

Józef SALWIŃSKI*, Zbigniew SZYDŁO*,
Wojciech HORAK*, Marcin SZCZĘCH*

BADANIE ZMIAN LEPKOŚCI CIECZY FERROMAGNETYCZNYCH PODDANYCH DZIAŁANIU STAŁEGO POLA MAGNETYCZNEGO

INVESTIGATION OF CHANGES OF FERROMAGNETIC FLUIDS VISCOSITY ACTIVATED BY STEADY MAGNETIC FIELDS

Słowa kluczowe:

ciecze ferromagnetyczne, lepkość, pole magnetyczne, szybkość ścinania

Key words:

ferromagnetic fluids, viscosity, magnetic field, shear rate

Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki badań lepkości wybranych cieczy ferromagnetycznych poddanych działaniu stałego pola magnetycznego przy różnych wartościach strumienia indukcji magnetycznej. W badaniach uwzględniono wpływ szybkości ścinania na zmianę lepkości ferrocieczy. Zakres zmian lepkości cieczy ferromagnetycznej na skutek oddziaływania pola magnetycznego jest w dużej mierze zależny od szybkości ścinania.

* Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Katedra Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn
Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków.

WPROWADZENIE

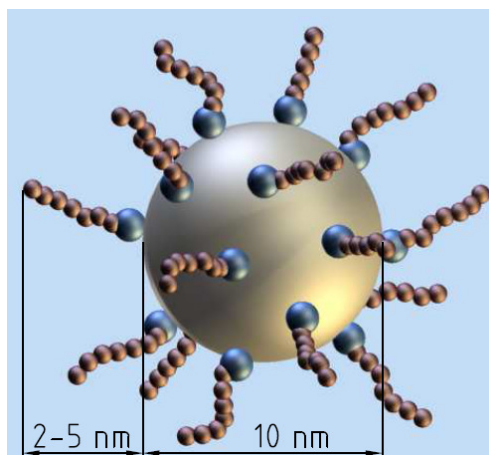
Ciecze ferromagnetyczne należą do grupy materiałów inteligentnych o właściwościach superparamagnetycznych. W literaturze występują również pod nazwą cieczy magnetycznych lub ferrocieczy (ang. ferrofluids). Działanie pola magnetycznego powoduje zmianę ich lepkości oraz może wpływać na kierunek i parametry przepływu. Substancje tego typu znalazły zastosowanie między innymi w uszczelnieniach, łożyskach ślizgowych, akustyce i medycynie. Ferrociecze, w odróżnieniu od cieczy magnetoreologicznych, charakteryzują się stosunkowo niską wartością magnetyzacji nasycenia oraz wysoką stabilnością właściwości, zarówno w polu magnetycznym, jak i w polu grawitacyjnym.

Ferrociecze są syntetycznie wytworzoną koloidalną zawiesiną cząstek magnetycznych w niemagnetycznej cieczy nośnej. Frakcja magnetyczna jest najczęściej wytwarzana przez rozdrabnianie magnetytu (Fe_3O_4) do uzyskania polidispersyjnego proszku o średniej wielkości cząstek około 10 nm. Cząstki te stanowią pojedyncze domeny magnetyczne [L. 1], które mogą być traktowane jako bardzo małe magnesy trwałe posiadające własne momenty magnetyczne (dipole magnetyczne). Przy tej wielkości cząstek energia termiczna ośrodka (cieczy nośnej) jest w stanie zapobiegać sedymentacji w polu grawitacyjnym, jak również uniemożliwia aglomerację cząstek spowodowaną dipolowym oddziaływaniem magnetycznym, jednak nie przeciwdziała ich koagulacji wskutek sił przyciągania van der Waalsa. Dla zapobiegania koagulacji cząstki pokryte są środkiem powierzchniowo czynnym – surfaktantem. Jest nim najczęściej substancja składająca się z długołańcuchowych molekuł o budowie polarnej, np. kwas olefinowy lub powłok polimerowych – Rys. 1. Grubość powłoki powierzchniowo czynnej zwykle nie przekracza 2–5 nm. Surfaktant ma istotny wpływ na hydrodynamiczne właściwości cieczy magnetycznej.

