

Marcin FRYCZ*, Paweł ANIOŁ*

**EKSPERYMENTALNA METODA WYZNACZENIA
WSPÓLCZYNNIKÓW PODATNOŚCI
MAGNETYCZNEJ χ FERROOLEJÓW O RÓŻNYM
STĘŻENIU CZĄSTEK MAGNETYCZNYCH**

**EXPERIMENTAL METHOD OF DETERMINING
THE MAGNETIC SUSCEPTIBILITY COEFFICIENT
 χ FOR FERRO-OILS WITH DIFFERENT
CONCENTRATIONS OF MAGNETIC PARTICLES**

Słowa kluczowe:

ferroolej, współczynnik podatności magnetycznej, stężenie cząstek magnetycznych

Key words:

ferro-oil, magnetic susceptibility coefficient, magnetic particle's concentration

Streszczenie

W niniejszym artykule została zaprezentowana budowa stanowiska badawczego do eksperymentalnego wyznaczenia współczynników podatności magnetycznej

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

χ ferroolejów o różnym stężeniu cząstek magnetycznych oraz została przedstawiona analiza wyników pozyskanych tą metodą. Zewnętrzne, jednorodne, stałe pole magnetyczne uzyskano za pomocą dwóch płytek stałych magnesów umieszczonych równolegle, a zmiany wartości pola zadawano poprzez możliwość kontrolowanego przemieszczania tych magnesów względem siebie. Pomiędzy magnesami umieszczona została próbka badanego oleju, a wartości natężenia pola magnetycznego pomierzono z użyciem miernika indukcji pola magnetycznego Smart Magnetic Sensor SMS 102. Badaniom poddano ferrooleje o wybranych stężeniach cząstek magnetycznych, tj.: 8%, 6%, 4% oraz 2% objętościowo.

WPROWADZENIE

Niniejszy artykuł odnosi się do projektu badawczego dotyczącego analizy hydrodynamicznego smarowania poprzecznych łożysk ślizgowych ferroolejami o różnym stężeniu cząstek magnetycznych. Celem wyznaczenia wartości parametrów przepływowych czynnika smarującego, jego prędkości, ciśnienia hydrodynamicznego czy parametrów eksploatacyjnych ww. łożysk ślizgowych, takich jak: siła nośna, siła tarcia czy współczynnik tarcia, niezbędne jest m.in. uprzednie pozyskanie odpowiednich wartości składowych wektora namagnesowania \mathbf{N} , składowych wektora indukcji magnetycznej \mathbf{B} oraz składowych wektora natężenia pola magnetycznego \mathbf{H} . Zasadniczy problem polega na niemożności bezpośredniego dokładnego pomiaru wartości indukcji magnetycznej w szczelinie smarnej łożyska ślizgowego. Rozwiązaniem pozostaje wyznaczenie składowych ww. wektorów na drodze analityczno-numerycznej. Dotychczas uzyskane przez autorów wyniki prac zaprezentowane m.in. w [L. 1, 2, 3] wskazują na konieczność wprowadzenia do równań analitycznych możliwie zbliżonych do rzeczywistości wartości współczynników podatności magnetycznej ferrooleju celem wyznaczenia równie poprawnych wartości składowych wektorów namagnesowania \mathbf{N} , indukcji magnetycznej \mathbf{B} czy natężenia pola magnetycznego \mathbf{H} , a w konsekwencji poszukiwanych parametrów eksploatacyjnych badanych łożysk ślizgowych. Jest to kluczowy problem, tym bardziej iż wyniki analizy analityczno-numerycznej mają docelowo służyć weryfikacji wyników badań eksperymentalnych. Podjęty w niniejszej pracy temat stanowi próbę pozyskania wartości poszukiwanych współczynników podatności magnetycznej χ ferroolejów o wybranych stężeniach cząstek magnetycznych, a także, w miarę możliwości, określenie jakościowych i ilościowych zależności między tymi wielkościami.

