

**Marcin FRYCZ\***

## **WPLYW STĘŻENIA CZĄSTEK MAGNETYCZNYCH NA SMARNOŚĆ FERROCIECZY**

### **THE EFFECT OF MAGNETIC PARTICLE CONCENTRATION ON THE FERROFLUID LUBRICITY**

#### **Słowa kluczowe:**

smarność, lepkość, ferrociecz, aparat czterokulowy, graniczny nacisk zatarcia

#### **Key words:**

lubricity, viscosity, ferrofluid, four-ball tester, limiting pressure of seizure

#### **Streszczenie**

Przedmiotem zainteresowania autora i prowadzonych przezeń badań przedstawionych w niniejszej pracy są wybrane właściwości ferrocieczy.

Autor zakłada, iż stężenie cząstek magnetycznych w ferrocieczy może w istotny sposób wpływać na podstawowe własności samej ferrocieczy (gęstość, lepkość dynamiczną, smarność), jak również na parametry przepływowe oraz eksploatacyjne poprzecznych łożysk ślizgowych smarowanych ferrocieczą.

Celem niniejszej pracy jest przedstawienie wpływu stężenia cząstek magnetycznych na wartości smarności ferrocieczy. Badania przeprowadzone zostały na aparacie czterokulowym T-02U, a badaną ferrociecz stanowiła koloidalna mieszanina mineralnego oleju silnikowego o klasie lepkości SAE 15W-40 z cząstkami magnetycznymi  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  oraz surfaktantem.

---

\* Akademia Morska w Gdyni, ul. Morska 81-87, 81-225 Gdynia, e-mail: fryczm@am.gdynia.pl.

## WPROWADZENIE

Wyniki badań zawarte w niniejszej pracy są elementem szerszego projektu badawczego dotyczącego analizy zmian parametrów pracy poprzecznego łożyska ślizgowego smarowanego ferrociecżą. Analiza ta oparta zostanie na badaniach numerycznych i eksperymentalnych parametrów pracy łożyska ślizgowego. Do tego celu niezbędna jest jednak znajomość zmienności gęstości, smarności, a także lepkości dynamicznej ferrocieczy w zależności od stężenia cząstek magnetycznych  $Fe_3O_4$ , temperatury, a także wpływu kierunku, rodzaju i wartości indukcji pola magnetycznego. O ile w literaturze przedmiotu można znaleźć prace charakteryzujące ww. własności (np. temperatura, prędkość deformacji czy natężenie pola magnetycznego) [L. 1–3], o tyle temat wspomnianych zależności w aspekcie stężenia cząstek magnetycznych nie został jeszcze opracowany. W niniejszym artykule zostały scharakteryzowane własności smarność badanej ferrocieczy w zależności od zmian stężenia cząstek magnetycznych  $Fe_3O_4$  w oleju bazowym.

Specyficzne warunki pracy w węzle tarcia determinują własności, jakimi winien cechować się olej smarny. Dobór optymalnego oleju smarnego charakteryzującego się określonymi oczekiwanymi właściwościami fizykochemicznymi, decyduje więc o zakresie i jakości spełnianych przez niego funkcji. W szczególnych przypadkach, jak w warunkach braku grawitacji, w próżni czy też w przypadku działania silnych pól radioaktywnych lub magnetycznych, środek smarny musi sprostać tym bardzo nietypowym warunkom funkcjonowania węzła tarcia ślizgowego, które częstokroć uniemożliwiają stosowanie zwyczajowych środków smarnych. Podobne problemy z zachowaniem smarowania płynnego pojawiają się również w przypadku węzłów tarcia ślizgowego obciążanych siłami w szerokim zakresie. Rozwiązaniem może być zastosowanie środka smarnego o własnościach podanych na możliwość sterowania nimi, jak ma to miejsce w przypadku ferrocieczy. Specyficzna struktura budowy ferrocieczy sprawia, że jest ona dobrym ferromagnetykiem i ulega silnej polaryzacji magnetycznej w obecności zewnętrznych pól magnetycznych. Umożliwia to wpływanie na jej lepkość za pomocą zewnętrznego pola magnetycznego poprzez zmianę natężenia zewnętrznego pola magnetycznego, ale również poprzez zmianę stężenia cząstek magnetycznych.

## CHARAKTERYSTYKA BADANEJ FERROCIECZY I METODY BADANIA

W niniejszych badaniach dokonano pomiaru smarność ferrocieczy stanowiącej koloidalną mieszaninę mineralnego oleju silnikowego LongLife Gold firmy Penzsoil, o klasie lepkości SAE 15W-40 z cząstkami magnetycznymi  $Fe_3O_4$  oraz surfaktantem. Badana ferrociecza została wyprodukowana przez firmę FerroTec w Unterensingen (Niemcy).

