

# Techniczne zastosowania ferrocieczy

## Application of ferrofluids

TOMASZ BIK\*

DOI: 10.17814/mechanik.2015.12.605

Analiza opracowań (w większości po angielsku, np. [1, 5, 10÷12, 14, 16, 18]) na temat ferrocieczy (FF) potwierdza zainteresowanie międzynarodowego środowiska naukowców tymi wyjątkowymi substancjami, zmieniającymi własności fizyczne na skutek oddziaływania zewnętrznego pola magnetycznego. W artykule przedstawiono typowe zastosowania cieczy ferromagnetycznych we współczesnej technice.

**SŁOWA KLUCZOWE:** ciecze ferromagnetyczne (FF), zastosowanie cieczy ferromagnetycznych

*A review of studies (most of them in English, e.g. [1, 5, 10 to 12, 14, 16, 18]) on the ferrofluids (FF) suggest close interest of the overseas scientists in these outstanding materials changing their physical properties when exposed to an external magnetic field. The article presents examples of use of the ferrofluids in modern technology.*

**KEYWORDS:** ferrofluids (FF), ferrofluids application

### Uszczelnianie

Docelowym, przewidzianym przez NASA zastosowaniem ferrocieczy (FF) miało być uszczelnianie przestrzeni pomiędzy ruchomymi elementami w konstrukcjach wysyłanych w przestrzeń kosmiczną. Funkcja uszczelniająca jest zresztą do dziś jednym z głównych technicznych zastosowań ferrocieczy. Znajdujące się pod wpływem pola magnetycznego, uporządkowane łańcuchy cząsteczek cieczy stanowią idealny sposób „spojenia” ze sobą części pozostających w spoczynku lub przemieszczających się względem siebie (np. uszczelnienia wału i podpory). Istotę działania tego typu uszczelnienia obrazuje rys. 1. Odpowiednia konstrukcja obudowy z magnesem stałym oraz przyległymi do niego biegunami zapewnia powstanie obwodu pola magnetycznego. Strumień pola przechodzi przez szczelinę wypełnioną ferrocieczą, która precyzyjnie łączy i jednocześnie uszczelnia współpracujące elementy.

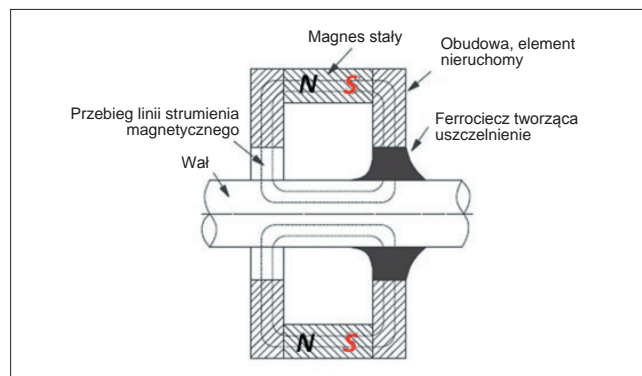
Uszczelnienie tego rodzaju jest spójne i nie ulega destrukcji mimo ciągłego ścinania warstwy „ślizgającej się” po powierzchni poruszającego się elementu. Jest to możliwe dzięki oddziaływaniu pomiędzy cząsteczkami – pomimo ciągłego rozrywania wewnętrznych wiązań cząsteczki nieustannie dążą do odtworzenia struktury łańcuchowej wywołanej przez pole magnetyczne. Poziom wykonania tego typu uszczelnień jest na tyle wysoki, że pozwala na budowę obrotowych przepustów na skalę przemysłową – także w urządzeniach z próżnią (rys. 2), np. przy produkcji mikroprocesorów.

