

Krzysztof WIERZCHOLSKI*, Andrzej MISZCZAK**

ALGORYTM WYZNACZANIA ZMIENNYCH WSPÓŁCZYNNIKÓW PSEUDOLEPKOŚCI OLEJÓW NA BAZIE EKSPERYMENTU

ALGORITHM FOR VARIABLE PSEUDOVISCOSECITY COEFFICIENTS UNDER AN EXPERIMENTAL BASIS

Słowa kluczowe:

związki fizyczne, zmienne współczynniki pseudolepkości, wpływ prędkości deformacji, oleje smarujące

Key words:

physical dependencies, changes of pseudo-viscosity coefficients, share rate influences, lubrication oils

Streszczenie

Obserwuje się coraz większy udział stosowania olejów częściowo i całkowicie syntetycznych w procesie smarowania węzłów tarcia ślizgowego. Oleje te charakteryzują się nienewtonowskimi właściwościami. 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 ulepszanych che-

* Institute of Mechatronics, Nanotechnology and Vacuum Technique, Technical University Koszalin, PL 75-620 Koszalin, ul. Raławicka 15-17, Poland; krzysztof.wierzcholski@wp.pl.

** Gdynia Maritime University, PL 81-225 Gdynia, ul. Morska 81-87, miszczak@wm.am.gdynia.pl.

micznie ma właściwości nienewtonowskie. Podobnie ciecz zanieczyszczona, np. substancjami organicznymi, kurzem ulicznym, sadzą lub też produktami zużycia i 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.

W niniejszej pracy przedstawiona została metoda analityczna wyznaczania zmiennych wartości funkcyjnych współczynników pseudolepkości na podstawie wyników eksperymentalnych dla olejów stosowanych w praktyce inżynierskiej.

WPROWADZENIE

Warto zauważyć, że współczesne syntetyczne oleje smarowe o własnościach nienewtonowskich dobrze spełniają oczekiwania użytkowników w zakresie tarcia i zużycia węzłów tarcia ślizgowego [L. 1–3]. Mamy bowiem wtedy do czynienia z doświadczalnym uwzględnieniem zmiennych współczynników lepkości w modelach fizycznych konkretnie rozpatrywanych olejów.

W dotychczasowej praktyce projektowej posługiwanie się hydrodynamicznymi modelami smarowania dla nienewtonowskich olejów sprowadza się na ogół do przypadkowego regulowania wartości lepkości w trakcie obliczeń, tak aby zbliżyć wartości teoretyczne do wartości uzyskanych na drodze eksperymentalnej. Takie postępowanie pozornie zadowala użytkowników, ale uniemożliwia sterowanie zmianami dodatków zawartych w olejach syntetycznych wiodące do osiągnięcia optymalnych oporów tarcia. W projektowaniu węzłów tarcia należy zatem przyjmować znane fizycznie sprawdzone związki konstytutywne dla olejów nienewtonowskich.

Zależność tę najlepiej opisuje model Rivlina-Ericksena [L. 7–9]. Charakter zmian wartości tych zależności uzyskany na podstawie dokonanych pomiarów lepkości w zależności od prędkości deformacji dla takich olejów jak: Castrol, Shell Helix, Delo 1000 Marine, Superol, Ferrooil wykazały, że dotychczas przyjmowane jako stałe współczynniki pseudolepkości w modelu Rivlina-Ericksena nie mogą być stałe. Uwzględniany model Rivlina-Ericksena formuluje jednocześnie zależność pomiędzy lepkością pozorną a prędkością deformacji, która jest wyróżnikiem wszelkich czynników smarujących o własnościach nienewtonowskich. W związkach tych występują współczynniki pseudolepkości α oraz β charakteryzujące rodzaj czynnika smarującego. W licznych dotychczasowych badaniach współczynniki te przyjmowane były do tej pory jako stałe wartości niezależne od prędkości deformacji [L. 1–5, 8].

Niniejsze badania dotyczące uzmiennienia współczynników pseudolepkości umożliwią optymalne modelowanie, sterowanie i prognozowanie oporów tarcia w trakcie projektowania węzłów tarcia ślizgowego.