Zawartość procentowa cząstek magnetycznych (objętościowo) w badanych próbkach ferrocieczy wynosiła 8% oraz 6%, 4%, 3%, 2% i 1%, a ich średnia średnica w przebadanych ferroolejach to 10 nm. Objętościowa zawartość surfaktantu stanowiła ok. 15–20% Vol. Nazwa surfaktantu nie została podana przez producenta, gdyż stanowi to jego tajemnicę handlową. Badaniu poddano również czysty mineralny olej silnikowy LongLife Gold stanowiący bazę mieszaniny.

Badania smarności przeprowadzone zostały na aparacie czterokulowym T-2U zgodnie ze wskazaniem normy PN-76/C-04147 wg metody oznaczania granicznego obciążenia zatarcia i granicznego nacisku zatarcia, opracowanej w ITeE – PIB [L. 4]. Zgodnie z procedurą zastosowanej metody w warunkach znormalizowanych poddano obciążeniu układ składający się z czterech kulek w obecności badanego oleju smarnego. Obciążenie wzrastało od zera w sposób ciągły. W wyniku badania zostały zarejestrowane charakterystyki zmian momentu tarcia, na podstawie których wyznaczone zostały wskaźniki: granicznego obciążenia zatarcia i granicznego nacisku zatarcia zgodnie z poniższym wzorem:

$$p_{oz} = 0,52 P_{oz}/d^2 \quad (1)$$

gdzie:  $p_{oz}$  – graniczny nacisk zatarcia [ $N/mm^2$ ],  
 $P_{oz}$  – graniczne obciążenie zatarcia [N],  
 $d$  – średnia średnica śladu zatarcia na powierzchni kulki [mm].

Liczba dokonanych prób była dla poszczególnych rodzajów oleju nie mniejsza niż 5, aż do uzyskania żądanej powtarzalności w granicach 10% uchybu dopuszczalnego od średniej arytmetycznej.

## ANALIZA WYNIKÓW POMIARÓW SMARNOŚCI

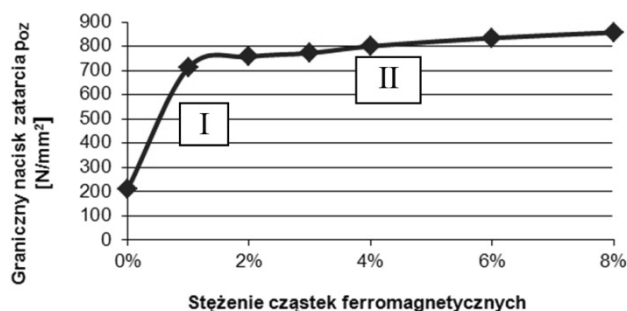
Poniższa tabela prezentuje wyznaczone wartości granicznego nacisku zatarcia uzyskane na podstawie analizy charakterystyk momentów tarcia.

**Tabela 1. Wartości granicznego obciążenia zatarcia  $P_{oz}$ , średniej średnicy szkar zatarcia  $d$ , granicznego nacisku zatarcia  $p_{oz}$  oraz obciążenie początku zatarcia  $P_t$  w zależności od stężenia cząstek ferromagnetycznych w badanych ferrocieczach**

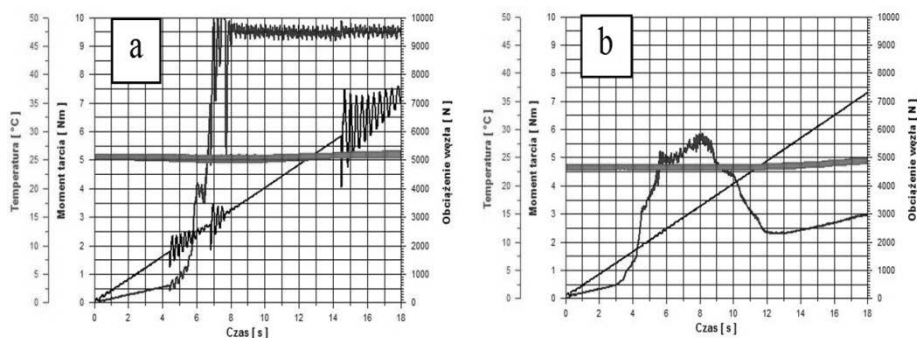
Table 1. The average values of seizure load  $P_{oz}$ , average diameter  $d$  of flaw, limiting pressure of seizure  $p_{oz}$  and scuffing load  $P_t$  according to on the concentration of ferromagnetic particles in the examined ferrofluids

	$P_{oz}$ , $d$ , $p_{oz}$ , $P_t$						
	Stężenie cząstek ferromagnetycznych w oleju [%]						
	o. bazowy	1	2	3	4	6	8
$P_{oz}$ [N]	2967	7300	7300	7300	7300	7300	7300
$d$ [mm]	2,711	2,311	2,239	2,217	2,178	2,133	2,105
$p_{oz}$ [ $N/mm^2$ ]	210	711	757	772	800	834	857
$P_t$ [N]	1819	1733	1867	1867	1933	2367	2367

