

Zbigniew KĘSY

Politechnika Radomska, Radom

BADANIE WŁAŚCIWOŚCI CIECZY ELEKTROREOLOGICZNYCH PODCZAS PRZEPLYWU CIŚNIENIOWEGO

Słowa kluczowe

Ciecz elektoreologiczna, badanie cieczy inteligentnych, model Bingham.

Streszczenie

W artykule przedstawiono sposób doświadczalnego wyznaczania parametrów modelu Bingham cieczy elektoreologicznej płynącej w szczelinie między dwoma elektrodami, w zależności od napięcia przyłożonego do elektrod. Badania przeprowadzono dla dwóch cieczy elektoreologicznych, na własnym urządzeniu pomiarowym, w którym występuje przepływ ciśnieniowy. Wyniki badań eksperymentalnych potwierdziły przydatność zastosowanego urządzenia pomiarowego do badań tego typu.

Wprowadzenie

Ostatnio są prowadzone prace badawcze mające na celu wykorzystanie cieczy elektoreologicznych w budowie maszyn. Dzięki prawie natychmiastowej zmianie naprężeń stycznych po pojawieniu się pola elektrycznego cieczy te umożliwiają sterowanie urządzeń, w których są stosowane, bezpośrednio za pomocą napięcia prądu elektrycznego [1–4]. Do takich urządzeń należą amortyzatory, zawory hydrauliczne i hamulce. Ciecze elektoreologiczne najczęściej są mieszaninami składającymi się z cząstek stałych i cieczy oraz niewielkiej ilości różnych dodatków poprawiających ich właściwości [5, 6]. W produkowanych

obecnie do celów komercyjnych cieczach elektoreologicznych cząstki stałe wytwarzane są z polimerów, a cieczą bazową jest olej silikonowy [7, 8].

Podczas obliczeń konstrukcyjnych urządzeń, w których przepływ cieczy roboczej odbywa się w wąskiej szczelinie, korzysta się z modeli reologicznych tych cieczy. W urządzeniach z cieczami elektoreologicznymi parametry modeli reologicznych zależą od napięcia elektrycznego przyłożonego do elektrod tworzących szczelinę.

Klasyfikując urządzenia z cieczami elektoreologicznymi, w których wykorzystywane są właściwości reologiczne cieczy, można zauważyć, że sposób działania tych urządzeń zależy od charakteru ruchu cieczy między elektrodami wytwarzającymi pole elektryczne. Najczęściej w urządzeniach z cieczami elektoreologicznymi występuje przepływ wywołany różnicą ciśnień na wyjściu i wejściu szczeliny utworzonej przez elektrody, nazywany przepływem ciśnieniowym.

W artykule przedstawiono sposób doświadczalnego wyznaczania parametrów modeli reologicznych cieczy elektoreologicznych w zależności od napięcia przyłożonego do elektrod, tworzących szczelinę roboczą. Badania przeprowadzono dla dwóch cieczy elektoreologicznych na specjalnie zbudowanym do tego celu urządzeniu pomiarowym, w którym występuje przepływ ciśnieniowy.

1. Model Bingham dla cieczy elektoreologicznej

Modele reologiczne tworzy się na podstawie wykresu zależności naprężenia stycznego τ w cieczy od szybkości ścinania $\dot{\gamma}$, nazywanego krzywą płynięcia. Do modelowania krzywej płynięcia $\tau = f(\dot{\gamma})$ cieczy elektoreologicznej, znajdującej się w polu elektrycznym wytworzonym przez elektrody, do których przyłożone jest napięcie elektryczne U , najczęściej korzysta się z modelu reologicznego cieczy Bingham, postaci [2, 6, 9]:

