

Józef SALWIŃSKI¹, Wojciech HORAK², Marcin SZCZĘCH³

STANOWISKO DO BADANIA WZDŁUŻNYCH ŁOŻYSK ŚLIZGOWYCH SMAROWANYCH CIECZAMI MAGNETYCZNYMI

Streszczenie. W ostatnich latach obserwuje się rozwój konstrukcji ślizgowych łożysk poprzecznych i wzdluznych z cieczami magnetycznymi. Istotą działania tego typu łożysk jest utrzymywanie płynnego środka smarnego w bardzo wąskiej szczelinie łożyska za pomocą oddziaływania pola magnetycznego; w takich układach ciecz magnetyczna spełnia jednocześnie funkcję smarowania i uszczelniania łożyska. W artykule przedstawiono opis stanowiska badawczego przeznaczonego do badania wzdluznych łożysk ślizgowych smarowanych cieczami magnetycznymi. Przedstawiono opis budowy stanowiska oraz charakterystykę możliwości pomiarowych.

Słowa kluczowe: ciecz magnetyczna, stanowisko badawcze, wzdluzne łożyskowanie ślizgowe

EXPERIMENTAL APPARATUS FOR EXAMINATION OF MAGNETIC FLUID LUBRICATED THURST BEARING

Summary. In recent years, there has been development of the structure of thrust bearing with magnetic fluids. The essence of this type of bearing is to maintain a liquid lubricant in a very narrow gap with magnetic fluid by a magnetic field. Such systems can act as the bearing lubrication and sealing. This paper presents description of the experimental apparatus for examination magnetic fluid lubricated thrust bearing. Description of the construction and characteristics of the measuring possibilities were presented.

Keywords: magnetic fluid, experimental apparatus, thrust bearing

1. WSTĘP

Ciecze magnetyczne są zawiesinami mikroskopijnych cząstek o właściwościach ferromagnetycznych w cieczy nośnej (zazwyczaj wodzie lub oleju). Unikatywne właściwości cieczy magnetycznych polegają na możliwości odwracalnej, niemal natychmiastowej zmiany

¹ AGH University of Science and Technology, Department of Machine Design and Technology, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, e-mail: jsalwin@agh.edu.pl

² AGH University of Science and Technology, Department of Machine Design and Technology, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, e-mail: horak@agh.edu.pl

³ AGH University of Science and Technology, Department of Machine Design and Technology, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, e-mail: szczech@agh.edu.pl

ich parametrów reologicznych, a nawet zmiany kierunku przepływu na skutek oddziaływania pola magnetycznego.

W zależności od rozmiarów cząstek można wyróżnić dwa rodzaje cieczy magnetycznych: ferrociecze (FF), produkowane na bazie cząstek magnetycznych o średnicy rzędu kilku nanometrów [1], oraz cieczy magnetoreologiczne (MRF), w których znajdują się cząsteczki o rozmiarach rzędu kilku mikrometrów [2]. Cząsteczki cieczy ferromagnetycznych zawierają pojedyncze domeny magnetyczne, przez co ich zachowanie znacznie różni się od zachowania cieczy magnetoreologicznych. Ze względu na różnice w zachowaniu obydwu substancji znajdują one zastosowanie w różnych aplikacjach technicznych. W urządzeniach mechanicznych ferrociecze są stosowane przede wszystkim w konstrukcji uszczelnień [2], natomiast cieczy magnetoreologiczne są wykorzystywane w tłumikach drgań, hamulcach oraz sprzęgłach [4]. Prowadzone są również prace nad opracowaniem i wdrożeniem łożysk tarcia płynnego [5, 6], w których jako środek smarny została użyta ciecz magnetyczna.

Możliwość sterowania właściwościami reologicznymi cieczy magnetycznych jest główną przyczyną prowadzenia rozważań nad zastosowaniem cieczy tego typu jako środka smarnego.