W zależności od przeznaczenia ferrocieczy stosowane są różne typy cieczy nośnej, jak na przykład olej mineralny, woda, ciecze syntetyczne lub inne substancje. Objętościowy udział cząstek magnetycznych w typowej ferrocieczy wynosi około 7%, natomiast objętościowy udział hydrodynamiczny (z uwzględnieniem oddziaływania surfaktantu) wynosi około 23% [L. 2].

Na Rys. 2 schematycznie przedstawiono zachowanie cząstek ferrocieczy. Przy braku oddziaływania pola magnetycznego ciecz wykazuje zachowanie typowe dla koloidów, których właściwości można opisać za

pomocą znanych modeli reologicznych [L. 2]. Wektory momentów magnetycznych cząstek zorientowane są w dowolnych, przypadkowych kierunkach – **Rys. 2a**.



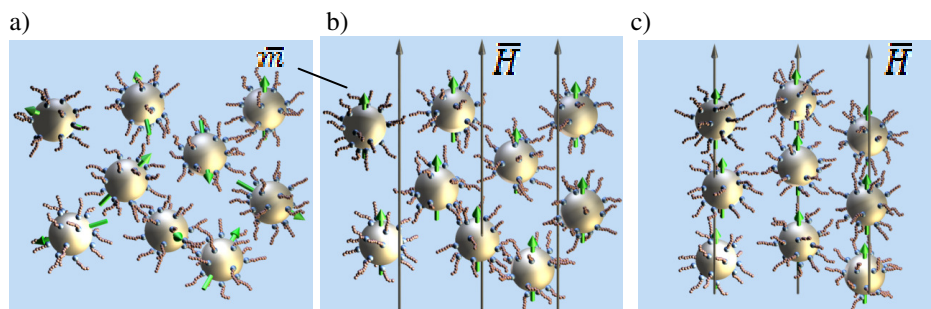
Rys. 1. Model cząstki magnetycznej pokrytej substancją powierzchniowo czynną o budowie polarnej

Fig. 1. Model of magnetic particle coated with a polar-structure surfactant

Oddziaływanie stałego pola magnetycznego powoduje uporządkowanie struktury cieczy. Momenty magnetyczne \bar{m} przyjmują położenie zgodne z kierunkiem wektora natężenia pola \bar{H} – **Rys. 2b**, czego wynikiem jest makroskopowa magnetyzacja całej objętości ferrocieczy. Oddziaływanie pola o dostatecznie dużym natężeniu doprowadza do dalszego porządkowania struktury cieczy poprzez tworzenie „łańcuchów” cząstek magnetycznych usytuowanych wzdłuż linii pola magnetycznego – **Rys. 2c**.

Mechanizm magnetyzacji ferrocieczy nazywany jest superparamagnetycznym. W odróżnieniu od zwykłych paramagnetyków, w których występują jednostkowe molekularne momenty magnetyczne, cząsteczki cieczy magnetycznej mogą zawierać nawet około 10^4 magnetonów Bohra. Dzięki temu początkowa podatność magnetyczna jest wysoka ($\chi \approx 1$) w porównaniu z cieczami paramagnetycznymi ($\chi = 10^{-5}$), co umożliwia skuteczne pozycjonowanie i sterowanie przepływem [L. 3], nawet przy stosunkowo niewielkiej gęstości strumienia indukcji magnetycznej wyno-

szącej około 50 mT (40 kA/m) [L. 4, 5]. Zmiany zachodzące w mikrostrukturze ferrocieczy przejawiają się w skali makroskopowej między innymi, poprzez zmianę charakterystyk reologicznych koloidu.



