



Ciecze ferromagnetyczne – materiały o niezwykłych właściwościach i ich zastosowania

Stanisław Bednarek

Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Łódzkiego

Wprowadzenie

Ciecze ferromagnetyczne stanowią wytworzoną przez człowieka grupę materiałów o niespotykanych dotychczas w przyrodzie właściwościach. Dzięki połączeniu w jednym materiale właściwości ciekłych i ferromagnetycznych znajdują wiele różnorodnych zastosowań – od prostych uszczelek, poprzez układy do bezpośredniego przetwarzania energii cieplnej na energię mechaniczną, mogące pracować w elektrowniach termojądrowych, aż po nowe sposoby aplikowania niektórych lekarstw. Dlatego warto poznać metody otrzymywania stabilnych cieczy ferromagnetycznych i wybrane zastosowania tych niezwykłych materiałów.

Wszystkie znane dotychczas substancje ferromagnetyczne to ciała stałe. Za występowanie ich właściwości ferromagnetycznych „odpowiedzialna” jest szczególna struktura, polegająca na uporządkowaniu momentów magnetycznych atomów lub cząsteczek w mikroobszarach zwanych **domenami**. Po ogrzaniu powyżej pewnej temperatury, zwanej **temperaturą Curie**, substancje te tracą swoje właściwości ferromagnetyczne, ponieważ energia chaotycznych ruchów cieplnych jest na tyle duża, że niszczy strukturę domenową. Dla wszystkich ferromagnetyków temperatura Curie jest znacznie niższa od temperatury topnienia, np. dla żelaza temperatura Curie wynosi 767°C , a temperatura topnienia 1535°C . Nie można więc wytworzyć cieczy ferromagnetycznej przez stopienie ferromagnetyka, występującego początkowo w postaci ciała stałego.

Sposoby otrzymywania cieczy ferromagnetycznych

W celu wytworzenia cieczy ferromagnetycznej trzeba było wybrać inną metodę. Substancję ferromagnetyczną rozdrabnia się na bardzo małe cząstki o rozmiarach 10^{-7} – 10^{-9} m w wyniku trwającego kilka tygodni mielenia w specjalnych młynkach. Otrzymane cząstki miesza się następnie z cieczą, np. olejem lub naftą. Ciecz, z którą mieszane są cząstki nazywana jest **cieczą dyspersyjną**. Ponieważ, w cząstkach substancji ferromagnetycznej zachowana jest struktura domenowa, to otrzymana mieszanina w postaci ciekłej zawiesiny ma również właściwości ferromagnetyczne. Inną metodą otrzymywania cząstek o bardzo

małych rozmiarach jest, tzw. **polikondensacja chemiczna**¹. Ta druga metoda jest znacznie szybsza i tańsza, dlatego też pokażemy poniżej jak przy jej użyciu można wytworzyć ciecz ferromagnetyczną.

Gęstość cząstek substancji ferromagnetycznej jest kilka razy większa od gęstości cieczy dyspersyjnej i w zasadzie cząstki powinny opaść na dno naczynia, czyli ulec sedymentacji. Jednak przy dostatecznie małych rozmiarach cząstek (10^{-7} m i mniejszych) ich średnia energia kinetyczna nieuporządkowanych ruchów cieplnych jest porównywalna z ich energią potencjalną ciężkości. Dzięki temu, te małe cząstki wykonują na tyle intensywne ruchy Browna, że przeciwdziałają one sedymentacji. Pozwala to wytworzyć w cieczy dyspersyjnej zawiesinę cząstek ferromagnetycznych stabilną przez wiele miesięcy. Z przedstawionych faktów wynika, że ciecze ferromagnetyczne są quasi-jednorodnymi zawiesinami bardzo małych cząstek w cieczach, czyli koloidami o właściwościach ferromagnetycznych. Określenie ciecz ma tutaj w pewnym sensie charakter umowny.