Nawet wstępna analiza uzyskanych wyników wskazuje na skokową, jakościową zmianę warunków smarowania w węzle tarcia układu maszyny czterokulowej w sytuacji, gdy mineralny olej bazowy został zastąpiony ferroolejem wykonanym na bazie tego samego oleju mineralnego. Już minimalna 1% domieszka cząstek ferromagnetyku radykalnie wpłynęła na wzrost wartości wskaźnika granicznego nacisku zatarcia o 338% (obszar I). Wpływ kolejnych narastających stężeń na wzrost wartości ww. wskaźnika  $p_{oz}$  był już mniejszy, wyniósł kolejne 120% pomiędzy skrajnymi stężeniami 1% i 8% (obszar II), i wyraźnie wykazywał zależność wprost proporcjonalną, co ilustruje wykres przedstawiony na Rys. 1.



Rys. 1. Wpływ stężenia cząstek magnetycznych na wartości granicznego nacisku zatarcia  $p_{oz}$   
 Fig. 1. The effect of concentration of magnetic particles on the limiting pressure of seizure  $p_{oz}$



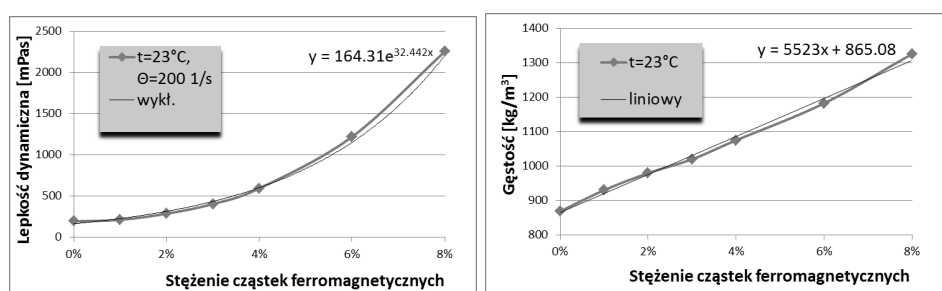
Rys. 2. Przykładowe charakterystyki momentów tarcia dla: a) mineralnego oleju bazowego, b) 2% ferrocieczy na bazie tego samego oleju mineralnego

Fig. 2. The examples of the friction torque's characteristics for: a) mineral base oil, b) 2% ferrofluid

Do jeszcze ciekawszych spostrzeżeń prowadzi analiza charakteru przebiegu uzyskanych wykresów momentów tarcia. Domieszka cząstek magnetycznych sprawiała, iż olej smarny każdorazowo odnawiał warstwę graniczną w warun-

kach badania, przeciwdziałając dalszemu zacieraniu się kulek. Poniżej, na **Rys. 2**, zaprezentowane zostały przykładowe przebiegi badawcze dla przypadków czystego oleju mineralnego i mieszaniny tego oleju z 2% cząstek magnetycznych ilustrujące odmienny charakter procesów zacierania. Ponadto należy odnotować, że wraz ze wzrostem stężenia cząstek magnetycznych w oleju smarującym czas odnowienia warstwy granicznej skracał się, a przebieg charakterystyki momentu tarcia stawał się łagodniejszy.

Uzyskane wyniki skłaniają autora ku hipotezie, że za zaobserwowane zjawisko jakościowego polepszenia smarności musi odpowiadać specyficzna budowa ferrocieczy stanowiącej mieszaninę koloidalną cząstek magnetycznych, oleju bazowego i surfaktantu. Celem potwierdzenia przypuszczeń podstawowe badania zostały uzupełnione o badania lepkości i gęstości [**L. 5**] ferrocieczy, co ilustrują dwa poniższe wykresy (**Rys. 3**).



**Rys. 3. Charakterystyki zmian lepkości dynamicznej i gęstości w aspekcie stężenia cząstek magnetycznych w ferrocieczy**

Rys. 3. The characteristics of changes in viscosity and density in terms of concentration of magnetic particles in ferrofluid