Rys. 2. Model zachowania się cząstek magnetycznych w cieczy ferromagnetycznej: a) bez działania pola magnetycznego, b) działające pole magnetyczne \vec{H} powoduje ukierunkowanie wektorów magnetyzacji \vec{m} , c) łańcuchowe struktury cząstek.

Fig. 2. Model of behavior magnetic particles in ferrofluid: a) without magnetic field, b) applied magnetic field \vec{H} causes orientation magnetization vectors \vec{m} , c) chain-like structures of magnetic particles

CEL I SPOSÓB BADAŃ

Specyficzne właściwości ferrocieczy pozwoliły na wykorzystanie ich w wielu nowych rozwiązaniach konstrukcyjnych, stwarzając możliwość uzyskania wcześniej nieosiągalnych właściwości oraz parametrów pracy. Ferrociecze stosowane są m.in. w uszczelnieniach, głośnikach, tłumikach drgań, ślizgowych węzłach łożyskowych [L. 7]. Zakres ich stosowania jest nadal otwarty, choć uwarunkowany wiedzą o ich właściwościach w różnorodnych warunkach pracy. W większości przypadków producenci nie ujawniają szczegółowych informacji o właściwościach ferrocieczy lub są one ograniczone.

Zamiarem autorów niniejszej pracy jest wyznaczenie charakterystyk lepkościowych dwóch komercyjnie dostępnych cieczy magnetycznych. Wyznaczono charakterystyki nie tylko w funkcji oddziałującego na ciecz pola magnetycznego, ale uwzględniono również szybkość ścinania jako parametr opisujący kinematyczny stan odkształcenia cieczy. Dla rozważanej geometrii pomiarowej szybkość ścinania w ujęciu skalarnym moż-

na wyrazić jako pochodną wektora prędkości płynu na kierunku szerokości szczeliny pomiarowej.

Badania zostały przeprowadzone w Katedrze Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Akademii Górniczo-Hutniczej na reometrze rotacyjnym typ MCR301 firmy Anton Paar – **Rys. 3**. Przeznaczony jest on do wykonywania różnorodnych badań reologicznych w szerokim zakresie prędkości ścinania i temperatury.



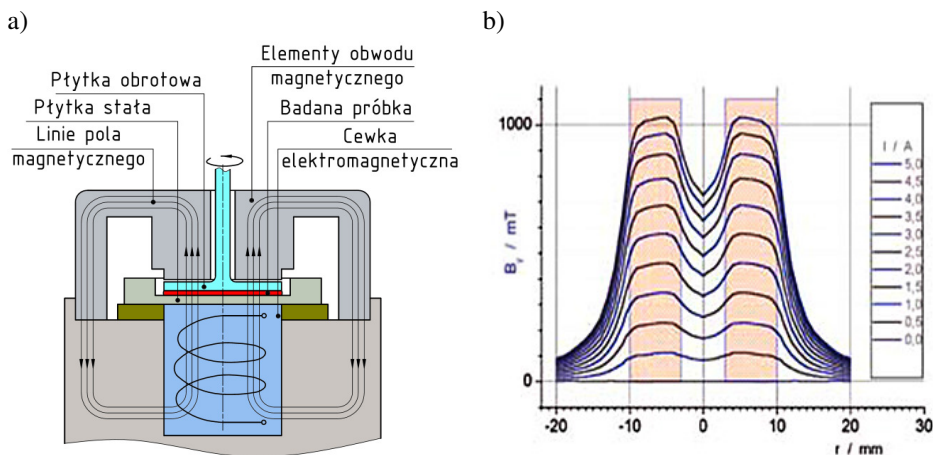
Rys. 3. Widok ogólny reometru MCR 301 [L. 8]

Fig. 3. Rheometer MCR301 [L. 8]

Głównym zespołem reometru jest głowica wyposażona w łożysko aerostaticzne, dzięki czemu jest możliwe uzyskanie wysokiej dokładności pomiaru momentu $\pm 0,05 \mu\text{Nm}$. Maksymalna prędkość obrotowa układu pomiarowego to 3000 obr./min. Dodatkowo jest możliwy pomiar siły osiowej w zakresie do 50 N. Wszystkie badania mogą być prowadzone w warunkach stabilizacji termicznej.