Aglomeracja i sedymentacja cząstek ferromagnetycznych

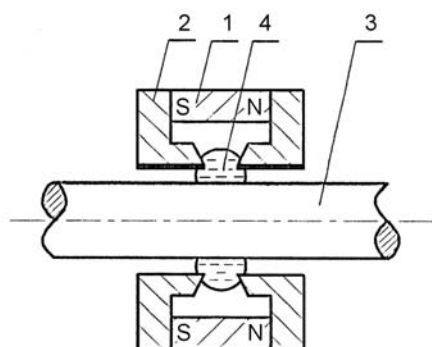
Bardzo małe cząstki substancji ferromagnetycznych przy dostatecznym zbliżeniu, np. w wyniku przyciągania magnetycznego, mają tendencję do łączenia się pod wpływem sił międzycząsteczkowych w większe kompleksy, czyli do **aglomeracji**. Kompleksy takie szybciej ulegają sedymentacji, ponieważ średnia energia kinetyczna ich nieuporządkowanych ruchów cieplnych pozostaje w danej temperaturze stała, a średnia energia potencjalna wzrasta wprost proporcjonalnie do masy cząstek, czyli w przybliżeniu do trzeciej potęgi ich rozmiarów. Średnia prędkość ruchów Browna takich kompleksów jest zbyt mała, żeby ruchy te mogły skutecznie przeciwdziałać sedymentacji.

W celu zapobieżenia aglomeracji stosuje się specjalne **substancje powierzchniowo czynne**, np. wyższe kwasy tłuszczowe, które tworzą bardzo cienkie jedno- lub dwucząsteczkowe warstewki ochronne wokół cząstek substancji ferromagnetycznej. Warstewki te nie dopuszczają do nadmiernego zbliżenia się cząstek i ich aglomeracji. Substancje powierzchniowo czynne, zapobiegające aglomeracji, nazywa się stabilizatorami właściwości cieczy ferromagnetycznych. Dzięki nim ciecze ferromagnetyczne zachowują swoje właściwości przez wiele lat i nadają się do zastosowań w technice. W połowie lat sześćdziesiątych XX wieku po raz pierwszy udało się wytworzyć stabilne ciecze ferromagnetyczne wykorzystując stabilizatory.

¹ Polikondensacja chemiczna jest to metoda otrzymywania zawiesiny drobnych cząstek substancji z mieszaniny dwóch roztworów o różnych wartościowościach w wyniku reakcji chemicznej zachodzącej po zalkalizowaniu tej mieszaniny.

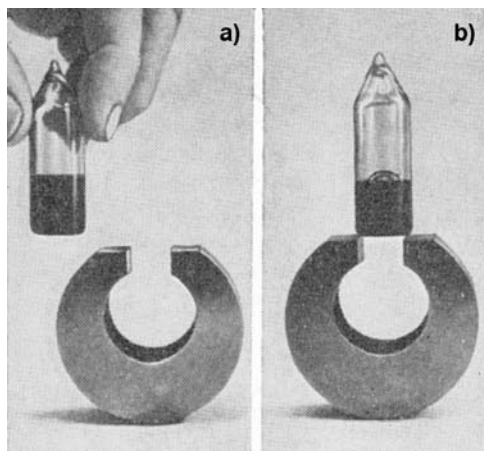
Właściwości i zastosowania cieczy ferromagnetycznych

Ciecze ferromagnetyczne wykazują szereg bardzo interesujących właściwości, z których najbardziej charakterystyczną i dającą się najłatwiej zaobserwować jest oddziaływanie z polem magnetycznym. Umieszczona w niejednorodnym² polu ciecz ferromagnetyczna jest wciągana do obszaru najsilniejszego pola. Właściwość ta umożliwia zastosowanie cieczy ferromagnetycznych do budowy uszczelki i łożysk (rys. 1). Jedną z ich zalet jest to, że nie ulegają one zużyciu.