Ciecze magnetyczne niepoddane działaniu pola magnetycznego wykazują właściwości w zasadzie nieodbiegające od zachowania się typowych zawiesin. Oddziaływanie polem magnetycznym na FF umożliwia utrzymywanie jej za pośrednictwem sił pola magnetycznego w stałym położeniu. Ta cecha jest wykorzystywana w konstrukcji uszczelnień. Zmiana właściwości reologicznych jest o wiele mniejsza niż w przypadku cieczy MR. Poddanie cieczy MR działaniu pola magnetycznego powoduje zmianę mikrostruktury substancji, co w skali makroskopowej jest obserwowane jako zmiana lepkości cieczy i granicznego naprężenia płynięcia. Zakres zmian właściwości cieczy magnetoreologicznych jest funkcją wielu parametrów, a przede wszystkim: objętościowego udziału cząstek magnetycznych w cieczy, właściwości magnetycznych materiału cząstek, rozmiaru i kształtu cząstek oraz parametrów pola magnetycznego.

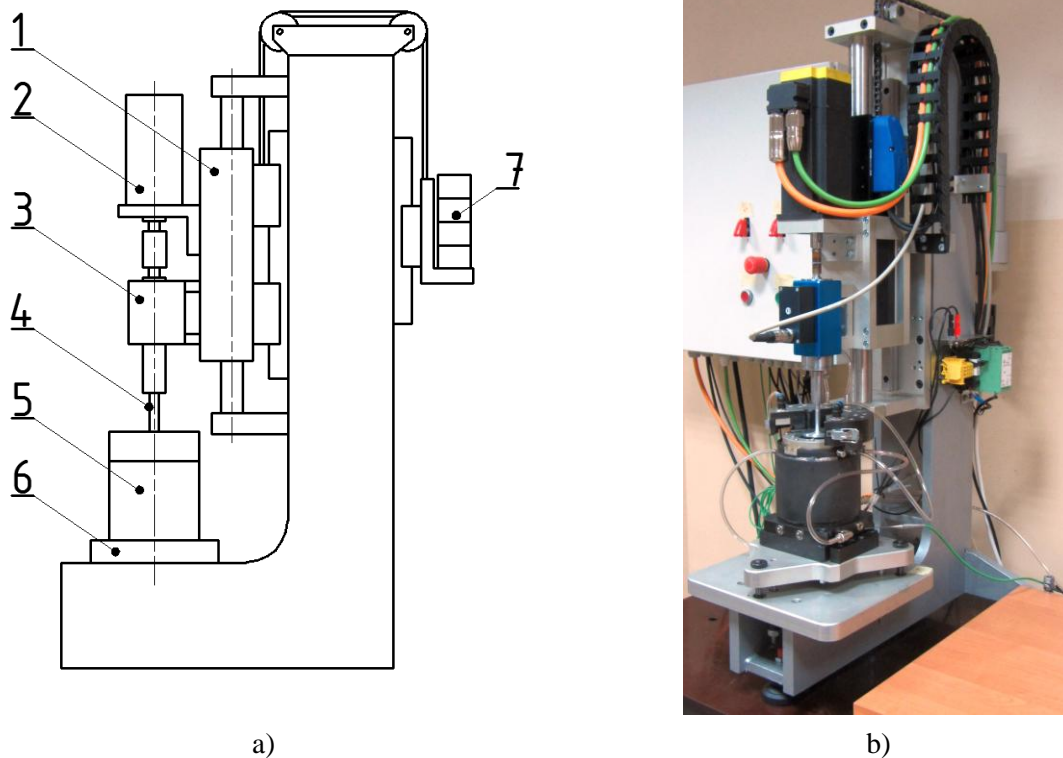
2. KONSTRUKCJA STANOWISKA BADAWCZEGO

W ramach realizowanego w Katedrze Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn AGH projektu badawczego opracowano konstrukcję oraz zbudowano urządzenia badawcze przeznaczone do badania wzdłużnych łożysk ślizgowych, w których jako środek smarny może być zastosowana ciecz magnetyczna.

Schemat konstrukcji omawianego stanowiska oraz fotografię opracowanej konstrukcji przedstawiono na rysunku 1. Stanowisko umożliwia przeprowadzanie badań łożysk przy sterowanych warunkach oddziaływania pola magnetycznego, w warunkach stabilizacji termicznej, przy dowolnie zadanym wymuszeniu liniowym i prędkością obrotową.