Liczne badania doświadczalne w zakresie smarowania łożysk ślizgowych olejami o własnościach nienewtonowskich, a w szczególności badania lepkości czynnika smarującego przy zmieniającej się prędkości deformacji dowodzą, że dla olejów o własnościach lepkosprężystych opis związków konstytutywnych formułą Rivlina-Ericksena spełniającą zależności obiektywności materialnej, dobrze koresponduje z doświadczalnie wyznaczonymi wartościami lepkości tylko w przypadku przyjęcia zmiennych współczynników pseudolepkości [L. 6–7]. Wyniki licznych pomiarów eksperymentalnych pokazane na **Rys. 1** wykazały, że spadek lepkości dynamicznej oleju ze wzrostem prędkości deformacji ma charakter hiperboliczny względem osi wartości prędkości deformacji. Taka geometria zmian wartości lepkości wymaga przyjęcia zmiennych współczynników pseudolepkości w modelu Rivlina-Ericksena.

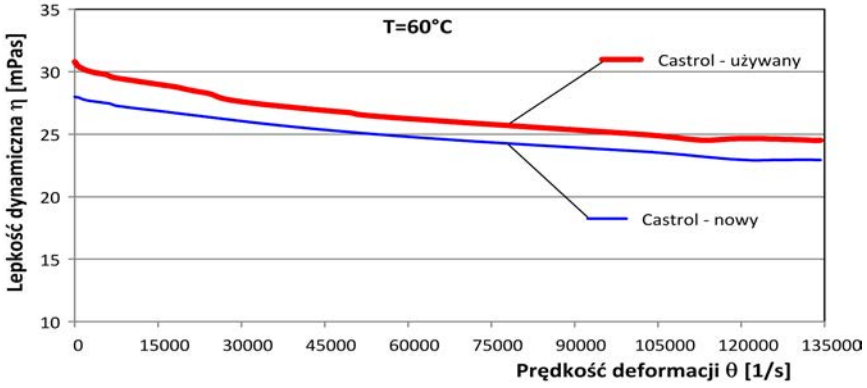
Według informacji autorów uwzględnianie zmiennych współczynników pseudolepkości olejów nie było do tej pory rozpatrywane w dostępnej literaturze łożyskowej [L. 6–10]. Ponieważ uwzględnienie zmian wartości współczynników pseudolepkości olejów od prędkości deformacji może mieć wpływ na badanie parametrów eksploatacyjnych poprzecznych łożysk ślizgowych, dlatego w niniejszej pracy opracowano nową metodę analitycznego wyznaczania wartości współczynników pseudolepkości oraz ich zmian od prędkości deformacji.

WYNIKI POMIARÓW DOŚWIADCZALNYCH LEPKOŚCI DYNAMICZNEJ

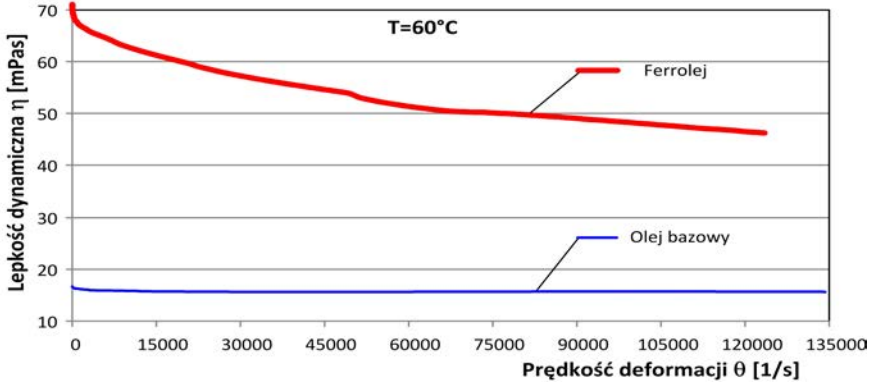
Pomiar lepkości dynamicznej w zależności od prędkości deformacji wykonano na reometrze Haake Mars III dla następujących olejów silnikowych nowych i eksploatowanych: Castrol GTX SAE 15W40, Delo[®]1000 Marine 30, Superol CC-40, Shell Helix Ultra AV-L 5W30, olej bazowy (SAE 15W40 bez dodatków uszlachetniających) oraz ferrocieczy na bazie oleju mineralnego SAE 15W40. Pomiar dokonano dla temperatur 60°C i 90°C.

