

# Zastosowanie cieczy magnetoreologicznych w przemyśle motoryzacyjnym

## Magnetorheological liquids in automotive industry

TOMASZ BIK\*

DOI: 10.17814/mechanik.2016.7.222

Rozważono cieczy magnetoreologiczne (MR) i przykłady ich zastosowania w przemyśle motoryzacyjnym. Przedstawiono właściwości i typowe tryby pracy. Zwrócono uwagę na zdolność dostosowywania się cieczy MR do zmiennego charakteru obciążenia, jakie najczęściej występuje w warunkach rzeczywistych. Liczne powstające współcześnie konstrukcje wykorzystujące cieczy aktywowane polem magnetycznym świadczą o sporym zainteresowaniu inżynierii tymi substancjami.

**SŁOWA KLUCZOWE:** cieczy magnetoreologiczne (MR), cieczy aktywowane magnetycznie

*Consideration is given to magnetorheological fluids (MRF) with some practical examples of their applications in the automotive industry cited. Characteristics and typical work modes of the liquids are presented, as well as their adaptability to the load nature changes as most commonly met in actual work environment. Increasing multitude of currently emerging applications using magnetic field activated liquids confirm considerable interest of the industry in these substances.*

**KEYWORDS:** magnetorheological fluids (MRF), magnetically activated fluids

Branża motoryzacyjna, zwłaszcza w ciągu ostatnich kilkudziesięciu lat, przeżywa dynamiczny rozwój. Dowodem tego nowatorskie rozwiązania, materiały i systemy, w jakie wyposaża się samochody. Przykładem innowacyjnych materiałów, które coraz częściej znajdują zastosowanie w konstrukcji samochodów, są cieczy sterowalne (cieczy smart), zmieniające swoje właściwości na skutek oddziaływania zewnętrznego pola fizycznego.

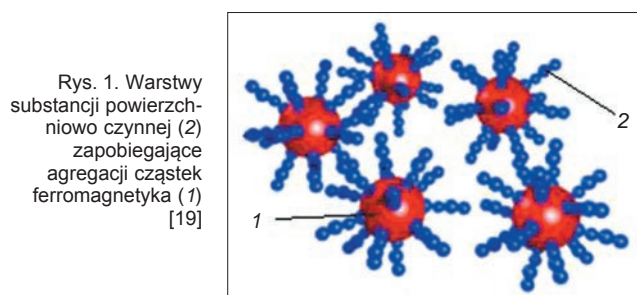
W zależności od przyjętego kryterium cieczy te można różnie sklasyfikować. Zazwyczaj dzieli się je ze względu na czynnik wywołujący zmianę stanu cieczy. Wyróżnia się cieczy elektromagnetyczne (ER), zmieniające właściwości mechaniczne (lepkość, granicę płynięcia) na skutek oddziaływania sił pola elektrostatycznego, oraz podgrupę cieczy magnetoreologicznych (MR), zmieniających swoje właściwości pod wpływem oddziaływania pola magnetycznego [2, 3, 14]. Co istotne, zmiany właściwości omawianych cieczy odbywają się w sposób kontrolowany i są w pełni odwracalne.

Analiza publikacji na temat cieczy MR potwierdza nie słabnące zainteresowanie nimi w skali międzynarodowej. Większość opracowań powstaje w języku angielskim [np. 1, 11, 12, 15, 18]. W branży motoryzacyjnej bardzo często dochodzi do praktycznej konfrontacji najnowszych osiągnięć techniki. Pozostaje kwestią czasu, kiedy do obecnie stosowanych rozwiązań opierających się na technologii cieczy sterowalnych dołączą kolejne.

### Cieczy magnetoreologiczne

Cieczy MR są to reostabilne płyny nienewtonowskie o postaci koloidalnej zawiesiny ferromagnetycznych cząsteczek rozproszonych w pewnej objętości dyspersyjnej cieczy nośnej. Cząsteczki ferromagnetyczne mają wielkość od kilku do kilkunastu mikrometrów i są magnetycznie spolaryzowane. Najczęściej otrzymuje się je na drodze mechanicznego rozdrabniania np. tlenków żelaza lub kobaltu [2, 5]. Z kolei dyspersyjna ciecz nośna nie wykazuje własności magnetycznych – dzięki magnetycznej obojętności umożliwia swobodny ruch względny cząsteczek ferromagnetyka.