Parametry pracy stanowiska są kontrolowane przez komputerowy system pomiarowy, pełniący również funkcję systemu akwizycji danych pomiarowych.

Zasadniczą częścią konstrukcji omawianego stanowiska (rys. 1a) jest rama, na której zamocowano zespół napędowy składający się z serwosilnika liniowego (poz. 1), który powoduje przemieszczenie zamocowanego na nim serwosilnika obrotowego (poz. 2). W celu zmniejszenia obciążenia silnika liniowego ciężar układu napędowego jest równoważony przez przeciwwagę (poz. 7). Takie rozwiązanie pozwoliło na uzyskanie większej dynamiki pracy układu.



Rys. 1. a) Schemat konstrukcji stanowiska, b) fotografia urządzenia
 Fig. 1. a) Schematic view of apparatus construction, b) photography of device

Głównym elementem pomiarowym stanowiska badawczego jest obrotowy przetwornik momentu obrotowego oraz siły wzdluznej (poz. 3), na którym zamocowana jest wymienna, ruchoma płytka badanego lozyska (poz. 4). Nieruchoma płytka lozyska jest umieszczona wewnątrz komory badawczej (poz. 5) wytwarzającej pole magnetyczne o sterowanym natężeniu. Komora badawcza jest umieszczona na stoliku nastawnym, umożliwiającym precyzyjne ustawienie koncentryczności oraz równoległości współpracujących powierzchniami badanego lozyska wzdluznego.

2.1. Zespół napędowy i sterowanie

W omawianej konstrukcji można wyróżnić dwa niezależne układy napędowe: układ pozycjonowania płytki ruchomej badanego lozyska oraz układ napędowy ruchu obrotowego.

Prędkość obrotową badanego lozyska generuje serwosilnik (poz. 2) w zakresie $0 \div 7000$ obr/min, przy czym istnieje możliwość wyboru sposobu sterowania pracą silnika, tj. sterowanie prędkością obrotową, momentem obrotowym bądź pozycją kątową wału. Zastosowany serwosilnik pozwala na precyzyjne zadawanie oraz bieżący odczyt położenia kąтового wirnika. Ponadto istnieje możliwość pomiaru momentu obrotowego bezpośrednio na silniku za pomocą wbudowanego układu pomiarowego.

Układ pozycjonowania płytki ruchomej, odgrywający również rolę układu zadawania obciążenia wzdluznego badanego lozyska, został zbudowany na bazie serwosilnika liniowego. Takie rozwiązanie umożliwia precyzyjne zadawanie pozycji płytki ruchomej lozyska. Zastosowany liniał laserowy pozwala na uzyskanie dokładności pozycjonowania rzędu $1 \mu\text{m}$. Silnik liniowy umożliwia uzyskanie znacznej dynamiki pracy układu. Ponadto możliwe jest

odtworzenie przez silnik dowolnego zadanego przebiegu zmienności pozycji, co pozwala na symulowanie złożonych zmian obciążenia wzdłużnego łożyska.

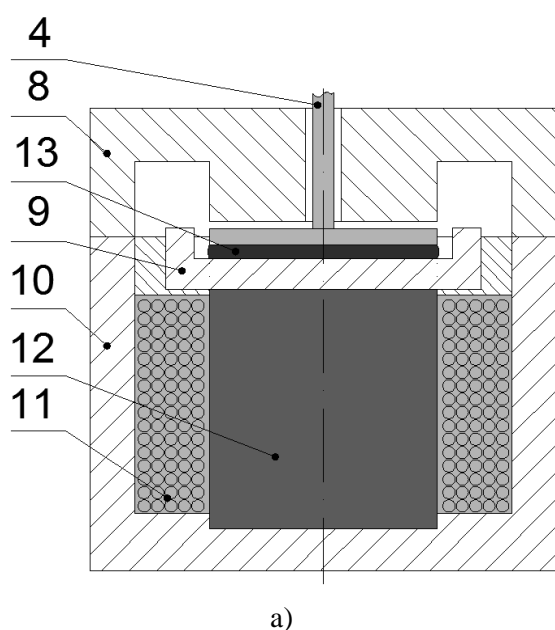
Parametry pracy serwo-silnika obrotowego oraz liniowego są sterowane bezpośrednio z komputera przez oprogramowanie LabView. Program sterujący w trybie ciągłym monitoruje wszystkie parametry pracy silników, ponadto algorytm sterowania uwzględnia również zabezpieczenia silników przed przeciążeniami oraz przegrzaniem.