$$\tau = \mu_p \dot{\gamma} + \tau_g \quad (1)$$

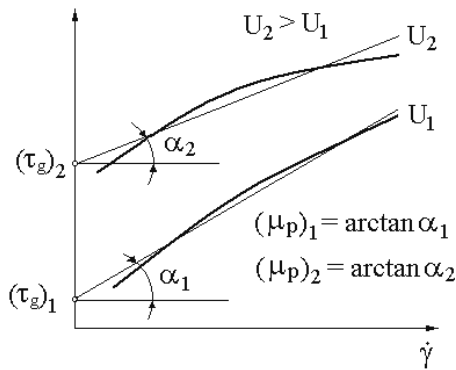
przy czym parametry tego modelu, to jest lepkość plastyczna μ_p oraz graniczne naprężenie styczne τ_g , uzależnia się od napięcia U . Gdy napięcie zasilania U jest równe zero pole elektryczne nie występuje, a model Bingham upraszcza się do modelu Newtona postaci:

$$\tau = \mu \dot{\gamma} \quad (2)$$

gdzie: μ – lepkość dynamiczna.

Zarówno lepkość plastyczna μ_p , lepkość dynamiczna μ , jak i naprężenie graniczne τ_g są zależne od temperatury.

By określić parametry modelu Bingham cieczy elektoreologicznej, która ma być zastosowana w projektowanym urządzeniu, przeprowadza się badania doświadczalne tej cieczy dla wybranego napięcia U , w określonej temperaturze T i na podstawie tak otrzymanej krzywej płynięcia $\tau = f(\dot{\gamma})$ ustala się, najczęściej arbitralnie, przebieg linii prostej tego modelu. Zgodnie z modelem Bingham dla stałego napięcia zasilania U przy szybkości ścinania $\dot{\gamma} = 0$, naprężenie styczne $\tau = \tau_g$, a lepkość plastyczna $\mu_p = \arctan \alpha$, gdzie α jest kątem nachylenia linii prostej modelu, rys. 1.



Rys. 1. Krzywe płynięcia uzyskane eksperymentalnie i na podstawie modelu Bingham dla dwóch różnych napięć U_1, U_2 w temperaturze $T = \text{const}$.

Z badań doświadczalnych urządzeń z cieczami elektoreologicznymi wynika, że wzrost napięcia elektrycznego U powoduje przesuwanie się krzywych płynięcia na wykresach wykreślonych w układzie współrzędnych $\dot{\gamma}, \tau$ ku górze i ewentualnie zmianę ich kąta nachylenia, co w przypadku opisu przebiegu tych krzywych modelem Bingham oznacza zależność granicznego naprężenia stycznego τ_g i lepkości plastycznej μ_p od tego napięcia. Jednak dla cieczy elektoreologicznych składających się z polimeru i oleju silikonowego, szczególnie dla większych prędkości ścinania, lepkość plastyczna μ_p w niewielkim stopniu zależy od napięcia elektrycznego U , toteż można przyjąć, że $\mu_p = \mu = \text{const}$ [10]. Wtedy parametrami modelu Bingham są: naprężenie $\tau_g = f(U)$ oraz lepkość dynamiczna $\mu = \mu_p$.

2. Podstawowe zależności do obliczeń zaworu z cieczą elektroteologiczną

Obliczenia urządzenia z cieczą elektroteologiczną, w którym występuje przepływ ciśnieniowy mają na celu określenie podstawowych wymiarów szczeliny roboczej. Zależności matematyczne opisujące przepływ ciśnieniowy wyprowadza się w oparciu o równanie różniczkowe zapisane w układzie współrzędnych x, y , postaci [11]:

$$\frac{dp}{dx} = \frac{d\tau}{dy} \quad (3)$$

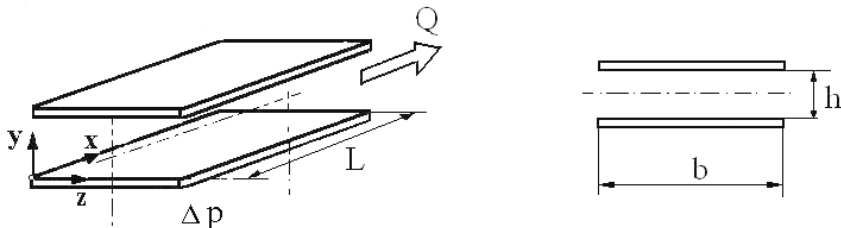
gdzie: p – ciśnienie zmieniające się wzdłuż osi x , τ – naprężenie styczne zmieniające się wzdłuż osi y .