Reometr wyposażony jest w dodatkowy moduł umożliwiający przeprowadzanie pomiarów w polu magnetycznym. Budowę stosownej przystawki przedstawiono schematycznie na **Rys. 4a**. Stałe, jednorodne pole

magnetyczne generowane jest przez cewkę elektromagnetyczną, która umożliwia wytworzenie strumienia indukcji magnetycznej o wartości do 1 T. Rozkład wartości strumienia indukcji magnetycznej na średnicy szczeliny pomiarowej przedstawiono na **Rys. 4b**.



Rys. 4. a) Schemat geometrii pomiarowej b) rozkład strumienia indukcji magnetycznej na średnicy płytki pomiarowej [L. 8]

Fig. 4. a) Schematic view of measuring cell, b) the distribution of magnetic flux density on measuring plate [L. 8]

Ciecze magnetyczne użyte w badaniach

Badania przeprowadzono na dwóch rodzajach cieczy ferromagnetycznych, produkowanych przez firmę Ferrolabs [L. 9]. Wybrane właściwości wykorzystanych ferrocieczy zestawiono w **Tabeli 1**. Badane ferrociecze znacząco różnią się wartością magnetyzacji nasycenia.

Tabela 1. Podstawowe właściwości cieczy magnetycznych użytych w badaniach [L. 9]
Table 1. The basic properties of magnetic fluids used in research [L. 9]

Lp.	Oznaczenie ferrocieczy	Materiał cząstek magnetycznych	Typ cieczy bazowej	Magnetyzacja nasycenia [kA/m]	Zakres temperatur pracy [°C]
1	FLA 002.25	Fe ₃ O ₄	Siloksan	25	-70÷150
2	FLA 003.45	Fe ₃ O ₄	Siloksan	45	-70÷150

Badane ciecze, według zaleceń producenta, dedykowane są do zastosowań w urządzeniach akustycznych. Wyniki badań przeprowadzonych przez autorów wykazały jednak, że obydwie ciecze wykazują dobre właściwości podczas pracy w uszczelnieniach.

Procedura badawcza

Pomiary wykonano z wykorzystaniem geometrii typu płytka–płytko o średnicy pomiarowej płytki 20 mm i szerokości szczeliny 0,5 mm. Każdy pomiar, w celu równomiernego rozprowadzenia próbki, poprzedzony był jednogminutowym okresem ścinania ze stałą prędkością obrotową (ang. Pre-shear), a następnie następował jednogminutowy okres stabilizacji próbki (ang. Hold).

Przeprowadzono dwa rodzaje testów. Pierwszy polegał na wyznaczeniu lepkości cieczy w funkcji zmiany strumienia indukcji magnetycznej w zakresie od 0 T do 0,8 T przy stałych szybkościach ścinania $\gamma = 100 \text{ s}^{-1}$ oraz $\gamma = 500 \text{ s}^{-1}$. Następnie przy ustalonej wartości strumienia indukcji magnetycznej, wyznaczono charakterystyki lepkościowe ferrocieczonej w funkcji szybkości ścinania w zakresie $\gamma = 10 \div 1000 \text{ s}^{-1}$. Pomiary wykonano w warunkach stabilizacji termicznej, w temperaturze 25°C.