Zakłada się, że uszczelnienia FF są zdolne przenosić ciśnienia do ok. 3,5 MPa, jednak to, jaki gradient ciśnienia wytrzymają, zależy od szerokości szczeliny, wartości pola magnetycznego i prędkości obrotowej wału. Jednostopniowe uszczelnienie może przenieść ciśnienie rzędu 10÷25 kPa, przy czym tę wartość można łatwo zwiększyć przez tworzenie kaskad pojedynczych stopni [11]. Rozmiar szczelin stosowanych w połączeniach uszczelnianych ferrocieczami waha się w przedziale 0,1÷0,5 mm i decyduje o wartości oraz rozkładzie natężenia pola magnetycznego. Ten rozmiar determinuje zaostrenie tolerancji wymiarowych wykonania wałów o większych średnicach nominalnych, co powoduje

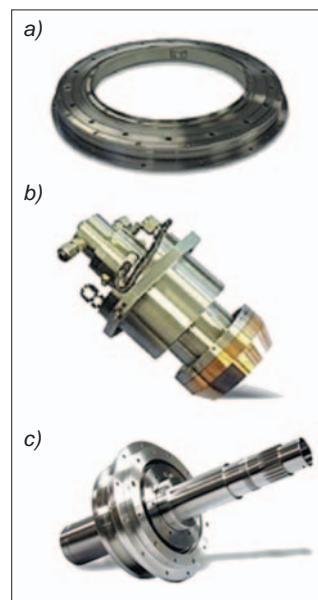
wzrost kosztów i nakładu pracy, ale zapobiega zatarciu lub zniszczeniu uszczelnienia.

Uszczelnienia FF są szczególnie przydatne do zapobiegania wyciekom gazów. Producenci urządzeń uszczelnianych w ten sposób zapewniają, że przeciek przez nie jest mniejszy niż  $10^{-12}$  m<sup>3</sup>Pa/s w całym zakresie temperatury pracy [3]. Tak wysokich i stabilnych parametrów szczelności nie gwarantują uszczelnienia mechaniczne. Przykładowo, w przypadku uszczelnienia dławikowego średnicy  $\varnothing 20$  mm przeciek jest rzędu  $10^{-8}$  m<sup>3</sup>Pa/s w temperaturze 20°C i wzrasta do  $5 \cdot 10^{-3}$  m<sup>3</sup>Pa/s w temperaturze 80°C [3].

W praktyce uszczelnienia FF sprawdzają się jako izolacje wszelkich węzłów maszynowych, łożysk i precyzyjnych mechanizmów mechatronicznych (stosowanych w budowie robotów, maszynach pomiarowych, precyzyjnych obrabiarzach, układach optycznych, lotniczych systemach sterowania i nawigacji, sprzęcie medycznym, napędach dysków komputerowych oraz urządzeniach o dużych prędkościach obrotowych – przekraczających 100 000 obr/min), które wymagają ochrony przed zanieczyszczeniami, wilgocią lub agresywnym działaniem środowiska chemicznego.



Rys. 1. Schemat magnetycznego uszczelnienia węża obrotowego z wykorzystaniem ferrocieczy [8]



Rys. 2. Przykłady uszczelnienia ferromagnetycznego: a) element systemu optyki do zastosowań lotniczych, b) obrotowa anoda rentgenowska, c) szczelne sprzężenie dwóch wałów do uniwersalnych zastosowań mechatronicznych [22]

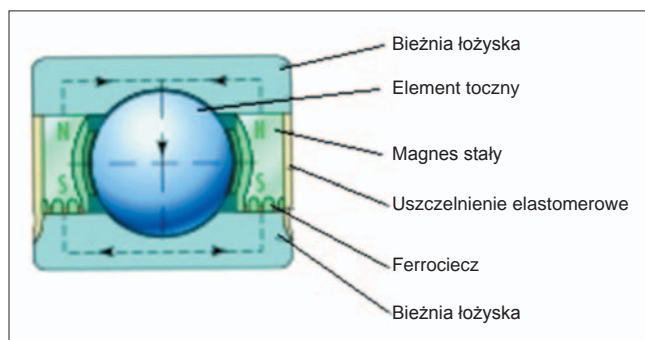
\* Mgr inż. Tomasz Bik (tomek.bik@gmail.com) – Katedra Konstrukcji Maszyn Politechniki Rzeszowskiej