Po przyjęciu, że ciecz elektroteologiczna dla stałego napięcia U , przyłożonego do elektrod szczeliny, w której ciecz ta płynie, jest opisana modelem Bingham, otrzymuje się zależność wydatku cieczy Q od spadku ciśnienia Δp w postaci [12]:

$$\Delta p^3 - \left(\frac{3L}{h} \tau_g + \frac{12Q\mu_p L}{bh^3} \right) \Delta p^2 + \frac{4L^3}{h^3} \tau_g^3 = 0 \quad (4)$$

gdzie: L – długość szczeliny, b – szerokość szczeliny, h – wysokość szczeliny.

Na rys. 2 przedstawiono schemat urządzenia, w którym występuje przepływ ciśnieniowy i zaznaczono podstawowe wymiary szczeliny roboczej.



Rys. 2. Podstawowe wymiary szczeliny roboczej

Zakładając paraboliczny rozkład prędkości przepływu cieczy Bingham w szczelinie, co oznacza nieuwzględnienie obszarów cieczy, w których $\tau < \tau_g$, równanie (4) można uprościć do postaci:

$$\Delta p = \frac{12L\mu_p Q}{bh^3} + \frac{3L}{h}\tau_g \quad (5)$$

Dla występujących w urządzeniach hydraulicznych stosowanych w praktyce dużych wartości spadku ciśnienia Δp błąd tego uproszczenia jest pomijalny.

Zależność (5) może być przedstawiona jako suma spadku ciśnienia Δp_μ wywołanego lepkością cieczy oraz spadku ciśnienia Δp_τ wywołanego naprężeniem τ_g :

$$\Delta p = \Delta p_\mu + \Delta p_\tau \quad (6)$$

wtedy:

$$\Delta p_\mu = \frac{12L\mu_p}{bh^3} Q \quad (7)$$

$$\Delta p_\tau = \frac{3L}{h}\tau_g \quad (8)$$

Po przekształceniach z zależności (7), (8) otrzymuje się wzór pozwalający obliczyć wymiary szczeliny jako [13]:

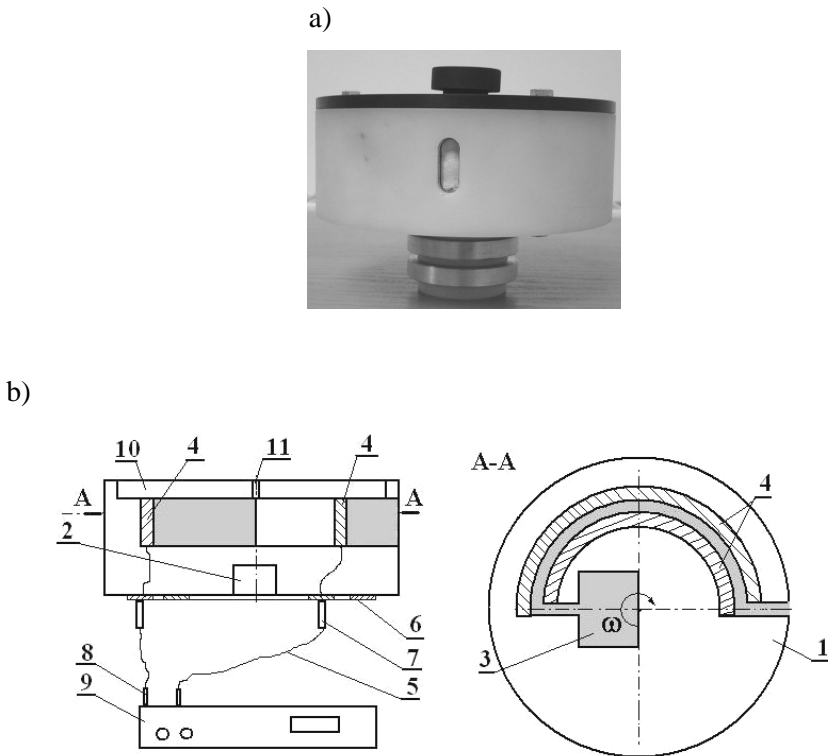
$$bh^2 = 4 \left(\frac{\mu_p}{\tau_g} \right) \left(\frac{\Delta p_\tau}{\Delta p_\mu} \right) Q \quad (9)$$