W uzupełnieniu tego wprowadzenia warto choć w kilku zdaniach objaśnić, jakimi zaletami charakteryzują się rozwiązania techniczne konstrukcji łożysk smarowanych ferroolejami. W odróżnieniu od typowych cieczy ferroolej jest w warunkach pokojowych dobrym ferromagnetykiem i ulega silnej polaryzacji magnetycznej w obecności zewnętrznych pól magnetycznych. Jest to własność umożliwiająca sterowanie jego lepkością za pomocą zewnętrznego pola magne-

tycznego. Ponadto ferroolej charakteryzuje się dobrymi właściwościami tłumienia drgań, zatem naturalnie przeciwdziała wibracjom i nadmiernemu hałasowi w pracujących łożyskach. Eksploatacja łożysk ślizgowych w specyficznych warunkach pracy, jak choćby przy braku grawitacji, w próżni czy też w przypadku działania silnych pól radioaktywnych lub magnetycznych, napotyka na poważne problemy w przypadku stosowania klasycznych czynników smarujących. Zachowanie smarowania płynnego staje się problematyczne również w przypadku węzłów tarcia ślizgowego obciążanych siłami w szerokim zakresie. W takich przypadkach możliwe jest zastosowanie jako czynnika smarującego ferrooleju. Sterowanie zewnętrznym polem magnetycznym umożliwi w tych wszystkich szczególnych warunkach z jednej strony samotrzymywanie czynnika smarującego w szczelinie smarnej z drugiej – zmianę jego lepkości. Wartościami ciśnienia hydrodynamicznego czynnika smarującego w szczelinie smarnej można sterować poprzez dobór stężenia cząstek magnetycznych, jak i zmianę natężenia zewnętrznego pola magnetycznego. I właśnie ten ostatni aspekt stanowi szczególnie obszar zainteresowania i badań autorów artykułu.

PODSTAWY TEORETYCZNE

Polem magnetycznym określamy pole sił oddziałujących na swobodne, poruszające się ładunki elektryczne atomów, jak i na ciała posiadające moment magnetyczny niezależnie od ich ruchu w tym polu. Wielkością charakteryzującą to pole niezależnie od właściwości magnetycznych środowiska, w którym jest rozpatrywane, jest wektor natężenia pola magnetycznego \mathbf{H} . Wielkość ta powiązana jest z inną podstawową wielkością charakteryzującą pole magnetyczne, ale odniesioną do właściwości magnetycznych ośrodka, tj. wektorem indukcji magnetycznej \mathbf{B} znaną powszechnie zależnością:

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (1)$$

gdzie:

\mathbf{B} – wektor indukcji magnetycznej [T = N/Am],

\mathbf{H} – wektor natężenia pola magnetycznego [A/m],

μ – bezwzględna przenikalność magnetyczna ośrodka [H/m].

W praktyce μ stanowi cechę, właściwość magnetyczną materiału ośrodka i najczęściej, celem umożliwienia porównywania różnych materiałów, stosowana jest jako iloczyn przenikalności magnetycznej względnej i przenikalności magnetycznej próżni:

$$\mu = \mu_r \mu_0 \quad (2)$$

gdzie:

μ_r – względna przenikalność magnetyczna ośrodka,

μ_0 – przenikalność magnetyczna próżni = $4\pi \cdot 10^{-7}$ [H/m].

Charakter zależności $\mathbf{B} = f(\mathbf{H})$ zależy wyłącznie właśnie od własności magnetycznych rozpatrywanego ośrodka. Zasadniczo wszelkie ciała poddane działaniu zewnętrznego pola magnetycznego można sklasyfikować ze względu na tę zależność na: materiały o właściwościach diamagnetycznych, paramagnetycznych lub ferromagnetycznych. Poddany badaniom i rozpatrywany w tej pracy ferroolej jest ferromagnetykiem, ale o nieco nietypowej, wyróżniającej go charakterystyce. W odróżnieniu od klasycznych, stałych ferromagnetyków ferroolej jest koloidalną mieszaniną cząstek ferromagnetycznych, rozmiaru ok. 10 nm z bazowym olejem (w tym wypadku mineralnym) w obecności dodatku substancji surfaktantu zapobiegającej koagulacji cząstek aktywnych magnetycznie. Budowa taka ma znamienne znaczenie w kontekście rozpatrywanych własności magnetycznych. Pojedyncze cząsteczki magnetyczne stanowią pojedyncze domeny magnetyczne, których chaotyczne ułożenie ulega zorientowaniu w momencie pojawienia się zewnętrznego pola magnetycznego, zgodnie z kierunkiem i zwrotem linii sił tego pola. Co oczywiste, te pojedyncze domeny nie ulegają „powiększeniu”, jak to ma miejsce w stałych ferromagnetykach, a jedynie ukierunkowują się pod działaniem sił pola magnetycznego. Również w odróżnieniu do stałych ferromagnetyków ferroolej nie ulega stałemu namagnesowaniu i w chwili zaniknięcia oddziaływania zewnętrznego pola magnetycznego powraca do stanu magnetycznej neutralności objawiającego się przypadkowym zorientowaniem momentów magnetycznych poszczególnych cząsteczek [L. 4]. Tak charakterystyczne zjawisko dla ferromagnetyzmu, jak histereza również, z tych samych przyczyn, nie ma miejsca w przypadku ferroolejów. Ponadto ferrooleje stosunkowo szybko ulegają nasyceniu magnetycznemu w porównaniu ze stałymi ferromagnetykami, gdyż w przeciwieństwie do nich nie muszą pokonywać sił wynikających ze skomplikowanej budowy domenowej. O ile początkowo dla niewielkich wartości natężenia pola magnetycznego wykazują wyraźne anizotropowe własności magnetyczne, o tyle dla odpowiednio dużych wartości natężenia zewnętrznego pola ich wektor namagnesowania \mathbf{N} , będący kierunkiem wypadkowego momentu magnetycznego substancji, w chwili nasycenia magnetycznego pokrywa się z kierunkiem oddziaływania sił zewnętrznego pola magnetycznego. Można z powodzeniem założyć [L. 5], iż podatność magnetyczna ferrooleju wynikająca z równania wektorowego wiążącego wektory namagnesowania \mathbf{N} z wektorem natężeniem pola magnetycznego \mathbf{H}