Zmiany lepkości dynamicznej jako funkcja prędkości deformacji dla wybranych olejów i temperatur 60°C i 90°C przedstawiono na **Rys. 1**. Pomiar wykonano w zakresie prędkości deformacji od 10 s⁻¹ do 135 000 s⁻¹. Zastosowano komorę wysokiego ścinania z cylindrami współosiowymi pracującymi w trybie CR (układ pomiarowy typu Searle). Zaprogramowano reometr tak, aby dokonywane zmiany prędkości deformacji i czas trwania pomiaru zapewniły stabilizację temperatury próbki oleju.

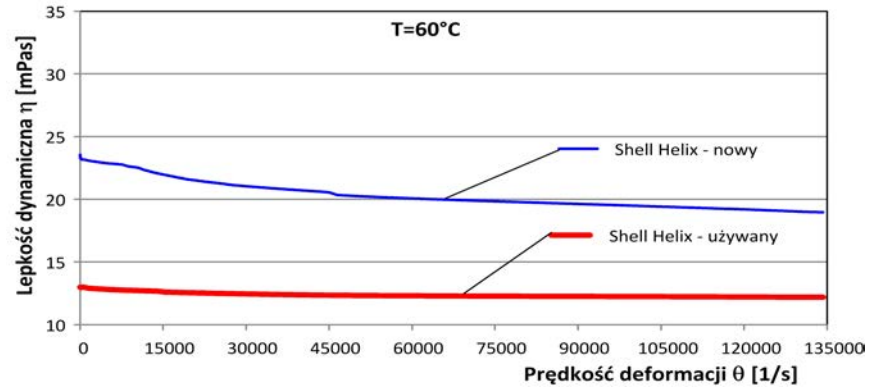
a)



b)

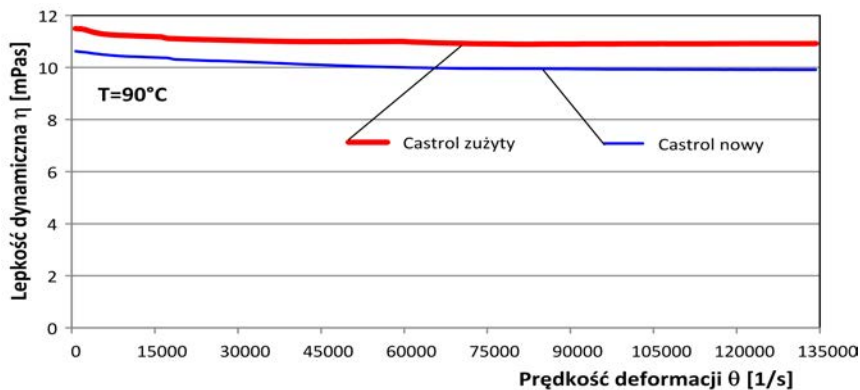


c)

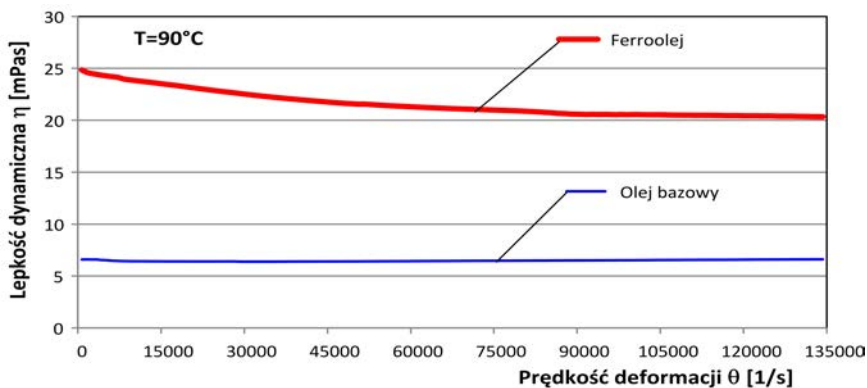


cd. Rys. 1→

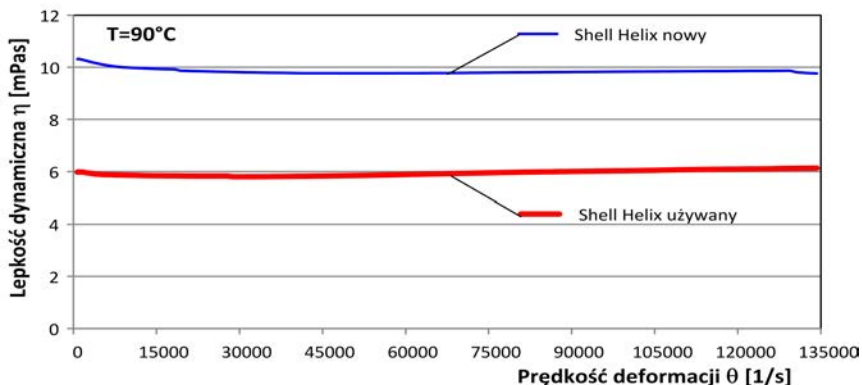
d)



e)



f)