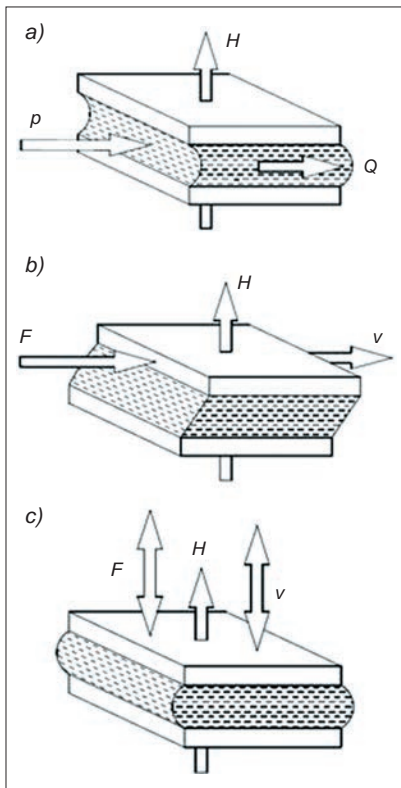
W stanie pracy ciecz nośna wspomaga odprowadzanie z układu ciepła, które powstaje m.in. na skutek tarcia pomiędzy przemieszczającymi się cząsteczkami ferromagnetyka. Tę rolę może przyjąć zasadniczo każda ciecz obojętna magnetycznie, która spełnia wymagania co do gęstości, lepkości i odparowalności [16]. Najczęstszym dodatkiem cieczy MR jest tzw. surfaktant – substancja powierzchniowo czynna (np. wyższe kwasy tłuszczowe), której zadaniem jest ograniczanie oddziaływania międzycząsteczkowych sił typu van der Waalsa i niedopuszczanie do grupowania się cząsteczek ferromagnetyka (rys. 1). Tworzące się kolonie cząsteczek stałych mają skłonność do grawitacyjnej sedymentacji, co znacznie obniża jakość i właściwości użytkowe cieczy MR [3].



Rozpatrując zastosowania cieczy sterowalnych [np. 6, 7, 9, 12], szczególnie istotne wydaje się zachowanie cieczy wobec linii oddziałującego pola magnetycznego, ze względu na kierunek przykładanego obciążenia. W obliczu tak definiowanych warunków można wyróżnić trzy tryby pracy cieczy MR w urządzeniach technicznych (rys. 2) [8]:

- tryb zaworowy – ciecz przepływa przez szczeliny pomiędzy równoległymi powierzchniami nieruchomymi. Wektor pola magnetycznego jest prostopadły do kierunku przepływu cieczy, linie pola dławią przepływ cieczy;
- tryb ścinania – ciecz wypełnia przestrzeń pomiędzy przemieszczającymi się względem siebie równoległymi ciałami. Wektor pola magnetycznego jest prostopadły do kierunku ruchu tych ciał, przez co ciecz może wpływać na parametry ich ruchu;

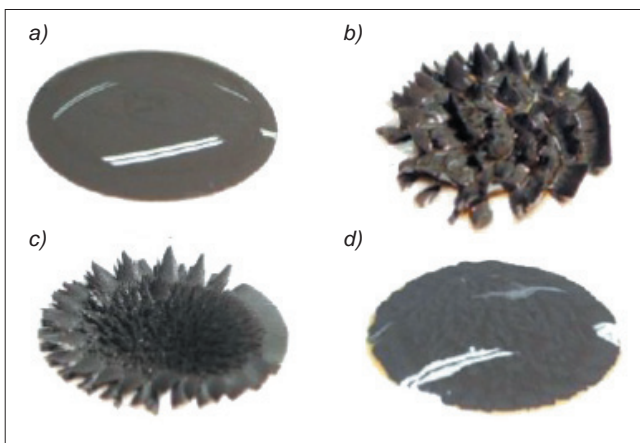
\* Mgr inż. Tomasz Bik (tomek.bik@gmail.com) – Katedra Konstrukcji Maszyn Politechniki Rzeszowskiej



Rys. 2. Podstawowe tryby pracy cieczy MR w aplikacjach technicznych [8]. Objaśnienia:  $H$  – wektor pola magnetycznego (prostopadły do kierunku przepływu cieczy),  $p$  – ciśnienie napierające na ciecz,  $Q$  – natężenie przepływu cieczy,  $F$  – obciążenie zewnętrzne,  $v$  – prędkość względnego ruchu rozważanych powierzchni

- tryb ściskania – ciecz wypełnia przestrzeń pomiędzy dwoma równoległymi powierzchniami, które na skutek obciążenia mogą się do siebie zbliżać i powodować wyciskanie cieczy. Wektor pola magnetycznego pokrywający się z kierunkiem ruchu względnego powierzchni przeciwdziała natomiast ich zbliżaniu się.