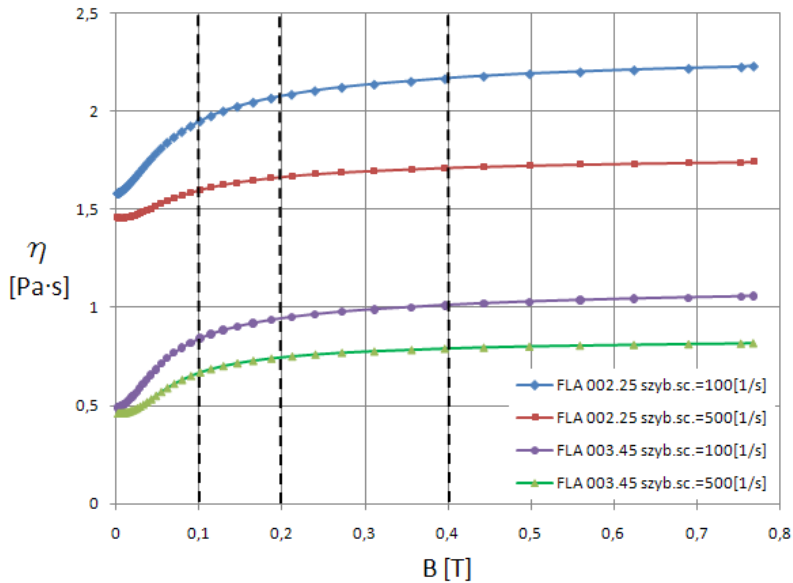
WYNIKI BADAŃ

Zmiana lepkości cieczy pod wpływem pola magnetycznego

Na **Rys. 5** przedstawiono charakterystyki lepkościowe cieczy wyznaczone przy dwóch wartościach szybkości ścinania $\gamma = 100 \text{ s}^{-1}$ oraz $\gamma = 500 \text{ s}^{-1}$ pod wpływem działania pola magnetycznego w zakresie $B = 0 \div 0,8 \text{ T}$. Linia przerywaną wyróżniono wartość indukcji magnetycznej, dla których wyznaczono charakterystyki lepkościowe (**Rys. 7**).

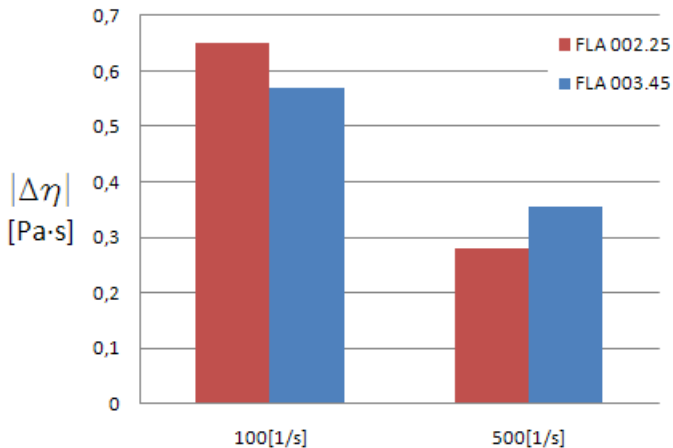
Zwiększanie wartości strumienia indukcji magnetycznej powoduje wzrost lepkości cieczy do poziomu nasycenia, powyżej której dalsze zwiększanie intensywności pola w niewielkim stopniu wpływa na zmianę lepkości.

W zależności od szybkości ścinania, przy której przeprowadzono pomiar, zaobserwowano różne wartości wzrostu lepkości badanych cieczy. Na **Rys. 6** zestawiono wartości bezwzględne zmian lepkości badanych ferrocieczonej w rozważanym zakresie strumienia indukcji magnetycznej.



Rys. 5. Charakterystyki obrazujące przebieg zmiany lepkości badanych cieczy pod wpływem działania pola magnetycznego, wyznaczone przy dwóch wartościach szybkości ścinania γ 100 i 500 s^{-1}

Fig. 5. Diagram of viscosity examined ferrofluids as a function of magnetic field density obtained at two different shear rate values γ 100 and 500 s^{-1}



Rys. 6. Bezwzględna zmiana (wzrost) wartości lepkości na skutek oddziaływania polem magnetycznym w badanym zakresie, uzyskana dla dwóch wartościach szybkości ścinania