2.2. Komora badawcza

Konstrukcja komory badawczej ma za zadanie zapewnić odpowiednie warunki pracy badanych łożysk przy zadanych parametrach pracy łożyska, tj. prędkości obrotowej, wysokości szczeliny smarnej oraz zadanym obciążeniu wzdłużnym. Konstrukcja komory musi umożliwiać przeprowadzanie badań na różnych geometriach badanych łożysk przy odpowiednich warunkach oddziaływania pola magnetycznego o sterowanej wartości natężenia.

Schemat konstrukcji komory badawczej przedstawiono na rysunku 2a. Komora badawcza jest podzielona na dwie części, korpus dolny (poz. 10) oraz pokrywę (poz. 8). Konstrukcja pokrywki pozwala na łatwy dostęp do badanego łożyska.

Badane łożysko, składające się z płytki ruchomej (poz. 4) oraz płytki nieruchomej (oporowej, poz. 9), jest umieszczone bezpośrednio nad rdzeniem elektromagnesu (poz. 12). Ciecz magnetyczna (poz. 13) znajduje się między płytkami. Średnica badanego łożyska jest ograniczona wymiarami rdzenia elektromagnesu, którego średnica wynosi 60 mm. W praktyce na omawianym stanowisku wykonywane są badania przy średnicach płytek łożyska do około 45 mm. Na dolnej powierzchni nieruchomej płytki oporowej badanego łożyska jest wykonany rowek, w którym są osadzone czujniki temperatury oraz natężenia pola magnetycznego; dzięki temu uzyskano możliwość monitorowania wartości temperatury oraz rozkładu pola magnetycznego bezpośrednio w badanym łożysku.

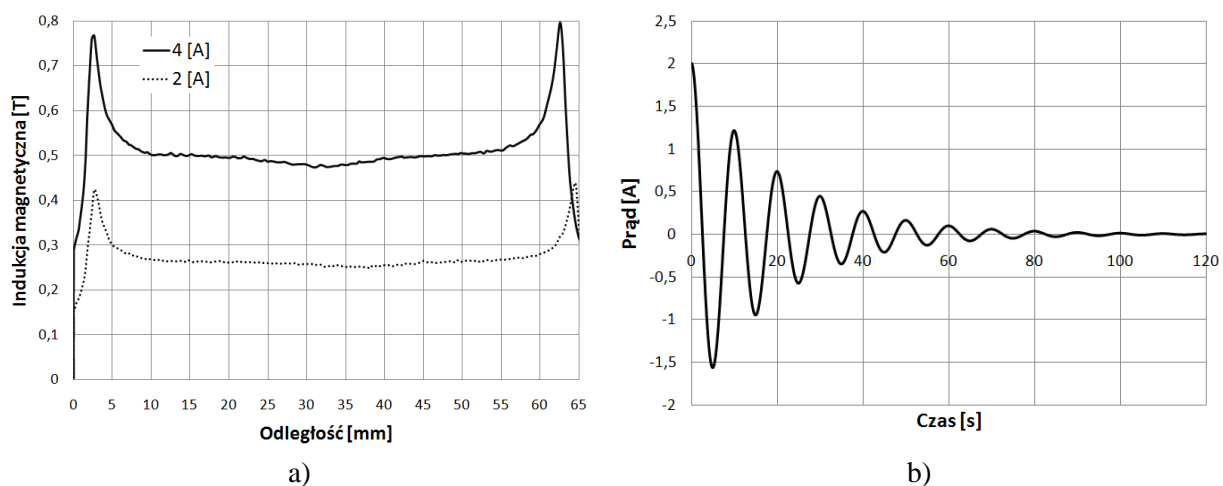


Rys. 2. a) Schemat konstrukcji komory badawczej, b) fotografia urządzenia
 Fig. 2. a) Schematic view of the test cell b) photography of device