Brak bliskiej korelacji pomiędzy charakterystykami smarnościową, lepkościową i gęstościową wskazuje na złożoność zjawiska. Szczególnie odmiennosc przebiegów lepkościowego i smarnościowego wyklucza współzależność tych dwóch własności. Autor wnioskuję, że za zaobserwowany efekt wzrostu smarności odpowiada na równi budowa chemiczna ferrocieczy, jak i jej specyficzne własności fizyczne. Występujące w ferrocieczy cząstki magnetyczne jak i cząstki surfaktantu mają budowę dipolową [**L. 1**]. W literaturze przedmiotu [**L. 6**] wskazuje się na fakt, iż za smarność odpowiada właśnie obecność w oleju silnie spolaryzowanych cząstek zobojętniających działanie przyciągające wolnych sił międzycząsteczkowych powierzchni trących. O ile w większej objętości płynu, wpływ magnetycznych dipoli znosi się wzajemnie (w przypadku braku zewnętrznego pola magnetycznego), o tyle w warunkach warstwy granicznej w węźle tarcia może następować uporządkowanie struktury cząsteczkowej mieszaniny, tworzenie się długich spolaryzowanych łańcuchów drobin i ich współdziałanie objawiające się wzrostem smarności. Ponadto stosunkowo duże cząstki magnetyczne, dodatkowo „oblepione” cząstkami surfaktantu, mogą zachowywać się w szczeli-

nie smarnej jak „nanokulkowe” łożyska. To zjawisko odpowiadałoby głównie za „I” część zmian otrzymanej charakterystyki smarowości pomiędzy stężeniami 0% i 1%. Obserwowany dalszy wzrost smarowości, pomiędzy stężeniami 1% a 8% (obszar II na **Rys. 2**) wykazuje podobieństwo przebiegu z charakterystyką gęstości. W dostępnej literaturze [**L. 7**] postuluje się, iż wzrastająca masa molowa związków tworzących kompozycje oleju wpływa korzystnie na wartość smarowości. Taka sytuacja ma miejsce właśnie w przypadku zastosowanej ferrocieczy, a liniowy charakter zależności smarowości od wzrastającego stężenia cząsteczek magnetycznych potwierdza to założenie.

## WNIOSKI

Celem niniejszej pracy było przedstawienie wpływu stężenia cząstek magnetycznych na wartości smarowości ferrooleju. Badania doświadczalne przeprowadzone na aparacie czterokulowym, wykazały jednoznacznie, że obecność cząstek magnetycznych w oleju wpływa na znaczący wzrost jego smarowości. Ponadto wykazane zostało, że narastające stężenie tych cząstek również wywołuje wzrost smarowości, jak też innych podstawowych parametrów fizycznych ferrooleju, jak jego lepkość dynamiczna czy gęstość. Analiza charakteru zaobserwowanych zmian wskazuje na bliską korelację pomiędzy budową fizykochemiczną koloidalnej mieszaniny tworzącej ferroolej a jej badanymi własnościami.

Uzupełnieniem niniejszego tematu pracy byłoby przeprowadzenie badań doświadczalnych nad ww. własnościami ferroolejów o różnych stężeniach cząstek magnetycznych w obecności zewnętrznego pola magnetycznego. Pozyskany zestaw informacji dopełniałby obszar wiedzy konieczny do przeprowadzenia planowanego projektu badawczego dotyczącego analizy zmian parametrów pracy poprzecznego łożyska ślizgowego smarowanego ferroolejem.

## LITERATURA

1. Rosensweig R. E.: Ferrohydrodynamics, Dover Publications INC, Mineola, New York 1997.
2. Ivanov A. O., Kuznetsova O. B.: Magnetic Properties of Dense Ferrofluids. Elsevier, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 252, 2002, pp. 135–137.
3. Miszczak A.: Tribological properties of ferro-oil. Journal of Friction and Wear, (Trenie i Iznos) Białoruska Akademia Nauk, 2006, Vol.27, No.3, pp. 330–336.
4. Piekoszewski W., Szczerek M, Tuszyński W.: The action of lubricants under extreme pressure conditions in modified four-ball tester, Wear 249, 2001, pp. 188–193.
5. Frycz M., Wpływ temperatury i stężenia cząstek magnetycznych Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> na wartość gęstości ferrocieczy wykonanej na bazie oleju silnikowego, Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej, Vol. 64, 2010, s. 51–58.
6. Hebda M., Wachal A.: Trybologia, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1980.

7. Beran E.: Wpływ budowy chemicznej bazowych olejów smarowych na ich biodegradowalność i wybrane właściwości eksploatacyjne, Prace Naukowe Wydziału Chemicznego Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2008.

### Summary

**The subject of the author's research, whose results are presented in this article, are the chosen properties of ferrofluid.**

**The author assumes that the concentration of magnetic particles in ferrofluid may significantly affect the basic properties of the ferrofluid like: density, dynamic viscosity, or lubricity, as well as flow and operating parameters of journal bearings lubricated with ferrofluids.**

**The purpose of this paper is to present the impact of the concentration of magnetic particles in the ferrofluid on its lubricity. Experimental investigations were performed on the four-ball T-02U tester, and the tested ferrofluid was a mixture of colloidal mineral motor oil SAE 15W-40 with  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  magnetic particles and the surfactant. This work is part of a wider study on the analysis of changes in operating parameters of journal bearings lubricated with ferrofluids.**