Rys. 1. Lepkość dynamiczna w zależności od prędkości deformacji nowych i używanych olejów smarujących w temperaturze 60°C i 90°C : a), d) Castrol, b), e) olej bazowy i Ferroolej, c), f) Shell Helix

Fig. 1. Dynamic viscosity versus share rate in temperatures 60°C and 90°C for a new and used following oils: a), d) Castrol, b), e) basic oil and Ferrooil, c), f) Shell Helix

ZMODYFIKOWANY MODEL RIVLINA-ERICKSENA

Wykorzystujemy znaną zależność fizyczną pomiędzy naprężeniami a współrzędnymi prędkości deformacji, w których występują poszukiwane współczynniki pseudolepkości, a mianowicie:

$$\mathbf{S} = -p\mathbf{I} + \eta_0\mathbf{A}_1 + \alpha(\mathbf{A}_1)^2 + \beta\mathbf{A}_2 + \gamma(\mathbf{A}_1)^2\mathbf{A}_2 \quad (1)$$

gdzie: $\mathbf{A}_1, \mathbf{A}_2$ – definiowane tensory prędkości deformacji o wymiarze $[s^{-1}]$, $[s^{-2}]$,

α – pierwszy doświadczalny współczynnik pseudolepkości oleju w $[Pas^2]$,

β – drugi doświadczalny współczynnik pseudolepkości oleju w $[Pas^2]$,

γ – trzeci doświadczalny współczynnik pseudolepkości oleju w $[Pas^4]$,

η_0 – lepkość dynamiczna oleju dla małych prędkości deformacji w $[Pas]$,

η_p – lepkość pozorna oleju w $[Pas]$.

Zastąpienie tensorów $\mathbf{A}_1, \mathbf{A}_2$ przez ich wymiar w postaci funkcji prędkości deformacji, czyli $\dim\mathbf{A}_1 = \Theta_1 = \Theta$ oraz $\dim\mathbf{A}_2 = \Theta_2 = \Theta^2$ w członach opisujących lepkość sprężyste właściwości cieczy smarującej ma pomijalny wpływ na zmianę naprężeń w przypadku cienkich warstw granicznych. Dlatego też zależności konstytutywne (1) zapiszemy w następującej przybliżonej postaci:

$$\mathbf{S} \cong -p\mathbf{I} + \mathbf{A}_1 \left[\eta_0 + \alpha \Theta_1 + \beta \frac{\Theta_2}{\Theta_1} + \gamma \Theta_1 \Theta_2 \right] \quad (2)$$

gdzie lepkość pozorna ma następującą postaci:

$$\eta_p \cong \eta_0 + \alpha \Theta + \beta \Theta + \gamma \Theta^3 \quad (3)$$

Geometria krzywych przedstawionych na **Rys.1** uzyskanych dla olejów takich jak Castrol, Hellix, Ferroolej na drodze eksperymentu, opisującego spadek lepkości dynamicznej ze wzrostem prędkości deformacji w przedziale pomiarów od $\Theta_{\min} = 10 \text{ s}^{-1} \approx 0$ do $\Theta_{\max} = 135 \text{ 000 s}^{-1}$ wykazuje, że współczynniki pseudolepkości α, β, γ nie mogą mieć stałych wartości, lecz są funkcjami prędkości deformacji Θ . Tak więc nieznanne zależności $\alpha(\Theta), \beta(\Theta), \gamma(\Theta)$ przyjmujemy najogólniej w postaci następujących klas funkcji matematycznych:

$$\alpha(\Theta) = -\frac{\alpha_0}{1 + A_1\Theta + A_2\Theta^2}, \quad \beta(\Theta) = -\frac{\beta_0}{1 + B_1\Theta + B_2\Theta^2}, \quad \gamma(\Theta) = -\frac{\gamma_0}{1 + C_1\Theta + C_2\Theta^2} \quad (4)$$

α_0 – dodatnia wartość charakterystyczna pierwszego doświadczalnego współczynnika pseudolepkości badanego oleju w [Pas²],

