING THE COEFFICIENTS OF THE PSEUDO-VISCOSITY OF ENGINE OILS

Słowa kluczowe:

współczynniki pseudolepkości, ciecze nienewtonowskie, model Rivlina-Ericksena, lepkość pozorna, prędkość ścinania

Key words:

pseudo-viscosity coefficients, non-Newtonian fluids, Rivlin-Ericksen model, apparent viscosity, shear rate

Streszczenie

Do analizy hydrodynamicznego smarowania łożysk ślizgowych olejami nienewtonowskimi o właściwościach lepkosprężystych często stosuje się równanie konstytutywne typu Rivlina-Ericksena. Podczas analizy oleju o modelu Rivlina-Ericksena niezbędna jest znajomość współczynnika lepkości η oraz współczynników pseudolepkości α , β , γ .

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań współczynnika lepkości dynamicznej i współczynników pseudolepkości dla kilku olejów silnikowych. Współczynniki pseudolepkości oszacowano metodą prezentowaną przez

* Akademia Morska w Gdyni, ul. Morska 81/87, 81-225 Gdynia.

prof. K. Wierzcholskiego w publikacjach naukowych. Metoda ta polega na wyznaczeniu eksperymentalnym krzywych lepkości w szerokim zakresie prędkości ścinania. Kolejnym etapem jest opisanie tych krzywych formułą matematyczną i obliczenie pomocniczych współczynników. Ostatnim etapem jest wyznaczenie współczynników pseudolepkości z wykorzystaniem formuł podanych w literaturze przy znajomości wcześniej wyznaczonych współczynników i lepkości dynamicznej dla bardzo małych i bardzo dużych prędkości deformacji.

WPROWADZENIE

W ostatnich latach można zaobserwować coraz większy udział stosowania olejów półsyntetycznych i syntetycznych w procesie smarowania węzłów tarcia ślizgowego. Oleje te charakteryzują się nienewtonowskimi lepkością sprężystymi właściwościami [L. 1].

Nienewtonowskimi olejami nazywa się takie ciecze, w których oprócz klasycznych zależności lepkości oleju od ciśnienia i temperatury występuje dodatkowo zależność lepkości od prędkości deformacji. Większość czynników smarujących jest modyfikowana czy też ulepszana chemicznie, co często powoduje, że mają one właściwości nienewtonowskie. Podobnie ciecze zanieczyszczone np. paliwem, wilgocią, kurzem, sadzą lub też produktami spalania w silniku spalinowym wykazują właściwości nienewtonowskie. Wymienione zanieczyszczenia i dodatki mogą powodować wzrost lub spadek lepkości czynnika smarującego w stosunku do bazowej cieczy smarującej.

Znane są już od dawna różne modele opisujące właściwości cieczy smarujących łożyska ślizgowe. Oprócz klasycznego newtonowskiego modelu stosuje się najczęściej model potęgowy Reintera-Rivlina [L. 2–4] model cieczy o właściwościach plastycznych Bingham [L. 5], model płynu o naprężeniach momentowych [L. 6], model Maxwella dla oleju lepkością sprężystego [L. 7] lub model Rivlina-Ericksena [L. 8–10], a także model opisujący właściwości mikropolarnie [L. 11].

W Polsce teorie niekonwencjonalnego smarowania w krzywoliniowych ortogonalnych układach współrzędnych rozwiązali K. Wierzcholski [L. 4] oraz A. Walicka [L. 12]. Natomiast problem smarowania poprzecznych łożysk ślizgowych ferrocieczami o modelu Rivlina-Ericksena dokonał A. Miszczak [L. 8]. W dostępnej autorom literaturze nie znaleziono wartości współczynników pseudolepkości dla olejów silnikowych czy też ferrocieczy.

Celem niniejszej pracy jest wyznaczenie współczynników pseudolepkości w równaniu konstytutywnym Rivlina-Ericksena dla wybranych nowych i eksploatowanych olejów silnikowych.