We wzorze (9) stosunek $\left(\frac{\Delta p_\tau}{\Delta p_\mu} \right)$ określa osiągi urządzenia i jest zakładany przez konstruktora, natomiast stosunek $\left(\frac{\mu_p}{\tau_g} \right)$ zależy od parametrów modelu

Binghama powinien być ustalony podczas badań właściwości cieczy elektreologicznej. Przy założeniu, że lepkość plastyczna μ_p jest równa lepkości dynamicznej μ , lepkość plastyczną można otrzymać z typowych badań reologicznych cieczy elektreologicznej potraktowanej jak ciecz newtonowska, natomiast należy znaleźć naprężenie graniczne $\tau_g = f(U)$.

3. Urządzenie do badania zależności granicznego naprężenia stycznego od napięcia

Podstawowym elementem urządzenia pomiarowego do badania zależności granicznego naprężenia stycznego od napięcia postaci $\tau_g = f(U)$, skonstruowanego przez autora, jest głowica badawcza osadzona na wale silnika prądu zmiennego, rys. 3. Zakres regulacji prędkości kątowej silnika wynosi od 0 do 300 rad/s. Silnik elektryczny jest zamocowany do pionowej płyty. Do tej płyty jest również przymocowana osłona głowicy wykonana z arkusza przezroczystego plastyku.



Rys. 3. Głowica badawcza: 1 – krążek, 2 – otwór na wał silnika, 3 – zbiornik, 4 – elektrody, 5 – przewody przyłączeniowe, 6 – pierścień komutatora, 7 – szczotki komutatora, 8 – zaciski zasilacza, 9 – zasilacz wysokiego napięcia, 10 – pokrywa, 11 – odpowietrznik

Głowica badawcza ma kształt krążka o średnicy 140 mm i grubości 35 mm. Została wykonana z tworzywa ABS. W osi krążka znajduje się prostokątny otwór będący zbiornikiem o pojemności 10 cm³ badanej cieczy, przykryty pokrywą z odpowietrznikiem. W głowicy wycięta jest również szczelina w kształcie półokręgu, którą badana ciecz pod wpływem siły odśrodkowej przemieszcza

się ze zbiornika na zewnątrz głowicy. Boczne ścianki szczeliny są pokryte dwoma paskami miedzianej blachy, elektrycznie odizolowanymi od siebie i stanowiącymi elektrody. Szczelina ma długość $L = 180$ mm i wysokość $b = 25$ mm. Odległość między elektrodami wynosi $h = 1$ mm. Elektrody są połączone z zasilaczem o maksymalnym napięciu 5 kV.

4. Badanie zależności granicznego naprężenia stycznego od napięcia

Badania rozpoczyna się od napełnienia zbiornika badaną cieczą elektroteologiczną o wymaganej temperaturze. Następnie włączany jest zasilacz i ustalone napięcie zasilania U . Prędkość kątowna silnika jest zwiększana od zera do wartości ω , przy której zostaną zaobserwowane na przezroczystej obudowie ślady cieczy elektroteologicznej, świadczące o jej wypływie z kanału głowicy badawczej. Na podstawie prędkości kątowej ω jest obliczane ciśnienie dynamiczne cieczy elektroteologicznej ze wzoru:

$$\Delta p = 0,5 \rho \omega^2 R^2 \quad (10)$$

a następnie z zależności (8) graniczne naprężenie styczne τ_g według wzoru:

$$\tau_g = \frac{\Delta p h}{c L} \quad [\text{Pa}] \quad (11)$$

gdzie: ρ – gęstość cieczy elektroteologicznej,
 R – średni promień okręgu kanału,
 h – odległość między elektrodami,
 c – współczynnik liczbowy równy 3,
 L – długość kanału.

Powtarzając pomiary dla różnych napięć otrzymuje się punkty zależności $\tau_g = f(U)$.

Badaniom poddano cieczy elektroteologiczne składające się z cząstek polimeru i oleju silikonowego [8, 14] zestawione w tabeli 1.