Głównymi czynnikami wpływającymi na popularność uszczelnień półaktywnych i decydującymi o ich przewadze nad rozwiązaniami tradycyjnymi są:

- wysoka szczelność w warunkach statycznych oraz dynamicznych,
- długa żywotność – brak zużycia elementów i niewielkie tarcie (określane wzorem Pietrowa [13]), a przez to brak strat mocy, dzięki czemu istnieje możliwość aplikacji nawet w małych urządzeniach elektronicznych,
- brak zanieczyszczeń w postaci produktów tarcia współpracujących elementów,
- szeroki zakres temperaturowy pracy – od  $-100$  do  $200^{\circ}\text{C}$  [21] w zależności od rodzaju cieczy (znane są też konstrukcje z zaimplementowanym systemem wspomagającym chłodzenie, przeznaczone do pracy w wyższych temperaturach),
- niezawodność konstrukcji.

### Smarowanie

Nieco inne jest zastosowanie ferrocieczy w zespołach łożysk tocznych [11] i ślizgowych [14]. Oprócz funkcji uszczelniającej cieczy te spełniają funkcję smarującą – wspomagają pracę łożysk (rys. 3) [11, 19]. W pracy [14] dowiedziono, że przy poprawnie dobranych parametrach konstrukcyjno-geometrycznych łożysk ślizgowych i odpowiedniej wartości natężenia pola magnetycznego zastosowanie cieczy ferromagnetycznych może zwiększyć obciążalność łożysk bez zmniejszenia ich żywotności. Do podobnych wniosków doszli także autorzy opracowania [18] – wskazali na możliwość redukcji zjawiska tarcia w węźle z kontaktem punktowym, smarowanym ferrocieczą i poddanym działaniu zmiennego pola magnetycznego.

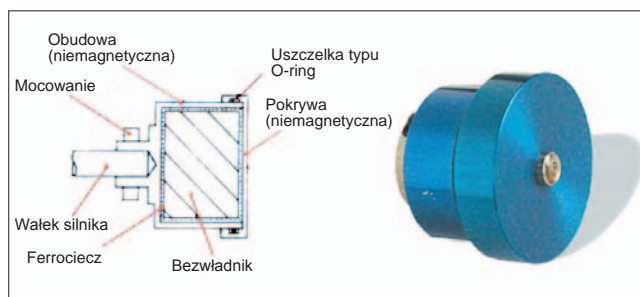


Rys. 3. Przykład konstrukcji łożyska tocznego uszczelnianego cieczą ferromagnetyczną [11]

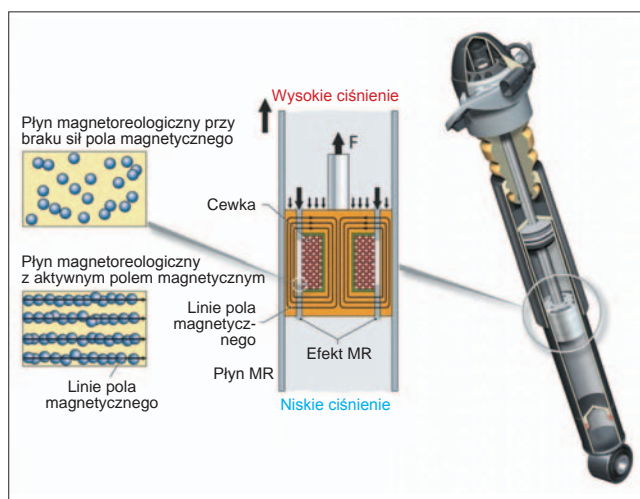
Pasty ferromagnetyczne wykazują dobrą przyczepność do powierzchni, dlatego znajdują zastosowanie w smarowaniu obszarów trudno dostępnych i stref kontaktu o niewielkich ruchach względnych. Przykładem mogą być szybkoobrotowe przekładnie walcowe. Jak dowodzą autorzy opracowania [6], w przypadku zastosowania tych substancji jako smarów kluczową kwestią jest dobór właściwego natężenia pola magnetycznego. Zbyt mała wartość pola nie wpływa korzystnie na sprawność przekładni, natomiast gdy pole jest zbyt duże, sprawność przekładni obniża się wskutek sporego obciążenia w postaci sił wzajemnego oddziaływania elementów współpracujących w zazębeniu.