W urządzeniach technicznych często się zdarza, że wymienione tryby pracy cieczy występują równocześnie. Szczegółowe wymagania dotyczące cieczy MR są z kolei związane z rodzajem i konstrukcją urządzeń technicznych, w których zostały zastosowane.



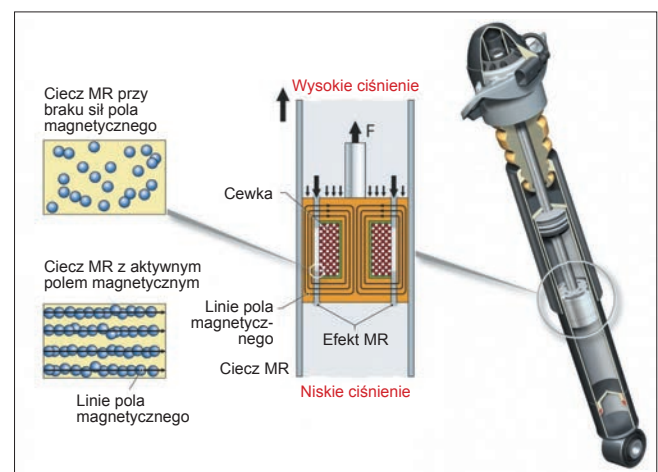
Rys. 3. Kropla cieczy magnetoreologicznej typu MRF-122EG: a) postać cieczy przy braku pola magnetycznego; b, c) ciecz pod wpływem działania pola magnetycznego (różne odległości); d) ciecz po odsunięciu pola magnetycznego [13]

### Praktyczne zastosowanie cieczy magnetoreologicznych

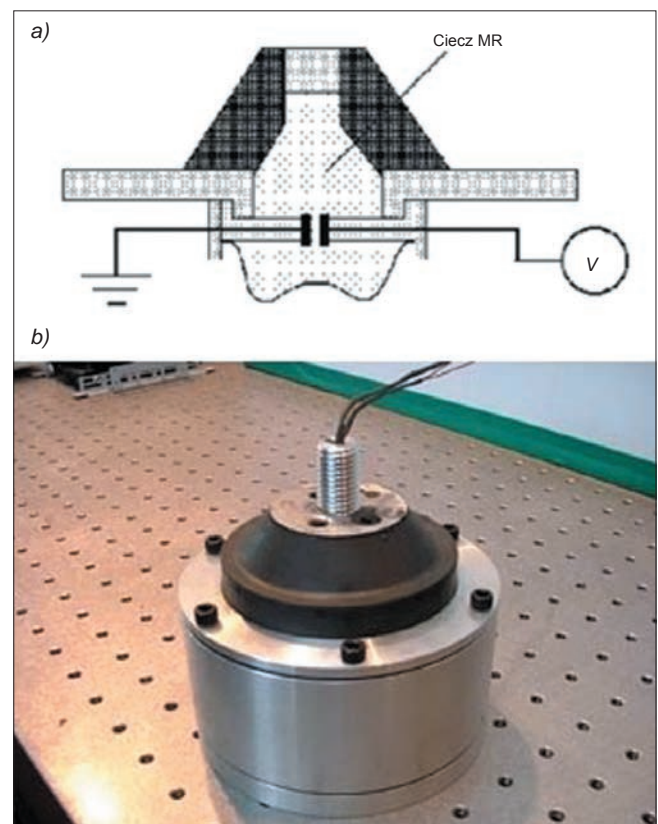
Do najbardziej rozpowszechnionych zastosowań cieczy MR należą absorbowanie i tłumienie drgań oraz wibracji, a w przypadku maszyn z obrotowym ruchem podzespołów – redukcja drgań skrętnych i niewyważenia wałów [4].