β_0 – dodatnia wartość charakterystyczna drugiego doświadczalnego współczynnika pseudolepkości badanego oleju w [Pas²],

γ_0 – dodatnia wartość charakterystyczna drugiego doświadczalnego współczynnika pseudolepkości badanego oleju w [Pas⁴],

A_1 – współczynnik doświadczalny niezależny od Θ wyrażony w [s],

A_2 – współczynnik doświadczalny niezależny od Θ wyrażony w [s²],

B_1 – współczynnik doświadczalny niezależny od Θ wyrażony w [s],

B_2 – współczynnik doświadczalny niezależny od Θ wyrażony w [s²],

C_1 – współczynnik doświadczalny niezależny od Θ wyrażony w [s],

C_2 – współczynnik doświadczalny niezależny od Θ wyrażony w [s²].

Podstawiając zależności (4) do wzoru (3), uzyskamy:

$$\eta_p \equiv \eta_o - \frac{\alpha_0\Theta}{1 + A_1\Theta + A_2\Theta^2} - \frac{\beta_0\Theta}{1 + B_1\Theta + B_2\Theta^2} - \frac{\gamma_0\Theta^3}{1 + C_1\Theta + C_2\Theta^2} \quad (5)$$

gdzie:

$A_1 > 0, A_2 > 0, B_1 > 0, B_2 > 0, C_1 > 0, C_2 > 0; \alpha_0 > 0, \beta_0 > 0, \gamma_0 > 0$ oraz $\Theta_{\min} < \Theta < \Theta_{\max}$.

Funkcja (5) jest malejąca, jeśli funkcje:

$$\frac{\Theta}{1 + A_1\Theta + A_2\Theta^2}, \quad \frac{\Theta}{1 + B_1\Theta + B_2\Theta^2}, \quad \frac{\Theta}{1 + C_1\Theta + C_2\Theta^2} \quad (6)$$

będą monotonicznie rosnące w przedziale $\Theta_{\min} < \Theta < \Theta_{\max}$. Z rachunku ekstremów funkcji jednej zmiennej wynika, że funkcje (6) osiągają ekstremum maksimum lokalne na prawym końcu rozpatrywanego przedziału, gdy:

$$A_2 = \frac{1}{\Theta_{\max}^2}, \quad B_2 = \frac{1}{\Theta_{\max}^2}, \quad C_2 = \frac{1}{\Theta_{\max}^2} \quad (7)$$

Aby funkcje (6) były monotonicznie rosnące a funkcja (5) monotonicznie malejąca w rozpatrywanym przedziale $\Theta_{\min} < \Theta < \Theta_{\max}$ należy zatem przyjąć:

$$0 < A_2 \leq \frac{1}{\Theta_{\max}^2}, \quad 0 < B_2 \leq \frac{1}{\Theta_{\max}^2}, \quad 0 < C_2 \leq \frac{1}{\Theta_{\max}^2} \quad (8)$$

ANALITYCZNY MODEL OBLICZENIOWY

Porównania wartości obliczonych ze wzoru (5) z wartościami lepkości dynamicznej uzyskanej z doświadczalnych pomiarów dowodzą, że trzeci człon w równaniu (5) ma znikomą wpływ na wartość lepkości dynamicznej. Tak więc lepkość dynamiczną modelujemy ostatecznie następującą klasą funkcji:

$$\eta_p \equiv \eta_0 - \frac{\alpha_0 \Theta}{1 + A_1 \Theta + A_2 \Theta^2} - \frac{\beta_0 \Theta}{1 + B_1 \Theta + B_2 \Theta^2} \quad (9)$$

przy czym zachowujemy założenia obowiązujące dla wzoru (5).

Rozpatrywany przedział prędkości deformacji Θ dla badanego oleju (np. od 0 do 135000s^{-1} patrz **Rys. 1**) dzielimy na podprzedziały w następujący sposób:

$$\Theta_1 \equiv \Theta_{\min} \approx 0 < \Theta_2 < \Theta_3 < \Theta_4 < \Theta_5 < \Theta_6 \equiv \Theta_{\max} \quad (10)$$