### Absorbowanie i tłumienie drgań

Ferrociecze mogą być wykorzystywane jako absorbery i tłumiki drgań/wibracji, a w przypadku maszyn z obrotowym ruchem podzespołów – jako substancje redukujące drgania skrętne i niewyważenie wałów. Przykładem takiego zastosowania są systemy tłumienia wibracji w napędach CD-ROM i DVD-ROM (gdzie pierwotnie do tłumienia drgań używano silikonowych wkładek) oraz w małych silnikach krokowych (rys. 4).



Rys. 4. Ferromagnetyczny tłumik oscylacji i drgań inercyjnych stosowany w silnikach krokowych [22]



Rys. 5. Amortyzator półaktywny z cieczą magnetoreologiczną (MR) [26]

Ferrociecze, podobnie jak cieczy magnetoreologiczne, są używane w konstrukcji półaktywnych tłumików drgań, służących np. do tłumienia: drgań inercyjnych i aerodynamicznych w helikopterach, drgań skrętnych wałów, zakłóceń przekazywanych od nierówności podłoża do elementów zawieszonych na samochodowym (rys. 5). Tłumiki z ferrocieczą stanowią alternatywę dla tłumików pasywnych przeciwdziałających jedynie określonym typowi drgań w ściśle zdefiniowanym paśmie oraz dla tłumików aktywnych wymagających dostarczenia sporej ilości energii. W tym miejscu warto jednak zwrócić uwagę, że prostota konstrukcji tłumików bazujących na ferrocieczach z reguły jest okupiona koniecznością stosowania zaawansowanych technologii zarówno w odniesieniu do konstrukcji elementów sterowania tłumika, jak i kompozycji cieczy wypełniającej tłumik.

Efektownym zastosowaniem cieczy ferromagnetycznych jest tłumienie pogłosów w głośnikach audio. Już niewielka ilość cieczy, która jest trwale utrzymywana w szczelinie pomiędzy cewką a magnesem, znacząco poprawia robocze parametry głośnika. Zdaniem producentów sprzętu



Rys. 6. Porównanie głośników: tradycyjnego i z cieczą ferromagnetyczną [25]



audio, aby uzyskać optymalne parametry (namagnesowanie, lepkość, wydajność akustyczną) ferrocieczy, produkuje się ją na bazie dwóch typów substancji nośnej: syntetycznych węglowodorów i estrów.

Ferrociecz obecna w głośniku wspomaga tłumienie pogłosów (zapobiega interferencji fal głosowych odbijanych od tylnej ściany obudowy głośnikowej), ułatwia odprowadzanie ciepła z cewek (przez co pozwala na zwiększenie ich mocy), a ponadto pozytywnie wpływa na wydłużenie okresu bezawaryjnej pracy głośnika.