Tabela 1. Badane cieczy elektroteologiczne

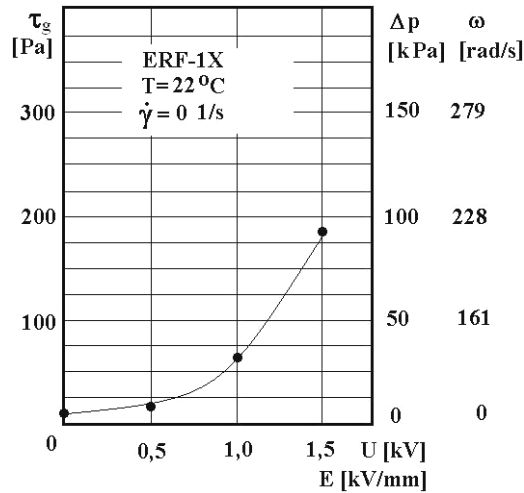
Oznaczenie	Producent	Zawartość objętościowa polimeru	Gęstość
ERF-1X	Politechnika Warszawska	40%	1,10 g/cm ³
LID 3354S	Smart Technology	37%	1,46 g/cm ³

Wyniki badań przedstawiono na rys. 4 oraz rys. 5. Zgodnie z założeniami wykresy $\tau_g = f(U)$ pokazane na rysunkach wykonano dla $\dot{\gamma} = 0$. Na rysunkach

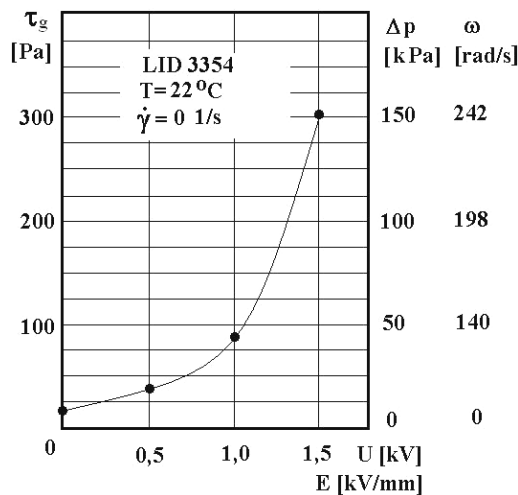
tych na osi pionowej podano również wartości prędkości kątovej ω oraz spadku ciśnienia Δp użyte w obliczeniach τ_g . Natężenie pola elektrycznego E występujące na osi poziomej wykresów obliczono z wzoru:

$$E = \frac{U}{h} \quad (12)$$

Ze względu na przyjętą jednostkę natężenia pola elektrycznego [kV/mm] oraz odległość h wyrażoną w [mm] liczbowo wartości napięcia U są równe wartościom natężenia pola elektrycznego E .



Rys. 4. Charakterystyka cieczy ERF-1X dla $\dot{\gamma} = 0$



Rys. 5. Charakterystyka cieczy LID 3354 dla $\dot{\gamma} = 0$

Jak wynika z przedstawionych wykresów zależności $\tau_g = f(U)$, wartości maksymalnych naprężeń τ_g badanych cieczy elektrologicznych dla wartości $\dot{\gamma} = 0$ oraz $U = 1,5$ kV są równe 0,18 kPa dla cieczy ERF-1X oraz 0,30 kPa dla cieczy LID 3354.

Z porównania wartości τ_g otrzymanych na podstawie przeprowadzonych badań dla cieczy ERF-1X oraz LID 3354, z wartościami τ_g otrzymanymi podczas badań opisanych w publikacji [10] wynika, że maksymalne różnice względne między tymi wartościami dla obu badanych cieczy nie przekraczają 10%, mimo że występują różnice w wymiarach szczelin obu przyrządów pomiarowych.