MODEL LEPKOŚCI POZORNEJ

Związki fizyczne opisujące właściwości lepkosprężyste w olejach silnikowych można opisać zależnością pomiędzy naprężeniami a współrzędnymi prędkości deformacji, w których występują poszukiwane współczynniki pseudolepkości α , β , γ , a mianowicie [L. 8], [L. 13]:

$$\mathbf{S} = -p\mathbf{I} + \eta\mathbf{A}_1 + \alpha(\mathbf{A}_1)^2 + \beta\mathbf{A}_2 + \gamma(\mathbf{A}_1)^2\mathbf{A}_2 \quad (1)$$

$$\mathbf{A}_1 \equiv \mathbf{L} + \mathbf{L}^T, \mathbf{A}_2 \equiv \text{grad } \mathbf{a} + (\text{grad } \mathbf{a})^T + 2\mathbf{L}^T\mathbf{L} \quad (2)$$

$$\mathbf{a} \equiv \mathbf{L} \mathbf{v} + \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t}, \mathbf{L} \equiv \text{grad } \mathbf{v} \quad (3)$$

gdzie: \mathbf{A}_1 – pierwszy tensor prędkości deformacji w $[s^{-1}]$, \mathbf{A}_2 – drugi tensor prędkości deformacji w $[s^{-2}]$, \mathbf{I} – tensor jednostkowy, \mathbf{L} – tensor gradientu z wektora prędkości $[s^{-1}]$, \mathbf{a} – wektor przyspieszenia $[m \cdot s^{-2}]$, η – współczynnik lepkości dynamicznej $[Pa \cdot s]$, p – ciśnienie hydrodynamiczne $[Pa]$.

Zastąpienie tensorów przez ich ślady tr w członach opisujących lepkosprężyste właściwości cieczy smarującej ma pomijalny wpływ na zmianę naprężeń w przypadku cienkich warstw granicznych. Dlatego też zależność konstytutywną (1) można zapisać w przybliżonej postaci [L. 13]:

$$\mathbf{S} \cong -p\mathbf{I} + \mathbf{A}_1 \left[\eta + \alpha \text{tr}\mathbf{A}_1 + \beta \frac{\text{tr}\mathbf{A}_2}{\text{tr}\mathbf{A}_1} + \gamma \text{tr}\mathbf{A}_1 \text{tr}\mathbf{A}_2 \right] \quad (4)$$

gdzie lepkość pozorna ma następującą postać [L. 13, 14]:

$$\eta_p \equiv \eta + \alpha \text{tr}\mathbf{A}_1 + \beta \frac{\text{tr}\mathbf{A}_2}{\text{tr}\mathbf{A}_1} + \gamma \text{tr}\mathbf{A}_1 \text{tr}\mathbf{A}_2 \quad (5)$$

We wzorze (5) zamiast śladu tensora $\text{tr}\mathbf{A}_1$ można przyjąć wartości prędkości ścinania Θ natomiast za ślad tensora $\text{tr}\mathbf{A}_2$ wartość prędkości ścinania w potęgze drugiej Θ^2 .

W opisie wyników badań doświadczalnych zmian lepkości dynamicznej od prędkości ścinania Θ można przyjąć dwie klasy funkcji opisujące te zmiany [L. 13]:

$$\text{Model I} \quad \eta_p(A, B_b) = \eta_\infty + \frac{\eta_0 - \eta_\infty}{1 + A \cdot \Theta + B_b \cdot \Theta^2 + B_b \cdot \Theta^2} \quad (6)$$

$$\text{Model II} \quad \eta_p(A, B_a) = \eta_\infty + \frac{\eta_0 - \eta_\infty}{1 + A \cdot \Theta + B_a \cdot \Theta^3 + B_a \cdot \Theta \cdot \Theta^2} \quad (7)$$

gdzie: η_o – lepkość dynamiczna dla bardzo małych prędkości ścinania, η_∞ – lepkość dynamiczna dla bardzo dużych prędkości ścinania, A, B_a , B_b – współczynniki.

Dokonując pomiaru lepkości dynamicznej badanego czynnika smarującego dla różnych prędkości ścinania występujących w przewidywanym procesie smarowania, a następnie dokonując aproksymacji uzyskanych wyników doświadczalnych krzywymi (6) lub (7), znajdujemy współczynniki A i B_a lub A i B_b . Wykorzystując metodę wyznaczania współczynników pseudolepkości zaprezentowane w pracy [L. 13] oraz klasę funkcji opisanych wzorem (6) jak również współczynniki A i B_b , można wyznaczyć wartości współczynników α , β , γ z następujących wzorów:

$$\alpha = -\frac{1}{2}A(\eta_o - \eta_\infty) - \frac{1}{2}\sqrt{[A(\eta_o - \eta_\infty)]^2 - 4B_b\eta_o(\eta_o - \eta_\infty)} \quad (8)$$

$$\beta = \frac{1}{4}A(\eta_o - \eta_\infty) - \frac{1}{4}\sqrt{[A(\eta_o - \eta_\infty)]^2 - 4B_b\eta_o(\eta_o - \eta_\infty)} \quad (9)$$