Drgania przyczyniają się do powstawania zmiennych naprężeń w elementach konstrukcyjnych maszyn, doprowadzają do niekorzystnych rozkładów obciążeń mogących wywołać uszkodzenie lub zmniejszenie ich trwałości. Bardzo często długotrwałe oddziaływanie drgań powoduje zniszczenie zmęczeniowe elementów maszyn.

Drgania pojazdów i maszyn roboczych mają także szkodliwy wpływ na organizm człowieka. Osoby narażone na długotrwałe oddziaływanie drgań mogą odczuwać dyskomfort, a nawet rozliczne dolegliwości zdrowotne. Półaktywne tłumiki drgań stosowane są więc do tłumienia drgań inercyjnych i zakłóceń przekazywanych od nierówności podłoża do elementów zawieszenia samochodowego (rys. 4). Dzięki nim możliwa jest bardziej skuteczna niż w rozwiązaniach tradycyjnych redukcja wibracji pojawiających się w pewnych zakresach obrotowych pracy silników (rys. 5).



Rys. 4. Amortyzator półaktywny z cieczą MR [4, 22]



Rys. 5. Tłumik z cieczą MR stabilizujący drgania silnika: a) przekrój, b) element rzeczywisty [21]

Typ tłumików z cieczą MR zainstalowanych w pojazdach, najczęściej w zderzakach, ma znaczący wpływ na poprawę bezpieczeństwa użytkowników tych pojazdów. Tłumiki połączone z rozmieszczonymi w kilku miejscach czujnikami oraz modulem analizującym charakter zderzenia tworzą kompletny system zdolny do pochłonięcia i rozproszenia znacznej części energii uderzenia w przypadku kolizji drogowej (rys. 6). Dzięki możliwościom sterowania własnościami cieczy MR siła uderzenia jest rozkładana pomiędzy zainstalowane absorbery w taki sposób, aby zapewnić jak największe bezpieczeństwo kierowcy i pasażerów.

Ciecze MR wykorzystywane są również jako eliminatory drgań w konstrukcji układów tłumienia i kontroli sztywności w siedzeniach samochodów ciężarowych, autobusów, traktorów rolniczych oraz maszyn roboczych (rys. 7).

Tłumiki z cieczą MR stanowią alternatywę wobec tłumików pasywnych, przeciwdziałających jedynie określonemu typowi drgań w ściśle zdefiniowanym paśmie częstotliwości. Są one także konkurencją dla tłumików aktywnych, które wymagają dostarczenia sporej ilości energii z zewnątrz. Warto jednak zwrócić uwagę na fakt, że prostota konstrukcyjna tego typu tłumików jest z reguły okupiona koniecznością stosowania zaawansowanych

technologii zarówno w konstrukcji elementów sterowania tłumika, jak i w trakcie komponowania wypełniających je cieczy.

Nieco odmiennym, ale równie intensywnie rozwijanym obszarem zastosowań cieczy sterowalnych w motoryzacji jest konstrukcja sprzęgieł i hamulców. Idea ta wykorzystuje przejawianą przez ciecz MR zdolność do zestalania się – bez pola magnetycznego jej charakter odpowiada modelowi cieczy newtonowskiej, natomiast na skutek obecności pola ciecz przybiera cechy właściwe modelowi cieczy Bingham'a [4].

Czynnikami wspomagającymi poprawne działanie sprzęgieł i hamulców są brak ograniczeń co do ilości powtórzeń zmian stanu cieczy oraz trwający krótko, bo zaledwie kilka milisekund, czas przejścia pomiędzy pasywnym i aktywnym stanem cieczy.

Modele sprzęgieł elektromagnetycznych różnią się szczegółami konstrukcyjnymi, mimo to w ich budowie można wyróżnić kilka zasadniczych elementów (rys. 8):

- wirnik wewnętrzny (koło zamachowe),
- zasilaną prądem i nawiniętą na wirnik wewnętrzny cewkę,
- wirnik zewnętrzny.

Wirnik zewnętrzny osadzany jest z reguły na wielowypuszcie wałka sprzęgłowego i pełni rolę tarczy sprzęgłowej. Oba wirniki są sprzęgane zestaloną pod wpływem działania pola magnetycznego stwardniałą pastą magnetyczną. Charakterystyczny dla cieczy MR parametr naprężenia progowego definiuje wartość ściśle określającą maksymalny moment obrotowy, jaki dane sprzęgło może przenieść. W przypadku hamulców elektromagnetycznych naprężenie progowe kształtuje z kolei wielkość możliwego do wytworzenia momentu hamowania. Co istotne, w tego typu hamulcach można płynnie sterować siłą hamowania zależną wprost od wartości prądu na cewce.