Dla poszczególnych wartości prędkości deformacji uzyskujemy następujące wartości pomierzonych doświadczalnie lepkości dynamicznych czynnika smarującego, a mianowicie:

$$\begin{aligned} \eta = \eta_1 \equiv \eta_0 & \quad \text{dla } \Theta = \Theta_1 \equiv \Theta_{\min}, & \eta = \eta_2 & \quad \text{dla } \Theta = \Theta_2, \\ \eta = \eta_3 & \quad \text{dla } \Theta = \Theta_3, & \eta = \eta_4 & \quad \text{dla } \Theta = \Theta_4, \\ \eta = \eta_5 & \quad \text{dla } \Theta = \Theta_5, & \eta = \eta_6 \equiv \eta_{\infty} & \quad \text{dla } \Theta = \Theta_6 \equiv \Theta_{\max} \end{aligned} \quad (11)$$

przy czym

$$\begin{aligned} \eta_1 \equiv \eta_0 - \frac{\alpha_0 \Theta_{\min}}{1 + A_1 \Theta_{\min} + A_2 \Theta_{\min}^2} - \frac{\beta_0 \Theta_{\min}}{1 + B_1 \Theta_{\min} + B_2 \Theta_{\min}^2}, \\ \eta_6 \equiv \eta_0 - \frac{\alpha_0 \Theta_{\max}}{1 + A_1 \Theta_{\max} + A_2 \Theta_{\max}^2} - \frac{\beta_0 \Theta_{\max}}{1 + B_1 \Theta_{\max} + B_2 \Theta_{\max}^2} \end{aligned} \quad (12)$$

WYZNACZANIE NIEWIADOMYCH ZMIENNYCH WSPÓŁCZYNNIKÓW PSEUDOLEPKOŚCI

Analitycznie wyznaczone współczynniki pseudolepkości będą wiarygodne wtedy, gdy przy ich wykorzystaniu związki konstytutywne (3) przyjmą charakter krzywych eksperymentalnych opisujących zależność lepkości deformacji od prędkości deformacji i przedstawionych na **Rys. 1**. Dlatego do równania (9) podstawiamy warunki (11) wyznaczone na drodze eksperymentu. Otrzymujemy wtedy następujący układ równań:

$$\begin{aligned}
\frac{\alpha_0 \Theta_1}{1 + A_1 \Theta_1 + A_2 \Theta_1^2} + \frac{\beta_0 \Theta_1}{1 + B_1 \Theta_1 + B_2 \Theta_1^2} &= \eta_0 - \eta_1, \\
\frac{\alpha_0 \Theta_2}{1 + A_1 \Theta_2 + A_2 \Theta_2^2} + \frac{\beta_0 \Theta_2}{1 + B_1 \Theta_2 + B_2 \Theta_2^2} &= \eta_0 - \eta_2, \\
\frac{\alpha_0 \Theta_3}{1 + A_1 \Theta_3 + A_2 \Theta_3^2} + \frac{\beta_0 \Theta_3}{1 + B_1 \Theta_3 + B_2 \Theta_3^2} &= \eta_0 - \eta_3, \\
\frac{\alpha_0 \Theta_4}{1 + A_1 \Theta_4 + A_2 \Theta_4^2} + \frac{\beta_0 \Theta_4}{1 + B_1 \Theta_4 + B_2 \Theta_4^2} &= \eta_0 - \eta_4, \\
\frac{\alpha_0 \Theta_5}{1 + A_1 \Theta_5 + A_2 \Theta_5^2} + \frac{\beta_0 \Theta_5}{1 + B_1 \Theta_5 + B_2 \Theta_5^2} &= \eta_0 - \eta_5, \\
\frac{\alpha_0 \Theta_6}{1 + A_1 \Theta_6 + A_2 \Theta_6^2} + \frac{\beta_0 \Theta_6}{1 + B_1 \Theta_6 + B_2 \Theta_6^2} &= \eta_0 - \eta_6
\end{aligned} \tag{13}$$

Układ sześciu równań (13) wyznacza sześć następujących niewiadomych, które identyfikują poszukiwane współczynniki pseudolepkości:

$$A_1, A_2, B_1, B_2, \alpha_0, \beta_0 \tag{14}$$

Nieliniowy układ równań (13) można doprowadzić do prostszych układów, mnożąc stronami każde z powyższych równań przez czynnik:

$$(1 + A_1 \Theta_i + A_2 \Theta_i^2)(1 + B_1 \Theta_i + B_2 \Theta_i^2) \tag{15}$$

dla $i = 1, 2, \dots, 6$.