### Wspomaganie przewodnictwa i pracy urządzeń elektroenergetycznych

W porównaniu ze standardowymi płynami izolacyjnymi zastosowanie ferrocieczy w urządzeniach przemysłu elektroenergetycznego (np. transformatorach prądowych) zwiększa ich odporność na skoki napięciowe oraz szkodliwe działanie wilgoci. Wymuszenie przepływu ferrocieczy w uzwojeniach transformatorowych wspomaga dodatkowo ich chłodzenie. Dzięki zaletom FF możliwe jest produkowanie mniejszych i bardziej wydajnych urządzeń bądź zwiększenie czasu eksploatacji i obciążalności urządzeń istniejących [22]. Podobne efekty uzyskuje się w przypadku zastosowania ferrocieczy w poszczególnych rozwiązaniach mechatronicznych – wypełnienie ferrocieczą elektromagnesów, włączników, przełączników itp. poprawia ich czułość i niezawodność oraz zmniejsza poziom generowanego przez nie hałasu (eliminuje potrzebę stosowania wyluszeń), co jest istotne zwłaszcza w urządzeniach do zastosowań domowych.

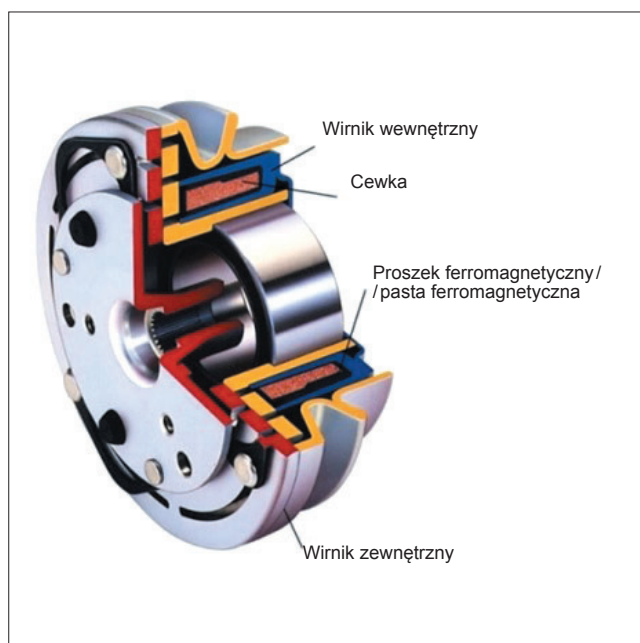
### Sprzęgła i hamulce elektromagnetyczne

W ostatnich latach intensywnie rozwijanym obszarem zastosowań ferrocieczy w motoryzacji jest konstrukcja sprzęgieł i hamulców elektromagnetycznych. Rozwiązania te wykorzystują zdolność zestalania się ferrocieczy (ferrociecze bez pola magnetycznego zachowują się jak ciecz newtonowska, a pod wpływem jego oddziaływania nabierają cech właściwych modelowi cieczy Bingham), brak ograniczeń co do ilości powtórzeń zmian ich stanu oraz trwający krótko – bo zaledwie kilka milisekund – czas przejścia z jednego stanu do drugiego.

**Ciecz newtonowska** – ciecz doskonale lepka, wykazująca liniową zależność naprężenia ścinającego od prędkości ścinania. Dla płynów newtonowskich lepkość nie zależy od prędkości ścinania, natomiast zależy od własności substancji tworzącej płyn i jego parametrów termodynamicznych (temperatury, ciśnienia).

**Ciecz Bingham** – gęsta ciecz o liniowej zależności pomiędzy naprężeniem a odkształceniem, charakteryzująca się występowaniem naprężenia progowego, tj. naprężenia o takiej wartości, po której przekroczeniu ciecz zaczyna się odkształcać.

W konstrukcji sprzęgła elektromagnetycznego (rys. 7) można wyróżnić kilka zasadniczych elementów: wirnik wewnętrzny (koło zamachowe), zasilaną prądem i nawiniętą na wirnik wewnętrzny cewkę, wirnik zewnętrzny. Z reguły wirnik zewnętrzny jest osadzany na wielowypuszcie wałka sprzęgłowego i pełni rolę tarczy sprzęgłowej. Oba wirniki są sprzęgane stwardniałą pastą ferromagnetyczną, której zestalenie następuje pod wpływem działania pola magnetycznego. Charakterystyczny dla ferrocieczy parametr naprężenia progowego definiuje zależność ściśle określającą maksymalną wartość momentu, jaki dane sprzęgło może przemieścić. W przypadku hamulców elektromagnetycznych naprężenie progowe decyduje natomiast o wielkości możliwego do