$$\chi = \mathbf{N} / \mathbf{H} \quad (3)$$

gdzie:

\mathbf{N} – wektor namagnesowania [A/m],

χ – podatność magnetyczna substancji [-],

w stanie pełnego nasycenia magnetycznego jest skalarem.

Wartości podatności magnetycznej χ zależą głównie od właściwości fizykochemicznych danego, rozpatrywanego ferrooleju, w tym od wielkości i ilości cząstek magnetycznych (stężenia), jak również od wielkości momentu magnetycznego, rodzaju i kierunku pola magnetycznego czy temperatury, tj. wielkości, od których zależą współczynniki w równaniu Curie-Weissa:

$$\chi = C / (T - T_C) \quad (4)$$

$$C = n\mu^2 / 3k_n \quad (5)$$

gdzie:

C – stała Curie [K],

T – temperatura [K],

T_C – temperatura Curie dla rozważanego ferromagnetyka [K],

n – koncentracja atomów.

Przyjmując za [L. 6] zależność wiążącą wektory indukcji magnetycznej \mathbf{B} , natężenia pola magnetycznego \mathbf{H} i namagnesowania \mathbf{N} dla ferroolejów wyraża się poniższą zależnością:

$$\mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{N}), \quad \mathbf{N} = \mathbf{H} \cdot \chi \quad (6)$$

stąd

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} (1 + \chi) \quad (7)$$

CHARAKTERYSTYKA BADANEGO FERROOLEJU I BUDOWA STANOWISKA BADAWCZEGO

W niniejszych badaniach dokonano pomiarów indukcji magnetycznej \mathbf{B} w próbkach ferroolejów stanowiących koloidalną mieszaninę mineralnego oleju silnikowego LongLife Gold firmy Penzsoil, o klasie lepkości SAE 15W-40 z cząstkami magnetycznymi Fe_3O_4 oraz surfaktantem. Badany ferroolej został wyprodukowany przez firmę FerroTec w Unterensingen (Niemcy).

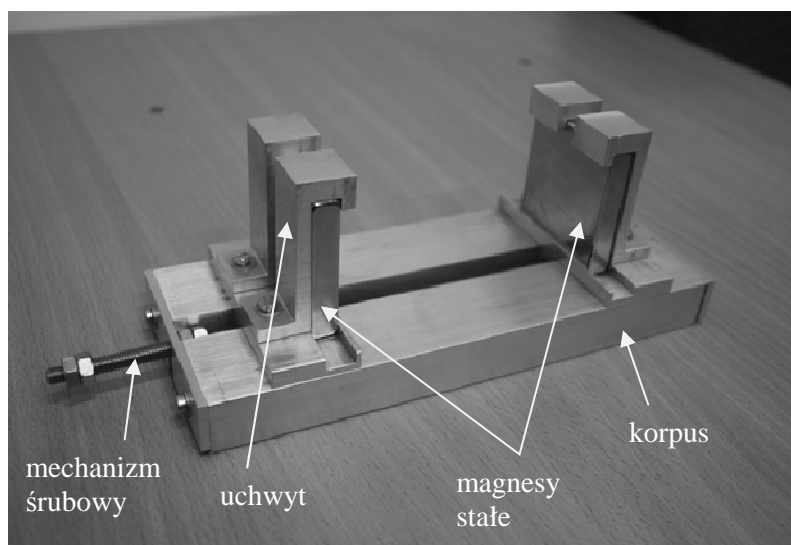
Zawartość procentowa cząstek magnetycznych (objętościowo) w badanych próbkach ferrooleju wynosiła 8% oraz 6%, 4% i 2%, a ich średnia średnica to 10 nm. Objętościowa zawartość surfaktantu stanowiła ok. 15% vol. Nazwa surfaktantu nie została podana przez producenta, gdyż stanowi to jego tajemnicę handlową. Dla celów zrównoważenia próbek 4% oraz 2% wykonanych poprzez rozcieńczenie oryginalnej 8% próbki producenta został dodany dodatek 25% roztworu wodorotlenku cztero-metyloamonowego $(\text{CH}_3)_4\text{NOH}$ jako zastępczy surfaktant.