$$\gamma = -\frac{1}{2}(\eta_o - \eta_\infty) B_b \quad (10)$$

Jeżeli wyrażenie podpierwiastkowe we wzorach (8), (9) ma wartość ujemną, wartościami współczynników α , β są moduły liczb zespolonych:

$$\alpha = -\frac{1}{2}\left|A(\eta_o - \eta_\infty) + \sqrt{[A(\eta_o - \eta_\infty)]^2 - 4B_{ab}\eta_o(\eta_o - \eta_\infty)}\right| = \quad (11)$$

$$= -\sqrt{B_{ab}\eta_o(\eta_o - \eta_\infty)}$$

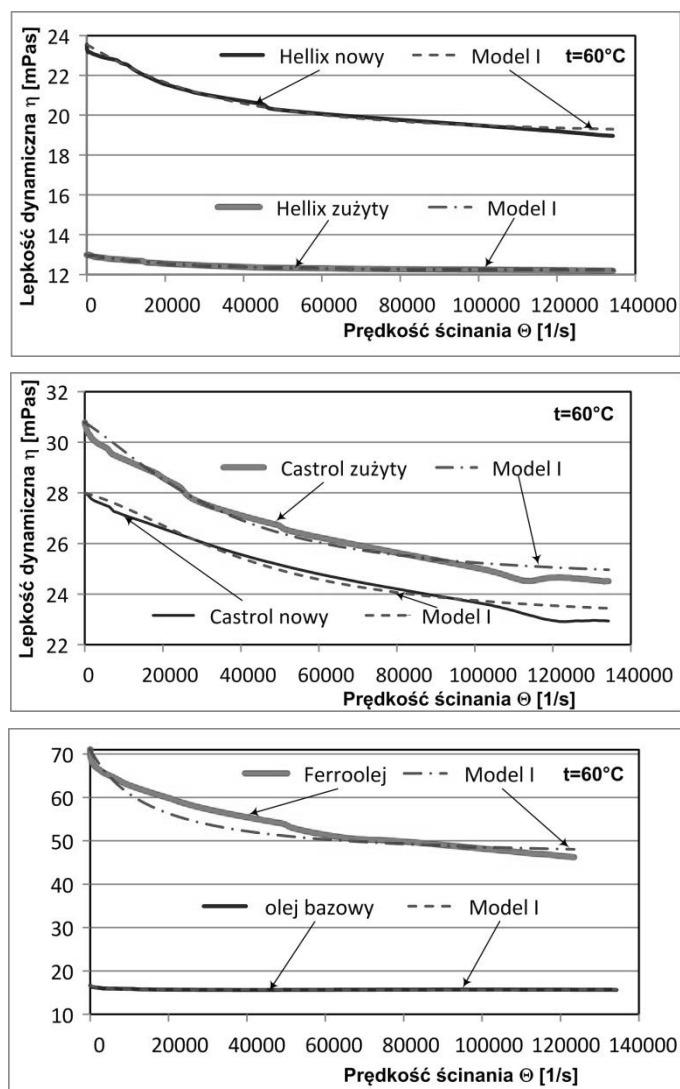
$$\beta = \frac{1}{4}\left|A(\eta_o - \eta_\infty) - \sqrt{[A(\eta_o - \eta_\infty)]^2 - 4B_{ab}\eta_o(\eta_o - \eta_\infty)}\right| = \quad (12)$$

$$= \frac{1}{2}\sqrt{B_{ab}\eta_o(\eta_o - \eta_\infty)}$$

PRZEDMIOT, METODYKA I WYNIKI BADAŃ

Pomiar lepkości dynamicznej w zależności od prędkości ścinania wykonano na reometrze Haake Mars III dla następujących olejów silnikowych nowych i eksploatowanych: Castrol GTX SAE 15W40, Delo[®] 1000 Marine 30, Superol CC-40, Shell Helix Ultra AV-L 5W-30, olej bazowy (SAE 15W40 bez dodatków uszlachetniających) oraz ferrocieczy na bazie oleju mineralnego SAE15W40 o ilości cząstek magnetycznych ok. 1,4% Vol. Pomiar wykonano w temperaturze 60°C w zakresie prędkości ścinania od 10 1/s do 134 000 1/s co 225 1/s. Zastosowano komorę wysokiego ścinania z cylindrami współosiowymi pracującymi w trybie CR (układ pomiarowy typu Searle). Zaprogramowano reometr

tak aby dokonywane zmiany prędkości ścinania i czas trwania pomiaru zapewniły stabilizację temperatury próbki oleju. Wybrane wyniki pomiarów doświadczalnych lepkości dynamicznej wraz z krzywą aproksymującą (6) opisującą te zmiany przedstawiono na **Rys. 1**. Aproksymacji funkcji (6) i wyznaczenia współczynników A oraz B_b dokonano na podstawie otrzymanych wyników doświadczalnych przy wykorzystaniu programu Origin 8.4.