Rys. 7. Sprzęgło elektromagnetyczne [24]

wytworzenia momentu hamowania. Co ważne, tego typu hamulce umożliwiają płynne sterowanie siłą hamowania, która zależy wprost od wartości prądu na cewce. Największym problemem okazuje się z kolei ciepło wydzielające się podczas pracy, ponieważ powoduje utratę osobliwych własności ferrocieczy i tym samym obniża sprawność omawianych mechanizmów [9].

### Badania i diagnostyka

Pod wpływem pola magnetycznego ciecz ferromagnetyczna może przybierać skomplikowane, przestrzenne kształty, które dla artystów i grafików stały się inspiracją do tworzenia rozmaitych wizualizacji. Zdolność przestrzennej adaptacji ferrocieczy wykorzystuje się jednak głównie w diagnostyce, jako metodę określania struktury domen magnetycznych. Takie badania są realizowane przez nałożenie cienkiej warstwy ferrocieczy na powierzchnię analizowanego elementu – cząstki ferromagnetyka są przyciągane do miejsc o dużej wartości gradientu pola magnetycznego. Odparowana frakcja nośna pozostawia na badanej powierzchni możliwe do zaobserwowania pod mikroskopem ferrocząsteczki, które układają się precyzyjnie na granicach domen.

Komersyjne zastosowania tej metody obejmują głównie kontrolę jakości nośników magnetycznych (taśm magnetofonowych, dysków komputerowych) oraz identyfikację mikrodefektów stali, stopów krystalicznych, a także skał [9, 22].

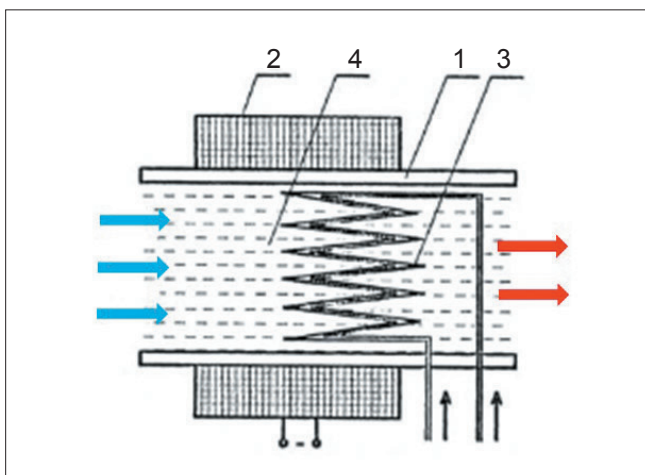
Z literatury [4] znane są przykłady wykorzystania cieczy ferromagnetycznych w układach ciągłego pomiaru grubości produkowanego materiału. W takich zastosowaniach ferrociecz stanowi element obwodu magnetycznego, którego długość zmienia się wraz ze zmierzoną grubością materiału. Zmiana długości wywołuje zmianę przekroju obwodu, a w konsekwencji – zmianę oporności i natężenia prądu płynącego przez cewkę, co bezpośrednio przekłada się na wartość mierzonych grubości materiału.

### Konwersja energii cieplnej na mechaniczną

Jak wiadomo, wraz ze wzrostem temperatury ferrocieczy maleje jej przenikalność magnetyczna. Krytycznym stanem całego procesu jest osiągnięcie tzw. temperatury Curie ( $T_c$ ) materiału cząsteczek ferromagnetyka – po jej przekroczeniu zarówno cząsteczki, jak i cała ciecz przestają oddziaływać z polem magnetycznym.