Podsumowanie

1. Projektowanie urządzeń z cieczami elektreologicznymi wymaga określenia wpływu napięcia zasilania elektrod, tworzących szczelinę roboczą, na osiągi urządzenia. Do tego celu wykorzystuje się zależność $\tau_g = f(U)$ otrzymaną z badań doświadczalnych.
2. Z rezultatów badań doświadczalnych wykonanych dla cieczy elektreologicznych składających się z cząstek polimeru i oleju silikonowego wynika, że opisany w artykule przyrząd pomiarowy jest w pełni przydatny do sporządzania zależności $\tau_g = f(U)$ dla przepływu ciśnieniowego.
3. Dalsze prace nad zaproponowanym sposobem doświadczalnego wyznaczania parametrów modelu Bingham powinny zmierzać do przeprowadzenia badań cieczy elektreologicznych o innym składzie, w tym również cieczy jednofazowych, ze względu na istotny wpływ struktury tych cieczy na ich właściwości reologiczne.

Praca naukowa finansowana ze środków Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego, wykonana w ramach realizacji Programu Wieloletniego pn. „Doskonalenie systemów rozwoju innowacyjności w produkcji i eksploatacji w latach 2004–2008”.

Bibliografia

1. Choi S.B., Cheong C.C., Jung J.M., Choi Y.T.: Position control of an ER valve-cylinder system via neutral network controller. *Mechatronics*, 7, 1, 1997, 37–52.
2. Papadopoulos C.A.: Brakes and clutches using ER fluids. *Mechatronics*, 8, 1998, 719–726.
3. Fees G.: Study of the static and dynamic properties of a highly dynamic ER Servo Drive. *Ölhydraulik und Pneumatik*, 45, 2001.

4. Milecki A.: Zastosowanie cieczy elektoreologicznych i magnetoreologicznych w serwonapędach elektrohydraulicznych. *Hydraulika i Pneumatyka*, 5, 1998, 4–9.
5. Krztoń-Maziopa A., Ciszewska M., Płocharski J.: Ciecze elektoreologiczne – materiały, zjawiska, zastosowanie. *Polimery*, 11–12, 2003.
6. Ławniczak A., Milecki A.: Ciecze elektro- i magnetoreologiczne oraz ich zastosowanie w technice. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 1999.
7. Płocharski J., Drabik H., Wyciślik H., Ciach T.: Electrorheological properties of polyphenylene suspensions. *Synthetic Metals*, 88, 1997, 1354–1357.
8. Broszury firmy Smart Technology Ltd., Wielka Brytania, www.smarttec.co.uk.
9. Weiss K.D., Duclos T.G., Carlson D.J., Chrazn M.J., Margida A.J.: High strength magneto and electro-rheological fluids. *International Off-Highway & Powerplant Congress & Exposition*, Milwaukee, Wisconsin, 1993.
10. Kęsy A., Kęsy Z., Musiałek I., Migus M.: Ocena właściwości cieczy elektoreologicznych i magnetoreologicznych pod kątem zastosowań praktycznych. *Problemy Eksploatacji* 3/ 2007.
11. Wilczyński K.: Reologia w przetwórstwie tworzyw sztucznych. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne 2001.
12. Sims N.D., Stanway R., Peel D.J., Bullough W.A., Johnson A.R.: Control controllable visous damping: an experimental study of an electrorheological long-stroke damper under proportional feedback control. *Smart Materials and Structures*, 8, 1999, 601–615.
13. Carlson D.J., Billie F., Spencer F.: Magneto-rheological fluid dampers: Scalability and design issues for application to dynamic hazard mitigation. 2nd International Workshop on Structural Control, Hong Kong, 1996.
14. Płocharski J., Krztoń-Maziopa A i inni: Opracowanie cieczy elektoreologicznych do zastosowania w zaawansowanej technice. Projekt badawczy zamawiany PW-004/ITE/05/2005, Wydział Chemiczny, Politechnika Warszawska, 2006.

Recenzent:
Andrzej MILECKI

Test of electrorheological fluid properties for flow mode

Key words

Electrorheological fluids, smart fluids testing, the Bingham model.

Summary

In this paper, a test method of rheological model parameters determination for flow mode is presented. The main goal of this research was to establish the Bingham model parameters as a function of voltage. Two commercial electrorheological fluids were tested. The parameters were obtained based on tests carried out on a measuring device designed by the author. Based on the test results, it was concluded that the device can be successfully used for obtaining Bingham model parameters.