Największym problemem eksploatacyjnym jest wydzielające się podczas pracy hamulców ciepło, które powoduje utratę osobliwych własności cieczy i obniżenie sprawności działania opisywanych mechanizmów [10]. Kluczowym aspektem w konstrukcji hamulców magneto-reologicznych jest zatem zaprojektowanie systemu odprowadzania ciepła z układu.

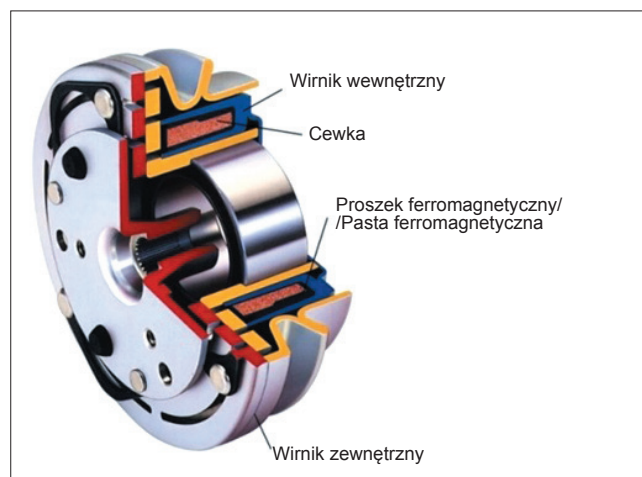
Jednym z głównych zastosowań cieczy MR – nie tylko w motoryzacji, ale w większości dyscyplin inżynierskich – jest uszczelnianie. Uporządkowane pod wpływem pola magnetycznego łańcuchy cząsteczek cieczy precyzyjnie spajają ze sobą elementy połączeń spoczynkowych,



Rys. 6. Element odpowiedzialny za rozpraszanie energii uderzenia w trakcie kolizji pojazdów [21]



Rys. 7. Fotel kierowcy z systemem tłumienia drgań wykorzystującym technologię cieczy MR [20]



Rys. 8. Sprzęgło elektromagnetyczne [23]

a także tych, które pozostają względem siebie w ruchu (np. uszczelnienie wału i podpory). Uszczelnienie tego rodzaju jest spójne i nie ulega destrukcji nawet przy ciągłym ścinaniu warstwy „ślizgającej się” po powierzchni poruszającego się elementu. Jest to możliwe dzięki oddziaływaniu pomiędzy cząsteczkami – pomimo stałego rozrywania wewnętrznych wiązań cząsteczki nieustannie dążą do odtworzenia struktury łańcuchowej wywołanej przez pole magnetyczne.

Uszczelnienia z cieczą MR tworzą klasę uszczelnień bezstykowych, charakteryzujących się doskonałą szczelnością w środowisku gazowym w zakresie od próżni do ciśnień rzędu 1 MPa. Istotną ich cechą jest możliwość uszczelnienia z jednoczesną eliminacją tarcia pomiędzy współpracującymi powierzchniami, które zamieniane jest na tarcie wewnętrzne w cieczy.

Uszczelnienie z cieczą magnetoreologiczną polega na utworzeniu płynnej bariery pomiędzy uszczelnianymi obszarami. Ciecz aplikowana jest do jednej lub kilku szczelin i zamyka obwód magnetyczny utworzony przez wał, magnesy trwałe (smarowo-kobaltowe lub neodymowe) oraz nabiegunniki. Siła pola magnetycznego utrzymuje ciecz w pierścieniowych szczelinach i skupia ją wokół występów, w rejonie koncentracji linii pola magnetycznego [13].

W praktyce uszczelnienia z cieczami magnetoreologicznymi stanowią doskonałą izolację węzłów maszynowych, łożysk i precyzyjnych mechanizmów mechatronicznych wymagających ochrony przed zanieczyszczeniami, wilgocią czy też agresywnym oddziaływaniem środowiska chemicznego. W niektórych sytuacjach cieczy MR pełnią dodatkowo funkcję smarującą [17]. Jest tak chociażby w łożyskach tocznych [11] i ślizgowych [12].