Otrzymujemy wtedy następujący układ sześciu równań:

$$\begin{aligned}
\beta_0 \Theta_i (1 + A_1 \Theta_i + A_2 \Theta_i^2) + \alpha_0 \Theta_i (1 + B_1 \Theta_i + B_2 \Theta_i^2) &= \\
= (\eta_0 - \eta_i) (1 + A_1 \Theta_i + A_2 \Theta_i^2) (1 + B_1 \Theta_i + B_2 \Theta_i^2) &
\end{aligned} \tag{16}$$

dla $i = 1, 2, \dots, 6$.

W dalszym ciągu przyjmować będziemy oznaczenie $\Delta \eta_i = \eta_0 - \eta_i$.

Po wymnożeniu wyrazów we wzorze (16) oraz po grupowaniu ich względem potęg Θ_i otrzymujemy następujący układ sześciu równań:

$$\begin{aligned}
(\alpha_0 + \beta_0) \Theta_i + (\alpha_0 B_1 + \beta_0 A_1) \Theta_i^2 + (\alpha_0 B_2 + \beta_0 A_2) \Theta_i^3 &= \Delta \eta_i + \\
+ \Delta \eta_i \Theta_i (A_1 + B_1) + \Delta \eta_i \Theta_i^2 (A_2 + A_1 B_1 + B_2) + & \\
+ \Delta \eta_i \Theta_i^3 (A_1 B_2 + A_2 B_1) + \Delta \eta_i \Theta_i^4 A_2 B_2 &
\end{aligned} \tag{17}$$

Pozostawiając wyrazy wolne po prawej stronie równania (17) oraz systematyzując pozostałe wyrazy po prawej stronie, uzyskamy dla $i = 1, 2, \dots, 6$:

$$\begin{aligned} & \Theta_i (\alpha_0 + \beta_0) - \Delta\eta_i \Theta_i (A_1 + B_1) + \\ & + \Theta_i^2 (\alpha_0 B_1 + \beta_0 A_1) - \Delta\eta_i \Theta_i^2 (A_2 + A_1 B_1 + B_2) + \\ & + \Theta_i^3 (\alpha_0 B_2 + \beta_0 A_2) - \Delta\eta_i \Theta_i^3 (A_1 B_2 + A_2 B_1) = \\ & = \Delta\eta_i + \Delta\eta_i \Theta_i^4 A_2 B_2 \end{aligned} \quad (18)$$

Przyjmując założenia (7) o minimum funkcji lepkości na końcu przedziału, wyraz wolny w równaniu (18) uprości się do postaci:

$$\begin{aligned} & \Theta_i (\alpha_0 + \beta_0) - \Delta\eta_i \Theta_i (A_1 + B_1) + \\ & + \Theta_i^2 (\alpha_0 B_1 + \beta_0 A_1) - \Delta\eta_i \Theta_i^2 (A_2 + A_1 B_1 + B_2) + \\ & + \Theta_i^3 (\alpha_0 B_2 + \beta_0 A_2) - \Delta\eta_i \Theta_i^3 (A_1 B_2 + A_2 B_1) = \\ & = \Delta\eta_i + \Delta\eta_i \left(\frac{\Theta_i}{\Theta_{\max}} \right)^4 \end{aligned} \quad (19)$$

Przyjmujemy nowe niewiadome:

$$\begin{aligned} Y_1 &= \alpha_0 + \beta_0, \\ Y_2 &= A_1 + B_1, \\ Y_3 &= \alpha_0 B_1 + \beta_0 A_1, \\ Y_4 &= A_2 + A_1 B_1 + B_2, \\ Y_5 &= \alpha_0 B_2 + \beta_0 A_2, \\ Y_6 &= A_1 B_2 + A_2 B_1 \end{aligned} \quad (20)$$

Układ sześciu równań przyjmie ostatecznie następującą postać:

$$\begin{aligned} & \Theta_i Y_1 - \Delta\eta_i \Theta_i Y_2 + \Theta_i^2 Y_3 - \Delta\eta_i \Theta_i^2 Y_4 + \\ & + \Theta_i^3 Y_5 - \Delta\eta_i \Theta_i^3 Y_6 = \Delta\eta_i + \Delta\eta_i \left(\frac{\Theta_i}{\Theta_{\max}} \right)^4 \end{aligned} \quad (21)$$

gdzie $i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$.