Badania przeprowadzone zostały na samodzielnie zaprojektowanym i skonstruowanym stanowisku. Stanowisko składa się z układu dwóch stałych magnesów neodymowych o wymiarach $50 \times 50 \times 10$ mm umieszczonych

w ruchomych szczękach, zmiana rozstawienia których realizowana jest za pomocą układu mechanizmu „śruby rzymskiej”. Dokładność zmian rozstawienia wynosiła 0,1 mm, a zakres możliwych zmian wynosił 20–100 mm. Wszystkie elementy stanowiska badawczego zostały wykonane z materiałów niemagnetycznych – aluminium i mosiądzu.

Próbki badanego ferrooleju umieszczane były w specjalnie przystosowanym do tego pojemniku z tworzywa sztucznego, którego konstrukcja zapobiegała „wyciąganiu” ferrooleju przez zewnętrzne pole magnetyczne i umożliwiała stabilne, powtarzalne umocowanie sondy pomiarowej.

Budowę stanowiska prezentuje poniższy **Rys. 1**.



Rys. 1. Budowa stanowiska do badania podatności magnetycznej χ ferrooleju

Fig. 1. The testing bench for magnetic susceptibility coefficient χ of ferro-oils

Pomiarów indukcji pola dokonano za pomocą miernika indukcji pola magnetycznego Smart Magnetic Sensor SMS 102 wykorzystującego efekt Halla. Realizowana dokładność pomiarów wynosiła 0,1 mT. Umieszczony poniżej **Rys. 2** prezentuje opisany miernik z przymocowaną do niego sondą pomiarową.

Prezentowane wyniki pomiarów stanowią uśrednione wartości z serii pomiarowych. Dla każdego z wybranych stężeń próbek ferrooleju dokonano co najmniej 6 powtórzeń, w których powtarzalność otrzymywanych wyników mieściła się w założonych granicach 5%.

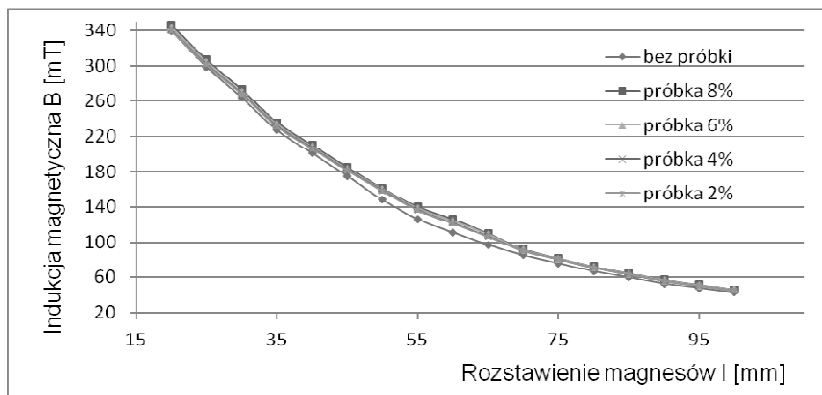


Rys. 2. Miernik hallotronowy SMS102 wraz z sondą pomiarową
Fig. 2. Hall Effect Meter SMS102, together with the measuring probe