Jak dowodzą autorzy opracowania [12], przy poprawnie dobranych parametrach konstrukcyjno-geometrycznych łożysk ślizgowych i odpowiedniej wartości natężenia pola magnetycznego zastosowanie cieczy magnetoreologicz-

nych pozwala na zwiększenie obciążalności łożysk bez zmniejszenia ich żywotności. Taki sam wniosek wynika z opracowania [15], w którym autorzy wskazują na możliwość redukcji zjawiska tarcia w węźle z kontaktem punktowym, który jest smarowany ferrocieczą znajdującą się pod wpływem zmiennego pola magnetycznego.

Dobra przyczepność past ferromagnetycznych do powierzchni decyduje o ich przydatności do smarowania obszarów trudno dostępnych oraz stref kontaktu o niewielkich ruchach względnych. Jak wynika z opracowań i informacji udostępnianych przez producentów cieczy oraz past magnetoreologicznych, aby optymalnie zredukować tarcie, należy ustalić właściwe natężenie pola magnetycznego. Zbyt mała lub zbyt duża wartość natężenia pola magnetycznego negatywnie wpływa na sprawność współpracujących mechanizmów. Niedopasowanie natężenia wywołuje bowiem słabe smarowanie lub zbyt duże obciążenie, wzmagające zużycie na skutek intensywnego wzajemnego oddziaływania współpracujących elementów.

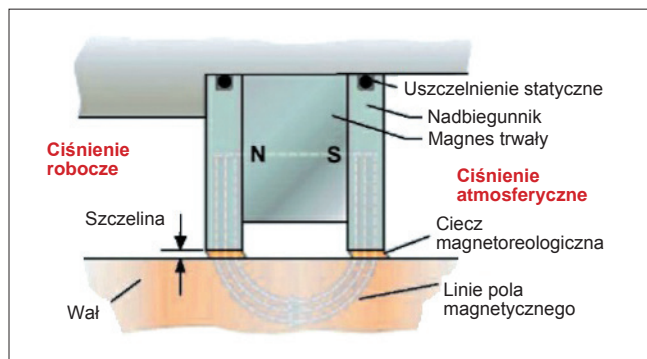
Patrząc przez pryzmat przemysłowego zastosowania cieczy magnetoreologicznych, najbardziej interesująca wydaje się ich zdolność do zmiany stanu, charakteru i własności na skutek oddziaływania pola magnetycznego. Wykorzystanie cieczy inteligentnych w urządzeniach technicznych wymaga określenia parametrów opisujących właściwości tych cieczy, które mogłyby być przydatne już w procesie projektowania. Do najważniejszych wymagań wobec cieczy magnetoreologicznych będących czynnikami roboczymi należą: mała lepkość dla stanu braku pola magnetycznego oraz wysokie naprężenia ścinające w warunkach aktywnego pola, możliwość pracy w szerokim zakresie temperatur oraz krótki czas reakcji. Istotna jest także odporność cieczy na zjawisko sedymentacji, a w przypadku jego wystąpienia – zdolność do szybkiego powrotu cieczy do stanu jednorodnego. Ciecze magnetoreologiczne powinny mieć długi okres eksploatacyjny oraz dobre własności smarne, zapobiegające zużyciu się współpracujących elementów.

## Podsumowanie

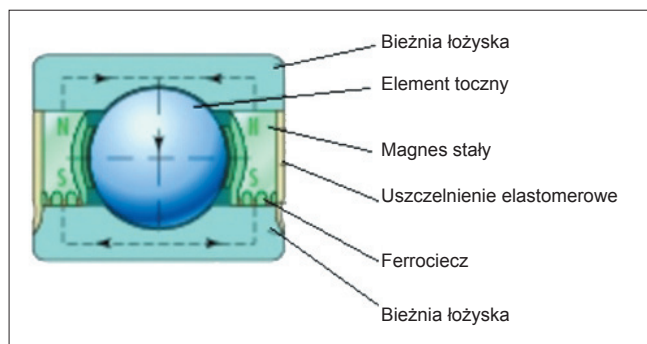
Problematyka cieczy sterowalnych stanowi tylko jeden spośród rozlicznych rozwijanych obecnie projektów w obszarze środków transportu. Ciecze magnetoreologiczne pozwalają w sposób wymierny zwiększać niezawodność pracy pojazdów i jednostek napędowych, a także pozytywnie wpływają na komfort ich użytkowników. Wdrażane kolejno rozwiązania świadczą, że ciecze te zajmują ważne miejsce w nowoczesnej inżynierii.