Rys. 1. Budowa uszczelki z cieczy ferromagnetycznej; 1 – magnes pierścieniowy, 2 – nabiegownik, 3 – uszczelniany element, 4 – ciecz ferromagnetyczna wciągana w pole magnetyczne między nabiegownikami a uszczelnianym elementem

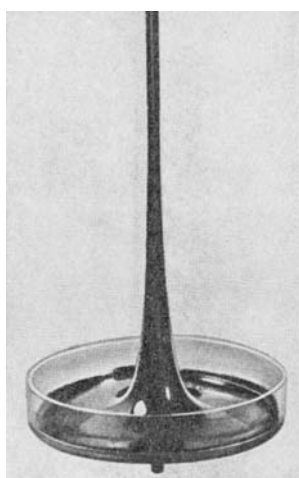
Gdy do naczynia z cieczą ferromagnetyczną wrzucimy kulkę wykonaną ze szkła lub nieferromagnetycznego metalu, np. miedzi lub mosiądzu, to kulka zatonie, ponieważ jej gęstość jest większa od gęstości cieczy, fot. 1a. Jeżeli teraz umieścimy to naczynie w niejednorodnym polu magnetycznym, to kulka wypłynie, gdyż na ciecz zadziała dodatkowa siła w kierunku dna naczynia, a kulka praktycznie nie oddziałuje z polem, fot. 1b. W konsekwencji tego ciecz działa na kulkę większą siłą wyporu, powodującą wypychanie kulki ku górze.



Fot. 1. Wypieranie szklanej kulki z cieczy ferromagnetycznej; a) przed umieszczeniem w polu magnetycznym kula tonie i jest niewidoczna, b) po umieszczeniu w niejednorodnym polu magnetycznym, wytwarzanym przez magnes w kształcie litery C kulka wynurza się z cieczy

² Przypomnij sobie oddziaływanie dipola z polem. W jednorodnym polu dipole orientują się w kierunku linii pola, zaś w niejednorodnym są wciągane w obszar pola o większym natężeniu.

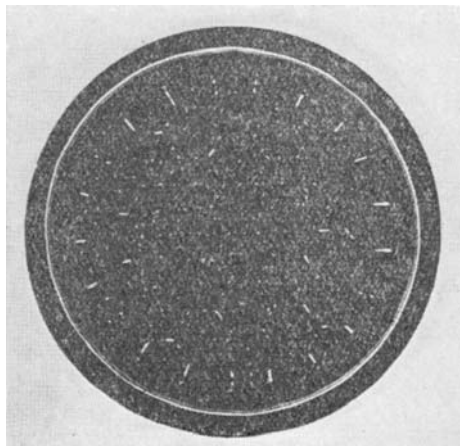
Wciąganie cieczy ferromagnetycznej w obszar najsilniejszego pola magnetycznego można wykazać również w innym doświadczeniu. Gdy w szerokim naczyniu z cieczą ferromagnetyczną umieszczony jest prostoliniowy przewodnik (przez który przepływa prąd), tak żeby przechodził prostopadle do powierzchni swobodnej cieczy, to po przepuszczeniu przez niego prądu elektrycznego ciecz ferromagnetyczna wzniesie się wokół przewodnika tworząc efektowną kolumnę o powierzchni hiperboloidy, fot. 2. Wzniesienie cieczy spowodowane jest jej wciąganiem w obszar najsilniejszego pola, w pobliżu przewodnika.



Fot. 2. Ciecz ferromagnetyczna, umieszczona w naczyniu, przez które przechodzi przewodnik z prądem, wznosi się wokół przewodnika efektowną kolumnę w kształcie hiperboloidy obrotowej

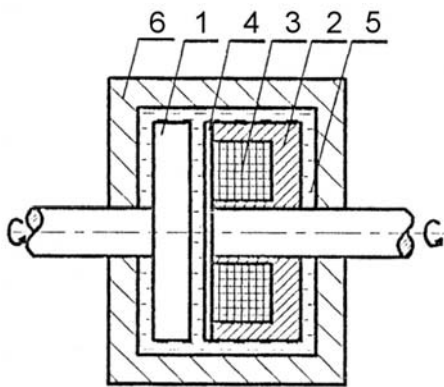
Niejednorodne pole magnetyczne oddziałujące na zawieszony w cieczy cząstki ferromagnetyczne powoduje ich ruch. Poruszające się cząstki, dzięki siłom lepkości, wprawiają w ruch cząsteczki cieczy dyspersyjnej, co w końcowym efekcie powoduje ruch cieczy ferromagnetycznej jako całości. Jeżeli pole magnetyczne będzie zmieniało się w czasie z niezbyt dużą częstotliwością, to również ciecz ferromagnetyczna będzie poruszała się z tą samą częstotliwością. Właściwość ta znalazła zastosowanie w budowie przetworników elektroakustycznych i elektromechanicznych z cieczą ferromagnetyczną.