**Temperatura Curie** – temperatura powyżej której ferromagnetyk gwałtownie traci swoje właściwości magnetyczne i staje się paramagnetykiem, co wynika ze zmiany fazy ciała stałego. Poniżej temperatury Curie dipole magnetyczne atomów lub cząsteczek ustawiane są przez wiązania chemiczne w jednym kierunku, tworząc domeny ferromagnetyczne. Powyżej temperatury Curie drgania cieplne sieci krystalicznej niszczą ustawienia dipoli magnetycznych, a dipole wykonują drgania.

Na tej właściwości bazuje koncepcja konwersji energii cieplnej na mechaniczną (rys. 8) [4]. Ferrociecz znajdująca się w polu magnetycznym jest ogrzewana (z wymiennika ciepła) do temperatury powyżej  $T_c$ . Po przekroczeniu wartości  $T_c$  ferrociecz traci swoje własności i nie jest wrażliwa na oddziaływanie pola magnetycznego. Dzięki temu możliwe jest jej przemieszczenie, natomiast powstała w ten sposób wolna przestrzeń wypełnia nowa, chłodniejsza ferrociecz. Tak wywołany ruch cieczy jest procesem prostym i niezawodnym, dlatego może zostać wykorzystany do napędu dowolnego rodzaju zespołów mechanicznych. Kwestią problematyczną pozostaje sprawność opisanej przemiany.



Rys. 8. Schemat układu do przemiany energii cieplnej w mechaniczną z użyciem cieczy ferromagnetycznej (1 – nieferromagnetyczna rura, 2 – uzwojenie zasilane prądem stałym, 3 – wężywnica wymiennika ciepła, 4 – ciecz ferromagnetyczna wciągana w obszar uzwojenia i po ogrzaniu wpływająca z prawej strony rury) [4]

### Inne zastosowania techniczne

Jak podają autorzy opracowania [9], ciecze ferromagnetyczne stosuje się w technice druku – miesza się je z tuszem, ponieważ obecność nawet niewielkiej ilości cząstek ferromagnetycznych w tuszu ułatwia odczytanie nadruków i tekstu (nawet gdy mają one niewielkie rozmiary) przez czytniki magnetyczne.

Przeprowadza się również próby oczyszczania – z wykorzystaniem ferrocieczy – zbiorników wodnych (dzięki związaniu ferrocząstek z substancjami chemicznymi, które mogą się z kolei łączyć z zanieczyszczeniami lub cząsteczkami dryfujących przy powierzchni wody płam ropy naftowej – na skutek oddziaływania silnego pola magnetycznego powstała zawieszona gromadzi się następnie w jednym miejscu, aby ułatwić jej zebranie i dalszą utylizację).

### Podsumowanie

Obszar zastosowania ferrocieczy sukcesywnie się rozszerza, co wynika z ich szczególnych właściwości, takich jak zdolność do szybkiej zmiany pozornej lepkości czy łatwy sposób sterowania oparty na dynamicznie rozwijającej się elektronice. Analiza literatury dotyczącej wykorzystania

ferrocieczy wskazuje na liczne problemy natury badań podstawowych i technologicznych, które wciąż nie zostały rozwiązane i mogą stanowić przedmiot dalszych prac [1, 14, 17, 20]. Z kolei interesującymi zagadnieniami do rozwijania w najbliższym czasie są: kompozycja cieczy ferromagnetycznych, modelowanie i opis matematyczny zjawisk związanych z obecnością ferrocieczy, sterowanie ich zachowaniem i kolejne zastosowania FF w urządzeniach technicznych.