## LITERATURA

1. Ashjaee M., Goharkhah M., Azizi Khadem L., Ahmadi R. "Effect of magnetic field on the forced convection heat transfer and pressure drop of a magnetic nanofluid in a miniature heat sink". *Heat Mass Transfer*. Vol. 51 (2015): pp. 953÷964.
2. Bajkowski J. „Ciecze i twardki magnetoreologiczne. Właściwości, budowa, badania, modelowanie i zastosowanie”. Warszawa: Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 2012.
3. Bik T. „Ciecze sterowalne i ich aspekt nanotechnologiczny”. *Mechanik*. Nr 11 (2015): s. 845÷849.
4. Bik T. „Techniczne zastosowania cieczy ferromagnetycznych”. *Mechanik*. Nr 12 (2015): s. 905÷909.
5. Block H., Kelly J.P. "Electro-Rheology". *Journal of Physics. D: Applied Physics*. Vol. 21 (1988): pp. 1661÷1667.
6. Fujita T., Yoshimura K., Seki Y., Dodbiba G., Miyazaki T. "Characterization magnetorheological suspension of seal". *Journal of Intelligent Materials Systems and Structures*. Vol. 10 (1999): pp. 770÷774.



Rys. 9. Model uszczelnienia połączenia ruchowego z użyciem cieczy magnetoreologicznej [13]



Rys. 10. Przykład konstrukcji łożyska tocznego uszczelnionego cieczą magnetoreologiczną [11]

7. Homik W. „Zastosowanie cieczy reologicznych w technice, a w szczególności w tłumieniu drgań mechanicznych”. *Przegląd Mechaniczny*. Nr 10 (2006): s. 26÷31.
8. Lewandowski D. „Właściwości tłumiące kompozytów magnetoreologicznych. *Badania, modele, identyfikacja*”. Praca doktorska. Politechnika Wroclawska, Instytut Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej, Wrocław 2005.
9. Milecki A. „Ciecze elektro- i magnetoreologiczne oraz ich zastosowania w technice”. Poznań: Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2010.
10. Muc A., Barski M. „Ciecze magnetoreologiczne i ich zastosowania praktyczne”. *Czasopismo Techniczne. Mechanika*. R. 104, z. 1-M (2007): s. 31÷41.
11. Ochonski W. “Magnetic fluids tackle tough sealing jobs”. *Machine Design*. Feb. 17 (2005).
12. Osman T.A., Nada G.S., Safar Z.S. “Static and dynamic characteristics of magnetized journal bearings lubricated with ferrofluid”. *Tribology International*. Vol. 34, Iss. 6 (2001): pp.369÷380.
13. Potoczny M. „Ciśnienie krytyczne i opory ruchu w uszczelnieniach z cieczą magnetoreologiczną”. Praca doktorska. Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Kraków 2012.
14. Rabinow J. “The Magnetic Fluid Clutch”. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*. National Bureau of Standards. Washington. Vol. 67, Iss. 2 (1948): pp. 1308÷1315.
15. Shahrivar K., Vicente de J. „Ferrofluid Lubrication of Compliant Polymeric Contacts: Effect of Non-homogeneous Magnetic Fields”. *Tribology Letters*. Vol. 56, Iss. 2 (November 2014): pp. 281÷292.
16. Wiślicki B. „Ciecze magnetyczne – właściwości i zastosowania. Ciecze eksploatacyjne”. *Paliwa, Oleje i Smary w Eksploatacji*. R. 11, nr 93 (2002): s. 4÷13.
17. Wiślicki B., Lasota W., Holnicki-Szulc J. „Możliwości polepszenia węzłów łożyskowych za pomocą cieczy magnetoreologicznych”. *Tribologia*. Nr 5 (1999): s. 701÷709.
18. Yendeti B., Thirupathi G., Vudaygiri A., Singh R. “Field-dependent anisotropic microrheological and microstructural properties of dilute ferrofluids”. *The European Physical Journal*. E. 37:70 (August 2014).
19. [www.ferrolabs.com](http://www.ferrolabs.com).
20. [www.searsseating.com](http://www.searsseating.com).
21. [www.ssslabs.com](http://www.ssslabs.com).
22. [www.audi-technology-portal.de](http://www.audi-technology-portal.de).
23. [www.autokult.pl](http://www.autokult.pl). ■