Rys. 1. Krzywe lepkości dla wybranych olejów silnikowych i ferrocieczy
 Fig. 1. Viscosity curves of selected engine oils and ferrofluids

Na dokładność pomiaru współczynnika lepkości dynamicznej olejów i ferrocieczy ma wpływ wiele czynników, między innymi: utrzymywanie stałej temperatury próbki oleju, efekt Weissenberga, sedymentacja cząstek, czas dokonywania pomiaru, złe wypełnienie badanym olejem objętości pomiędzy cylindrami [L. 14]. Autorzy starali się wyeliminować wszystkie możliwe przyczyny błędnego pomiaru lepkości badanych próbek.

Wartości współczynników A i B_b oraz α , β , γ obliczonych na podstawie wzorów (8), (9), (10) zamieszczono w **Tabeli 1**.

Tabela 1. Współczynniki A i B_b oraz współczynniki pseudolepkości α , β , γ

Table 1. The A and B_b coefficients and pseudo-viscosity coefficients α , β , γ

Badany olej	A	B_b	α	β	γ
Castrol GTX nowy	$8,07 \cdot 10^{-6}$	$2,21 \cdot 10^{-10}$	$-1,77 \cdot 10^{-4}$	$8,84 \cdot 10^{-5}$	$-5,58 \cdot 10^{-10}$
Castrol GTX zużyty	$1,61 \cdot 10^{-5}$	$2,96 \cdot 10^{-10}$	$-2,39 \cdot 10^{-4}$	$1,20 \cdot 10^{-4}$	$-9,28 \cdot 10^{-10}$
Delo [®] 1000 Marine nowy	$3,25 \cdot 10^{-5}$	$3,88 \cdot 10^{-10}$	$-2,96 \cdot 10^{-4}$	$1,48 \cdot 10^{-4}$	$-1,26 \cdot 10^{-9}$
Delo [®] 1000 Marine zużyty	$1,20 \cdot 10^{-5}$	$2,18 \cdot 10^{-10}$	$-2,18 \cdot 10^{-4}$	$1,09 \cdot 10^{-4}$	$-6,99 \cdot 10^{-10}$
Superol nowy	$2,17 \cdot 10^{-5}$	$1,83 \cdot 10^{-10}$	$-1,75 \cdot 10^{-4}$	$8,76 \cdot 10^{-5}$	$-4,77 \cdot 10^{-10}$
Superol zużyty	$1,23 \cdot 10^{-5}$	$2,61 \cdot 10^{-10}$	$-1,98 \cdot 10^{-4}$	$9,92 \cdot 10^{-5}$	$-6,02 \cdot 10^{-10}$
Shell Helix Ultra nowy	$2,50 \cdot 10^{-5}$	$2,57 \cdot 10^{-10}$	$-1,67 \cdot 10^{-4}$	$8,33 \cdot 10^{-5}$	$-5,89 \cdot 10^{-10}$
Shell Helix Ultra zużyty	$4,04 \cdot 10^{-5}$	$5,06 \cdot 10^{-10}$	$-7,24 \cdot 10^{-5}$	$3,62 \cdot 10^{-5}$	$-2,02 \cdot 10^{-10}$
Ferrociecz	$6,75 \cdot 10^{-5}$	$1,43 \cdot 10^{-10}$	$-1,51 \cdot 10^{-3}$	$8,38 \cdot 10^{-5}$	$-1,78 \cdot 10^{-9}$
olej bazowy w ferrocieczy	$6,24 \cdot 10^{-4}$	$1,89 \cdot 10^{-9}$	$-6,90 \cdot 10^{-4}$	$-2,36 \cdot 10^{-5}$	$9,75 \cdot 10^{-10}$

WNIOSKI

W pracy dokonano wyznaczenia współczynników pseudolepkości na podstawie badań doświadczalnych. Wpływ błędów pomiarowych oraz niedoskonałość użytego programu do oszacowania współczynników A i B_b mogą mieć wpływ na uzyskane wyniki. Krzywe regresji odzwierciedlające przebieg zmian lepkości ferrocieczy i oleju Castrol nie pokrywają się idealnie z krzywymi lepkości tych olejów.

W dalszych badaniach autorzy proponują wykorzystać kilka różnych programów umożliwiających wyznaczanie krzywych regresji i współczynników A i B_b oraz dokonanie analizy zmian współczynników pseudolepkości od temperatury.