Na rysunku 2b przedstawiono fotografię komory badawczej. Na fotografii jest widoczna otwarta pokrywa komory oraz między innymi płytka ruchoma badanego łożyska (u góry rysunku 2b) i płytka nieruchoma.

Źródłem pola magnetycznego w komorze badawczej jest elektromagnes (poz. 11) zasilany przez sterowany komputerowo zasilacz prądu stałego. Wartości napięcia i natężenia prądu w uzwojeniu elektromagnesu są rejestrowane w czasie rzeczywistym przez komputerowy system akwizycji danych. Zastosowany zasilacz pozwala na uzyskanie natężenia prądu w uzwojeniu elektromagnesu w zakresie $0 \div 7,5$ A, co przy aktualnie wykorzystywanym elektromagnesie pozwala na uzyskanie indukcji pola magnetycznego w zakresie $0 \div 1$ T. Maksymalna wartość indukcji pola magnetycznego jest uzależniona od wysokości szczeliny powietrznej pomiędzy rdzeniem elektromagnesu a pokrywą komory. Wysokość szczeliny powietrznej w omawianym stanowisku może być zmieniana przez zastosowanie odpowiednio skonstruowanych podkładek dystansowych. Przykładowe rozkłady wartości indukcji pola magnetycznego na średnicy rdzenia elektromagnesu przedstawiono na rysunku 3a.

Ponieważ elementy komory badawczej wykonano z materiałów o właściwościach ferromagnetycznych charakteryzujących się tym, że po wyłączeniu źródła pola magnetycznego utrzymywana jest pewna szcążkowa wartość magnetyzacji, konieczne było opracowanie metody rozmagnesowywania komory. Demagnetyzacja jest realizowana przez podanie na zaciski elektromagnesu okresowo zmiennego, zanikającego przebiegu prądu (rys. 3b). Zastosowana metoda umożliwi usunięcie resztkowego pola magnetycznego z elementów komory badawczej. Zabieg ten jest niezbędny do zapewnienia powtarzalności warunków, w jakich przeprowadzane są badania.

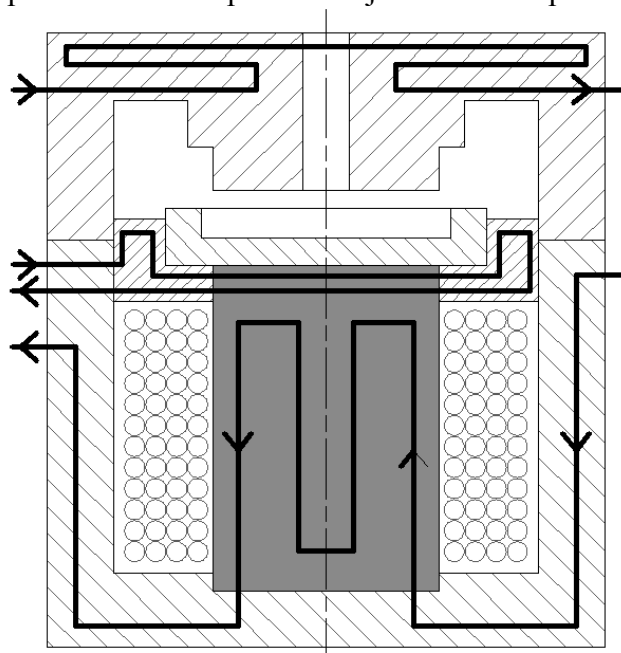


Rys. 3. Wyniki badań: a) rozkłady indukcji pola magnetycznego w komorze badawczej, b) krzywa demagnetyzacji

Fig. 3. Results of research: a) magnetic induction field distribution in the test cell, b) demagnetization curve