Fig. 6. Diagram of absolute viscosity change (increase) due to the influence of magnetic field in the tested range, obtained for the two values of shear rate

Przy mniejszej szybkości ścinania większą zmianę lepkości zarejestrowano dla cieczy o mniejszej magnetyzacji nasycenia, tj. FLA 002.25, zmiana ta wynosiła 0,65 Pa·s, natomiast dla cieczy FLA 003.45 lepkość wzrosła o 0,57 Pa·s. Dla większej szybkości ścinania ($\dot{\gamma} = 500 \text{ s}^{-1}$) ciecz FLA 002.25 wykazała mniejszą zmianę lepkości, tj. 0,28 Pa·s, podczas gdy dla cieczy FLA 003.45 zarejestrowano przyrost lepkości o 0,35 Pa·s.

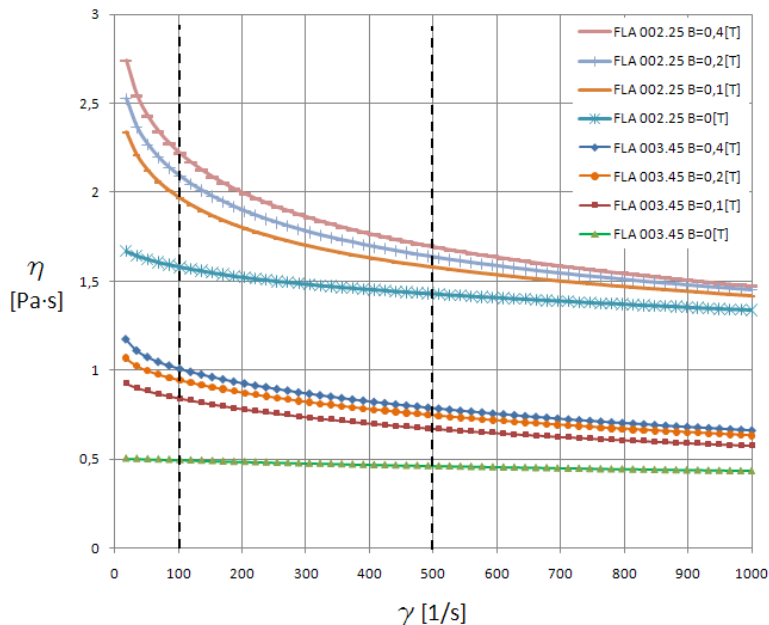
W przypadku ogólnym większy wzrost wartości lepkości na skutek oddziaływania pola magnetycznego zachodzi w cieczach o wyższej wartości magnetyzacji nasycenia. W badanym przypadku podczas pomiaru przy niższej wartości szybkości ścinania większą zmianę lepkości uzyskano dla cieczy o mniejszej wartości magnetyzacji nasycenia (ciecz FLA 002.25). Związane jest to z nienewtonowskim charakterem zachowania się badanych cieczy, dla których wyraźnie zauważalny jest wpływ rozrzedzania ścinaniem.

Zmiana lepkości cieczy w zależności od szybkości ścinania

Na **Rys. 7** przedstawiono krzywe lepkości badanych ferrocieczy wyznaczone przy braku pola magnetycznego, $B = 0 \text{ T}$ oraz dla trzech wartości strumienia indukcji magnetycznej: $B = 0,1 \text{ T}$, $B = 0,2 \text{ T}$ i $B = 0,4 \text{ T}$. Aplikacja pola magnetycznego znacząco wpływa na charakterystyki reologiczne badanych cieczy powodując wzrost lepkości.