BADANIA EKSPERYMENTALNE I ANALIZA WYNIKÓW POMIARÓW

Badania eksperymentalne przeprowadzone zostały na dwóch etapach. Na pierwszym z nich wyznaczono charakterystykę $H = f(l)$ natężenia pola magnetycznego H w geometrycznym środku układu pomiarowego w zależności od rozstawienia magnesów stałych l . W tym celu przyjęte zostały pewne kluczowe założenia, a mianowicie, że pole magnetyczne jest w rozpatrywanym obszarze stałe, jednorodne i jednokierunkowe, zorientowane prostopadle do powierzchni czołowej magnesów. Ponadto przyjęto uproszczenie polegające na założeniu, że wektory indukcji magnetycznej B oraz natężenia pola magnetycznego H w powietrzu są do siebie równoległe i mają taki sam zwrot. W rzeczywistości powietrze jest paramagnetykiem, ale najsłabszym z poznanych w przyrodzie, o wartości względnej przenikalności magnetycznej wynoszącej $\mu_r = 1,00000037$ (w warunkach normalnych).

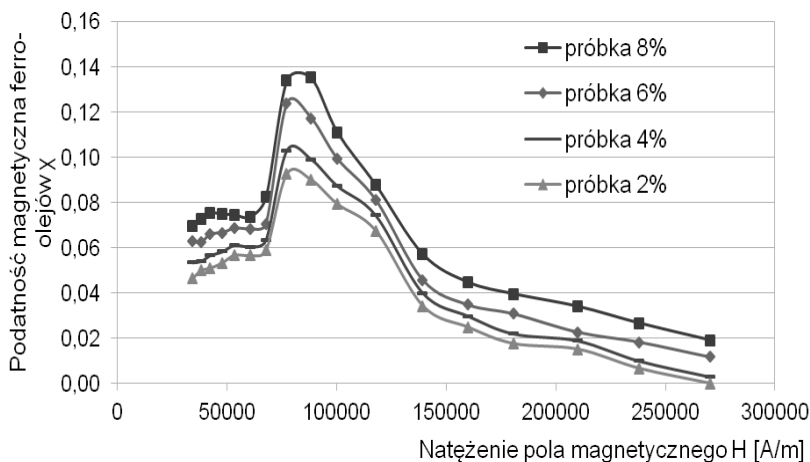
Na drugim etapie przeprowadzone zostały analogiczne pomiary indukcji magnetycznej B w tym samym punkcie przestrzeni i dla tych samych wartości rozstawienia magnesów, ale w obecności próbek ferrooleju o wybranych stężeniach cząstek magnetycznych. Otrzymane wyniki prezentuje Rys. 3 zamieszczony poniżej.



Rys. 3. Charakterystyka $B = f(l)$ dla badanych ferroolejów

Fig. 3. The $B = f(l)$ characteristics for the tested ferrooils

Analiza wyników zaprezentowanych na **Rys. 4** wymagała wstępnego zidentyfikowania takiego rozstawienia magnesów, przy którym wartość natężenia pola magnetycznego jest wystarczająco duża, by ferroolej osiągnął stan nasycenia magnetycznego.



Rys. 4. Charakterystyka $\chi = f(H)$ dla badanych ferroolejów

Fig. 4. The $\chi = f(H)$ characteristic for the tested ferro-oils

Obszar ten przypadają na wartości natężenia pola H od 67500 do 77800 A/m w zależności od stężenia cząstek magnetycznych w badanej próbce. Dla wyższych stężeń osiągał wartości wyższe. Przyjęte zostało, iż dopiero powyżej

tych wartości natężenia pola wektor namagnesowania \mathbf{N} ferrooleju miał ten sam kierunek i zwrot co wektor natężenia pola magnetycznego \mathbf{H} , a otrzymane wyniki stawały się miarodajne. Przy większych rozstawieniach magnesów wpływ anizotropowości ferrooleju zafałszowywał otrzymywane wyniki z zastosowaniem przyjętej metody obliczeniowej. Uzyskane maksymalne wartości podatności magnetycznej ferrooleju χ wynoszące od 0,0928 dla próbki 2% do 0,135 dla próbki 8% dobrze korespondują z wynikami, na jakie autorzy natrafili w dostępnej literaturze, m.in. w [L. 7, 8] pozyskanymi za pomocą metody z krzywą Langevina. Również przebieg charakterystyki $\chi = f(H)$ w tym obszarze jest zgodny z zakładanym.