Niewiadome Y_i wyznaczone z układu równań (21) podstawione do układu (20) pozwalają wyznaczyć sześć poszukiwanych wielkości: $A_1, A_2, B_1, B_2, \alpha_0, \beta_0$. Tak więc dwie zmienne funkcje pseudolepkości (4) zostały wyznaczone.

Równania (20) są nieliniowe podobnie jak układ równań (17), lecz o wiele od nich prostsze. Przy rozwiązywaniu numerycznym nieliniowego układu równań (20) występować mogą nie tylko jednokrotne pierwiastki. Wtedy na przykład dla niewiadomych A_2 , B_2 należy wybierać wartości pierwiastków zadość czyniące nierównościom:

$$A_2 < \frac{1}{\Theta_{\max}^2}, B_2 < \frac{1}{\Theta_{\max}^2},$$

czyli wartości nieznacznie mniejszych od $1/\Theta_{\max}^2$.

Układ równań (13) lub (21) rozwiązuje się dla każdego badanego oleju indywidualnie, uzyskując w ten sposób dla każdego badanego oleju nowe zmienne współczynniki pseudolepkości.

WNIOSKI

Przedstawiony w niniejszej pracy algorytm wyznaczania zmiany współczynników pseudolepkości olejów na bazie eksperymentu pozwala opisywać ze zwiększoną dokładnością procesy smarowania poprzecznych łożysk ślizgowych olejami o własnościach lepkosprężystych przy pomocy modelu związków fizycznych Rivlina-Ericksena. Zdaniem autorów taka analiza zmian współczynników pseudolepkości winna być przeprowadzona każdorazowo dla rozpatrywanego czynnika smarującego.

LITERATURA

1. Astarita, G., Marrucci, G.: Principles of non-Newtonian fluid mechanics, McGraw Hill Co. 1974.
2. Bhushan B.: Nano-tribology and Nano-mechanics of MEMS/NEMS and Bio-MEMS, Bio-NEMS materials and devices. Microelectronic Engineering, 84, 2007, pp. 387–412.
3. Chizhik S., Khudoley A., Kuznetsova T., Wierzcholski K., Miszczak A.: Micro and Nanoscale Wear Studies of HDD Slide Bearings By Atomic Force Microscopy. Proceedings of Methodological Aspects of Scanning Probe Microscopy, Heat and Mass Transfer Institute of NAS, Minsk 2010, pp. 247–252.
4. Czaban A., Miszczak A.: Wyznaczanie współczynników pseudolepkości olejów silnikowych. Tribologia, 4 (244), 2012, pp. 33–40.
5. Jang G.H., Seo C. H., Ho Seong Lee: Finite element model analysis of an HDD considering the flexibility of spinning disc-spindle, head-suspension-actuator and supporting structure. Microsystem Technologies, 13, 2007, pp. 837–847.
6. Markova L.V., Myshkin N.K., Kong H., Han H.G.: On-line acoustic viscometry in oil condition monitoring. Tribology International, Vol. 44, 2011, pp. 963–970.
7. Miszczak A.: Analiza hydrodynamicznego smarowania ferrocieczą poprzecznych łożysk ślizgowych, Fundacja Rozwoju Akademii Morskiej w Gdyni, dysertacja habilitacyjna, 2006.

8. Truesdell C.A.: First Course in Rational Continuum Mechanics, John Hopkins Univ., Baltimore Maryland, 1972.
9. Wierzholski K.: The Viscoelastic Lubrication Problem of Micro-Bearing. Tribologia, 3 (231), 2010, pp. 231–240.
10. Wierzholski K.: Determination of Pseudo-viscosity Coefficients for Visco-elastic Lubricants. Journal of Kones Powertrain and Transport, Vol. 17, No. 2, 2010, pp. 491–496.

Summary

Constitutive equations between stresses and deformations for oils with pseudo-viscosity properties are usually described by the Rivlin-Ericksen relations. In these relations two pseudo-viscosity coefficients occur. Up to now, in numerous scientific papers concerning the journal bearing lubrication with visco-elastic oils, the mentioned pseudo-viscosity coefficients have been treated as constant values. By virtue of performed measurements, it is evident that experimental curves describing visco-elastic oil dynamic viscosity versus shear rate had shapes that cannot be obtained for the constant pseudo-viscosity coefficients. In this case, only possible are the unknown dependences between oil dynamic viscosity and share rate.

This paper shows the algorithm derivation for variable pseudo-viscosity coefficients as a function of shear rate using pseudo-viscosity oils and taking into account the experimental data obtained from viscosity measurements.