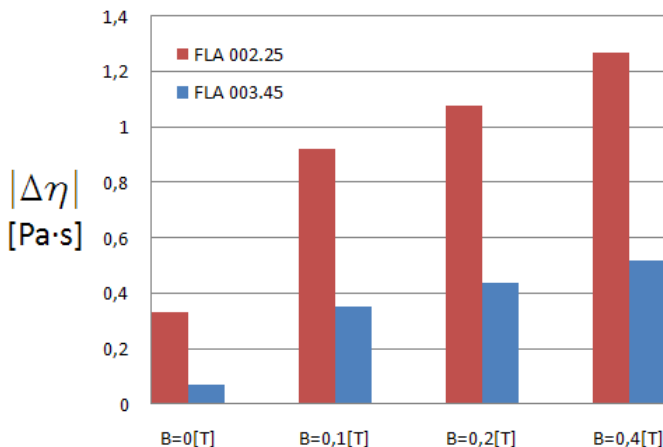
We wszystkich pomiarach zanotowano spadek wartości lepkości wraz ze wzrostem szybkości ścinania. Zjawisko to, określane mianem rozrzedzania ścinaniem, jest typowym zachowaniem zawieszin, koloidów oraz substancji mających strukturę wewnętrzną [L. 6]. Związane jest ono ze zmianami zachodzącymi w strukturze cieczy na skutek intensyfikacji odkształcenia. W miarę wzrostu szybkości ścinania zawieszony w cieczy nośnej cząstki ulegają uporządkowaniu w kierunku zgodnym z kierunkiem przepływu (kierunek prostopadły do kierunku działania pola magnetycznego).

Największy spadek lepkości na skutek wzrostu szybkości ścinania obserwowany jest w początkowym zakresie badanego przedziału. Wraz ze wzrostem intensywności odkształcenia badanych cieczy dalszy spadek lepkości ma zdecydowanie bardziej łagodny charakter. Większe wartości zmian lepkości zaobserwowano dla cieczy FLA 002.25, która charakteryzuje się większą wartością lepkości początkowej.



Rys. 7. Krzywe lepkości badanych cieczy, poddanych działaniu kilku wartości strumienia indukcji magnetycznej

Fig. 7. Diagram of examined ferrofluids viscosity as a function of shear rate obtained with different values of magnetic flux density

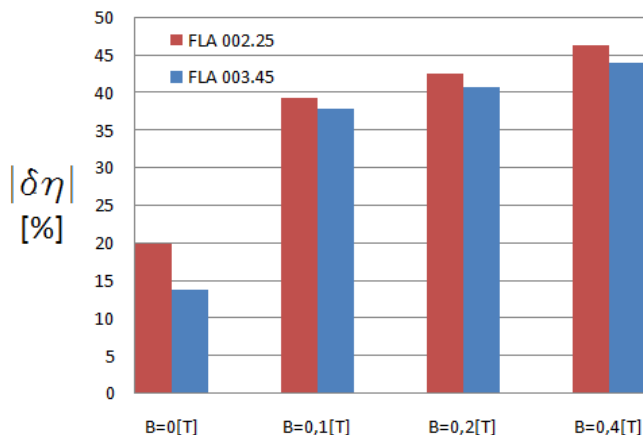


Rys. 8. Bezwzględna zmiana (spadek) wartości lepkości badanych cieczy na skutek wzrostu szybkości ścinania uzyskana przy różnych wartościach strumienia indukcji magnetycznej

Fig. 8. Diagram of absolute change (decrease) viscosity values due to increased shear rate obtained for various values of magnetic flux density

Na **Rys. 8** zestawiono bezwzględne wartości zmian lepkości badanych ferrocieczech na skutek wzrostu szybkości ścinania w rozważanym zakresie ($\gamma = 10 \div 1000 \text{ s}^{-1}$).

Wpływ szybkości ścinania na wartość lepkości jest najbardziej intensywny dla wyższych wartości strumienia indukcji magnetycznej. Przykładowo, dla indukcji magnetycznej o wartości $B = 0,4 \text{ T}$ lepkość cieczy oznaczonej symbolem FLA 002.25 zmniejszyła się o $1,26 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, natomiast dla cieczy o symbolu FLA 003.45 zaobserwowano spadek lepkości o $0,52 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, co w odniesieniu do wartości lepkości w początkowej fazie ścinania można określić względną zmianą lepkości rzędu, odpowiednio 46% i 44%. Na **Rys. 9** zestawiono względne zmiany lepkości poszczególnych cieczy.