WNIOSKI

Celem niniejszej pracy było wyznaczenie charakterystyki zmian wartości podatności magnetycznej χ od wielkości natężenia pola magnetycznego dla próbek ferroolejów o różnym stężeniu cząstek magnetycznych. Zastosowana uproszczona metoda pomiarowa pozwoliła na uzyskanie satysfakcjonujących wyników tych wartości dla warunków pełnego nasycenia magnetycznego ferroolejów. W obszarach pomiarowych o niższych wartościach natężenia pola magnetycznego wpływ anizotropowości ferrooleju znacząco zafałszował wyniki.

Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, iż istnieje zależność pomiędzy stężeniem cząstek magnetycznych w badanym ferrooleju a wartością jego podatności magnetycznej. Wraz ze wzrostem stężenia wzrasta też wartość podatności. Każde kolejne 2% stężenia cząstek magnetycznych objawia się ok. 15% wzrostem wartości współczynnika podatności magnetycznej ferrooleju.

Ponadto warto zwrócić również uwagę na fakt, że w całym zakresie przeprowadzonych badań zaobserwowano wzrost indukcji natężenia pola magnetycznego B w próbkach ferrooleju w porównaniu z pomiarami przeprowadzonymi dla warunków odniesienia – bez próbki. Wielkość zaobserwowanego wzrostu ΔB wynosiła od 1% do nawet 13%. Największe względne przyrosty dotyczyły wartości w warunkach, gdy próbki ferrooleju osiągały stan nasycenia. Również tutaj zaobserwowano zależność pomiędzy wartością przyrostu indukcji a stężeniem cząstek magnetycznych. Im wyższe było stężenie cząstek, tym przyrosty ΔB indukcji również wzrastały.

Nadmienić należy, iż uzyskane wyniki pomiarów dotyczą należycie wymieszanego ferrooleju, a czas pomiaru na stanowisku badawczym i jego charakter nie był wystarczająco długi, by mogło zaistnieć zjawisko sedymentacji czy też koagulacji cząstek magnetycznych. W przypadku warunków realnej eksploatacji w niektórych rozwiązaniach konstrukcyjnych zjawisko to może w istotny sposób wpłynąć na wartość mierzonych wielkości, w szczególności dla cieczy magnetoreologicznych, których rozmiary cząstek magnetycznych są wielokrotnie większe niż dla ferroolejów.

LITERATURA

1. Frycz M., Anioł P.: Temperature distribution In the gap of sidle journal bearings lubricated with ferrofluids for diffrent concentration of magnetic particles, *Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej*, Vol. 81, 2013, pp. 38–54.
2. Frycz M.: Parametry eksploatacyjne poprzecznych łożysk ślizgowych smarowanych ferrociecżą o różnym stężeniu cząstek magnetycznych, *Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej*, Vol.71, 2011, s. 49–62.
3. Frycz M., Miszczak A.: Wzdłużne pole magnetyczne w szczelinie poprzecznego łożyska ślizgowego, *Tribologia*, nr 6/2011, s. 77–86.
4. Odenbach S.: *Magnetoviscous Effects in Ferrofluids*, Springer, 2013, Germany.
5. Miszczak A.: *Analiza hydrodynamicznego smarowania ferrociecżą poprzecznych łożysk ślizgowych*, Akademia Morska w Gdyni, 2006, Gdynia.
6. Rosensweig R.E.: *Ferrohydrodynamics*, Dover Publications INC, Mineola, New York 1997.
7. Skumiel A., Łabowski M., Józefczak A.: The measurements of anisotropy of ultrasound propagation and magnetic susceptibility in viscous ferrofluid, *Ultrasonics*, No. 40/2002, pp. 341–344.
8. Kazimierska-Drobny K., Konop J., Nowak B.: *Ferrociecze. Propagacja fal ultradźwiękowych w nasyconym ferrociecżą miękkim magnetycznie materiale porowatym*, praca badawcza pod kierunkiem prof. Kubika J. w ramach Kursu Eksperckiego Smart-Technology Export School, Bydgoszcz.

Summary

This paper presents the construction of an experimental test bench to determine the magnetic susceptibility coefficients χ of ferro oils with different concentrations of magnetic particles, and also the analysis of the results that were obtained by this method. The outer, homogeneous, constant magnetic field was obtained by means of the two plates of permanent magnets arranged in parallel, and changes the field value were carried out by the possibility of controlled movement of the magnets relative to each other. Samples of lubricants were placed between the magnets, and the magnetic field strength was measured by using the magnetic induction SMS Smart Magnetic Sensor 102. Ferro oils with selected concentrations of magnetic particles of 8%, 6%, 4%, and 2% were studied.