### 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*. No. 51 (2015): pp. 953-964.
2. Bajkowski J. „Ciecze i tłumiki magnetoreologiczne. Właściwości, budowa, badania, modelowanie i zastosowanie”. Warszawa: Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 2012.
3. Bajkowski J. „Stanowisko badawczo-dydaktyczne do wyznaczania parametrów przekładni ze sprzęgłem i hamulcem magnetoreologicznym”. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Transport*. Z. 82. Gliwice, 2014.
4. Bednarek S. „Ciecze ferromagnetyczne – materiały o niezwykłych właściwościach i ich zastosowania”. *Foton 104*. Wiosna 2009.
5. Egorov I.N., Egorova S.I. "Effect of Electromagnetic Action on Dispersed Composition on Milling Ferromagnetic Materials in Hammer Mill". *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. Vol. 55, No. 4 (2014): pp. 371-374.
6. Gavin H.P., Hanson R.D., Filiski F.E. "Electrorheological dampers. Part I: Analysis and design". *Journal of Applied Mechanics*. 69 (9) (1996).
7. Homik W. „Zastosowanie cieczy reologicznych w technice, a w szczególności w tłumieniu drgań mechanicznych”. *Przegląd Mechaniczny*. Nr 10 (2006): s. 29-31.
8. Lewandowski D. „Właściwości tłumiące kompozytów magnetoreologicznych. Badania, modele, identyfikacja”. Praca doktorska. Wrocław: Politechnika Wroclawska, Instytut Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej, 2005.
9. Muc A., Barski M. „Ciecze magnetoreologiczne i ich zastosowania praktyczne”. *Czasopismo Techniczne. Mechanika*. R. 104, z. 1-M (2007): s. 31-41.
10. Nethe A., Scholz T., Stahlmann H.-D. "Improving the Efficiency of Electric Motors Using Ferrofluids". *Magnetohydrodynamics*. 37(3) (2001): pp. 312-317.
11. Ochonski W. "Magnetic fluids tackle tough sealing jobs". *Machine Design*. Feb 17, 2005.
12. Oezbey A., Karimzadehkhoei M., Yalcin S.E., Gozuacik D., Kosar A. "Modeling of ferrofluid magnetic actuation with dynamic magnetic fields in small channels". *Microfluidics and Nanofluidics*. 18 (2015): pp. 447-460.
13. Orłow D., Podgorkowa W. "Magnetic fluids". *Maszynostrojenie*. (1993).
14. Osman T.A., Nada G.S., Safar Z.S. "Static and dynamic characteristics of magnetized journal bearings lubricated with ferrofluid". *Tribology International*. 34 (2001).
15. Rabinow J. "Magnetic Fluid Clutch". *National Bureau of Standards Technical News Bulletin*. Vol. 32, No. 4 (1948).
16. Scherer C., Figueiredo Neto A.M. "Ferrofluids: Properties and Applications". *Brazilian Journal of Physics*. Vol. 35, No. 3A (2005).
17. Shahmohammadi A., Jafari A. "Application of different CFD multi-phase models to investigate effects of baffles and nanoparticles on heat transfer enhancement". *Frontiers of Chemical Science and Engineering*. Vol. 8, Iss. 3 (2014): pp. 320-329.
18. Shahrivar K., de Vicente J. "Ferrofluid Lubrication of Compliant Polymeric Contacts: Effect of Non-homogeneous Magnetic Fields". *Tribology Letters*. Vol. 56, Iss. 2 (2014): pp. 281-292.
19. Wiślicki B., Lassota W., Holnicki-Szulc J. „Możliwości polepszania żywotności węzłów łożyskowych za pomocą cieczy magnetoreologicznych”. *Tribologia*. 5 (1999): pp. 701-709.
20. 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 (2014).
21. Strona internetowa: [www.ferrolabs.com](http://www.ferrolabs.com).
22. Strona internetowa: [www.ferrotec.com](http://www.ferrotec.com).
23. Strona internetowa: [www.kkd.ukw.edu.pl](http://www.kkd.ukw.edu.pl).
24. Strona internetowa: [www.autokult.pl](http://www.autokult.pl).
25. Strona internetowa: [www.radiantworld007.blogspot.com](http://www.radiantworld007.blogspot.com).
26. Strona internetowa: [www.audi-technology-portal.de](http://www.audi-technology-portal.de).