Rys. 9. Względna zmiana (spadek) wartości lepkości na skutek wzrostu szybkości ścinania uzyskana przy różnych wartościach strumienia indukcji magnetycznej

Fig. 9. Diagram of relative change (decrease) viscosity values due to increased shear rate obtained for various values of magnetic flux density

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Istnieją przesłanki do rozważenia nowych obszarów zastosowań cieczy magnetycznych. Jednak konieczne jest poznanie ich właściwości przy różnych uwarunkowaniach zewnętrznych. Zastosowanie nowoczesnego narzędzia badawczego, jakim jest reometr MCR 301 wyposażony w moduł umożliwiający przeprowadzanie pomiarów w polu magnetycznym, pozwoliło na zrealizowanie badań właściwości ferrocieczech w zakresie niedostępnym dla tradycyjnych narzędzi badawczych.

Ferrociecze wykonane na bazie tego samego typu cieczy nośnej (siloxan), ale o różnych wartościach magnetyzacji nasycenia, wykazały duże różnice w zakresie zmian lepkości, zarówno pod wpływem oddziaływania pola magnetycznego, jak i szybkości ścinania.

Różnice w wartości magnetyzacji nasycenia mogą świadczyć o różnicy objętościowego udziału cząstek magnetycznych w cieczach lub o różnicy rozmiaru cząstek. Brak szczegółowych informacji odnośnie do składu fizykochemicznego badanych cieczy nie pozwala na precyzyjne określenie bezpośredniej przyczyny różnicy zachowania się cieczy.

Badane ferrociecze są cieczami rozrzedzanymi ścinaniem. Możliwy do uzyskania zakres zmian lepkości ferrocieczy na skutek oddziaływania polem magnetycznym jest w dużym stopniu zależny od szybkości ścinania. Dlatego też, projektując urządzenia pracujące z wykorzystaniem cieczy magnetycznych, dla działania których istotnym parametrem jest lepkość (na przykład rozwiązania układów łożyskowych smarowanych ferrocieczami) należy, oprócz zjawiska zmiany lepkości cieczy na skutek oddziaływania polem magnetycznym, brać również pod uwagę zjawisko zmiany lepkości na skutek szybkości ścinania (intensywności odkształcenia).

LITERATURA

1. Rosensweig R.E.: Ferrohydrodynamics. Cambridge University Press 1985.
2. Haisheng Ch., Yulong D., Chunqing T., New J. Phys. 9, 2007, 367.
3. Cotae C., Calugaru G.: IEEE Transactions on Magnetics, vol. 17, issue 1, p. 1156–1159.
4. Odenbach S.: Colloids and Surfaces A, Physicochem. Eng. Aspects 217, 2003, 171/178.
5. Ivanov A.O., Kantorovich S.S., Reznikov E.N., Holm Ch., Pshenichnikov A.F., Lebedev A.V., Chremos A., Camp P.J.: PHYSICAL REVIEW E 75, 061405, 2007.
6. Ferguson J., Kembłowski Z.: Reologia stosowana płynów. Wydawnictwo Marcus, Łódź 1995.
7. Miszczak A.: Analiza hydrodynamicznego smarowania ferrocieczą poprzecznych łożysk ślizgowych. Akademia Morska, Gdynia 2006.
8. <http://www.anton-paar.com/>.
9. <http://www.ferrolabs.com/en/>.

Recenzent:
Jan BURCAN

Summary

This paper presents the results of viscosity measurements for selected ferromagnetic fluids subjected to a DC magnetic field at various values of magnetic flux density. The research takes into consideration the dependency between shear rate and viscosity. The rate of change in viscosity under magnetic field influence is dependent on shear rate.