Wyznaczone współczynniki lepkości i pseudolepkości będą wykorzystane w dalszych pracach naukowych. Ich znajomość umożliwi uzyskanie dokładnych rozwiązań numerycznych parametrów przepływowych i eksploatacyjnych podczas rozwiązywania problemu hydrodynamicznego smarowania łożysk ślizgowych olejami oraz ferrocieczami o właściwościach nienewtonowskich.

LITERATURA

1. Jakubiak L., Serdecki W.: Wpływ sprężystych właściwości oleju smarującego na parametry filmu olejowego na gładzi cylindrowej silnika spalinowego. *Journal of Kones Powertrain and Transport*, Vol.7, No. 1–2, 2000, pp.199–206.
2. Böhme G.: *Strömungsmechanik nicht-Newtonscher Fluide*. Teubner Studienbücher Mechanik, Stuttgart 1981.
3. Abdel-Rahman G.M.: Flow of a non-Newtonian power law through a conical bearing in an applied magnetic field. Elsevier, *Applied Mathematics and Computation*, 154, 2004, pp. 237–246.
4. Wierzcholski K.: Teoria niekonwencjonalnego smarowania łożysk ślizgowych. *Prace Naukowe Politechniki Szczecińskiej*, nr 527, Szczecin 1995.
5. Kim J.H., Seireg A.A.: Thermohydrodynamic Lubrication Analysis Incorporating Bingham Model. *Transactions of the ASME, Journal of Tribology*, Vol. 122, 2000, pp.137–146.
6. Ma Y.-Y., Wang W.-H., Cheng X.-H.: A study of dynamically loaded journal bearings lubricated with non-Newtonian couple stress fluids. Springer Verlag, *Tribology Letters*, Vol. 17, No.1, 2004, pp. 69–74.
7. Milne A.A.: Theory of Rheodynamic Lubrication for a Maxwell Fluid, *Conf. on Lubrication and Wear*, Paper 41, London 1957.
8. Miszczak A.: Analiza hydrodynamicznego smarowania ferrocieczą poprzecznych łożysk ślizgowych, Monografia, Fundacja Rozwoju Akademii Morskiej, Gdynia, 2006.
9. Teipel I.: Die räumliche Staupunktströmung für ein viscoelastisches Fluid. *Reologica Acta* 25, 1986, pp. 75–79.
10. Wierzcholski K., Wissussek D.: Presentation of Some Simplifications for hydrodynamic flow of Rivlin Ericksen Lubricant. *Tribologia*, 6 (144), 1995, pp. 653–663.
11. Das S., Guha S.K., Chattopadhyay A.K.: Linear stability analysis of hydrodynamic journal bearings under micropolar lubrication. Elsevier, *Tribology International*, 38, 2005, pp. 500–507.
12. Walicka A.: Reodynamika przepływu płynów nienewtonowskich w kanałach prostych i zakrzywionych. Redakcja Wydawnictw Naukowo-Technicznych, Zielona Góra 2002.
13. Wierzcholski K.: Determination of Pseudoviscosity Coefficients for Viscoelastic Lubricants. *Journal of Kones Powertrain and Transport*, Vol. 17, No. 2, 2010, pp. 491–496.
14. Schram G.: *Reologia. Podstawy i zastosowania*. Ośrodek Wydawnictw Naukowych PAN, Poznań 1998.

Summary

During the operation of the internal combustion engines, lubricating oils wear out. The following has a significant impact on that process wear of engine parts and contact of wearing elements with working oil, the destruction of bonds in the polymer chains of oil and oil additives,

contaminants from the environment, and combustion products. This causes the lubricant to become a non-Newtonian viscoelastic fluid.

A Rivlin-Ericksen constitutive relation can be used in the analysis of slide bearings hydrodynamic lubrication by non-Newtonian viscoelastic oils. In a specific case that relation becomes a Newtonian model. The analysis makes it necessary to know the values of the viscosity coefficient η and also the values of pseudo-viscosity coefficients α , β , γ .

The obtained values of viscosity and pseudo-viscosity coefficients will be used in further studies and analytical and numerical calculations of slide bearings hydrodynamic lubrication by non-Newtonian viscoelastic oils.

Determining the viscosity and pseudo-viscosity coefficients is based on a method suggested by Prof. K. Wierzcholski and involves measuring a viscosity values in wide range of shear rates. The next step in that method is to describe the obtained curves by a mathematical formulae and calculate some required parameters. Finally, taking into account measured values of viscosity for low and high shear rates, pseudo-viscosity coefficients can be calculated.