Ze względu na przepływ prądu w uzwojeniu elektromagnesu, istnieje konieczność stabilizacji termicznej komory badawczej. W tym celu w komorze wykonano kanały, którymi przepływa czynnik chłodzący. Obieg czynnika chłodzącego (rys. 4) przebiega przez obudowę, podstawę, rdzeń elektromagnesu oraz pokrywę komory. Należy zaznaczyć, że kanały w rdzeniu elektromagnesu zostały tak wykonane, aby nie miały wpływu na jednorodność rozkładu pola magnetycznego w badanym łożysku. Ponadto utworzono kanały dla czynnika chłodzącego w uchwycie badanego łożyska; miało to na celu umożliwienie zwiększenia precyzji stabilizacji termicznej w bezpośrednim sąsiedztwie badanego układu.

Metoda stabilizacji termicznej układu polega na wymuszonym obiegu cieczy o danej temperaturze. Temperatura czynnika chłodzącego jest ustalana przez łaźnię wodną. Zastosowany układ obiegu cieczy oprócz stabilizacji temperaturowej może służyć także do ustalania temperatury, w jakiej ma być przeprowadzony pomiar. Zastosowana aparatura umożliwia przeprowadzenie eksperymentów na badanych łożyskach przy temperaturach w zakresie od około -30°C do 150°C . Wartość temperatury w rdzeniu elektromagnesu jest w sposób ciągły monitorowana przez komputerowy system akwizycji danych. W układzie sterowania przewidziano zabezpieczenie polegające na możliwości samoczynnego wyłączenia się układu w przypadku przekroczenia dopuszczalnej wartości temperatury.



Rys. 4. Schemat obiegu czynnika chłodzącego w komorze badawczej
Fig. 4. Schematic view of cooling circuit in the test cell

3. PODSUMOWANIE

Przedstawione stanowisko powstało w ramach prowadzonych prac badawczych dotyczących teoretycznej i eksperymentalnej analizy pracy wzdłużnych łożysk ślizgowych smarowanych cieczą magnetyczną w warunkach oddziaływania pola magnetycznego. Prowadzone badania eksperymentalne obejmują pomiar nośności łożysk oraz określenie granicznych warunków pracy zespołu łożyskowego. Badania są prowadzone zarówno w warunkach obciążenia statycznego, jak i dynamicznego. Celem projektu jest również opracowanie zaleceń konstrukcyjnych i eksploatacyjnych pomocnych przy projektowaniu i eksploatacji tego typu łożysk.

Istotą problemu jest: opracowanie nowych geometrii współpracujących powierzchni łożyska, dobór cieczy magnetycznej o odpowiedniej charakterystyce reologicznej i optymalnych właściwościach magnetycznych oraz opracowanie optymalnego rozkładu pola magnetycznego w łożysku, zapewniającego prawidłową pracę układu.

Praca finansowana przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach projektu 1185/B/T02/2011/40

Bibliografia

1. Odenbach S., Ferrofluids-magnetically controlled suspensions, *Colloids and Surface*, 2003, 217.
2. Vekas L., Ferrofluids and Magnetorheological Fluids, *Advances in Science and Technology*, Vol. 54 (2008), 127.
3. Raj K., Moskowitz., B., Casciari R, Advances in ferrofluid technology, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 1995, 149.
4. Olabi A.G., Grunwald S., Design and application of magnetorheological fluid, *Materials and Design*, 2007, 28.
5. Mischczak A., Analysis of hydrodynamic lubrication of journal bearings, *Foundation for the Development of the Gdynia Maritime University*, Gdynia 2006.
6. Kuzhir P., Free boundary of lubricant film in ferrofluid journal bearings, *Tribology International*, 4, 2008, 41.
7. Salwiński J., Horak W., Szczęch M., Applications of magnetic fluids in bearing engineering, *Vísnik Kiïvs'kogo Nacional'nogo Universitetu Tehnologij ta Dizajnu*, Ukrainian-Polish scientific and technical conference 3, Kijów 2012, p. 176-183.