W silnych polach magnetycznych obserwuje się efekt nazywany zestaleniem cieczy ferromagnetycznej. Polega on na tym, że rozproszone cząstki ferromagnetyczne ulegają namagnesowaniu i przyciągają się wzajemnie. Rezultatem tego jest tworzenie się skupisk cząstek najpierw w postaci igieł a następnie włókien i kolumn złożonych z tych włókien. Skupiska te, widoczne są również na powierzchni cieczy, fot. 3. Cząstki zostają jakby uwięzione wzdłuż linii pola, a wraz z nimi, dzięki siłom lepkości, utrzymywana jest również ciecz dyspersyjna. Powoduje to znaczny wzrost lepkości cieczy ferromagnetycznej, która zachowuje się jak ciało stałe o niezerowym module sztywności.



Fot. 3. Powierzchnia swobodna zestalonej cieczy ferromagnetycznej, umieszczonej w silnym, jednorodnym polu magnetycznym, skierowanym prostopadle do płaszczyzny fotografii. Na powierzchni widoczne są wierzchołki wzniesień (jaśniejsze obszary), tworzące regularną, promieniowo-rozmieszczoną strukturę skupisk cząstek ferromagnetycznych

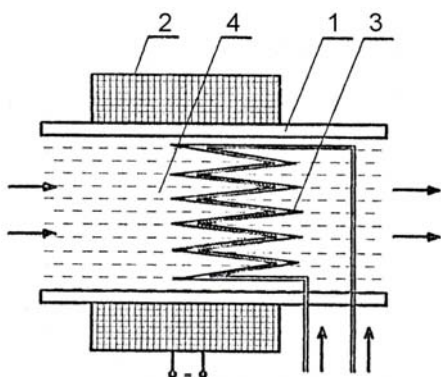
Typowy czas zestalenia cieczy ferromagnetycznej trwa tysięczne części sekundy. W stabilnych cieczach ferromagnetycznych efekt ten jest odwracalny. Po wyłączeniu pola magnetycznego, w czasie również kilku tysięcznych części sekundy, zestalenie znika i ciecz ferromagnetyczna odzyskuje swoje początkowe właściwości. Zestalenie cieczy ferromagnetycznej znalazło zastosowanie w budowie niezuzywających się sprzęgła elektromagnetycznych, rys. 2.



Rys. 2. Zasada działania sprzęgła elektromagnetycznego, w którym wykorzystano ciecz ferromagnetyczną; 1 – tarcza napędzająca, 2 – tarcza napędzana, 3 – uzwojenie, 4 – osłona, 5 – ciecz ferromagnetyczna zestalająca się pod wpływem pola magnetycznego, 6 – obudowa

Przenikalności magnetyczne względne cieczy ferromagnetycznych, charakteryzujące siłę ich oddziaływania z polem magnetycznym, mają wartości pośrednie między wartościami przenikalności stałych ferromagnetyków i paramagnetyków. Ciecze ferromagnetyczne osiągają zwykle początkowe wartości przenikalności od kilkudziesięciu do 100. Dla technicznie czystego żelaza wartość ta wynosi 250, a dla najsilniejszych paramagnetyków – chlorków żelaza lub kobaltu 1,01.

Ze wzrostem temperatury cieczy ferromagnetycznej wartość jej przenikalności magnetycznej maleje, podobnie jak dla stałych ferromagnetyków. Po przekroczeniu temperatury Curie materiału cząstek, ciecz ferromagnetyczna staje się paramagnetykiem i praktycznie przestaje oddziaływać z polem magnetycznym. Właściwość ta została wykorzystana w układach do bezpośredniej przemiany energii cieplnej na energię mechaniczną, rys. 3. Ciecz ferromagnetyczna, utrzymywana początkowo w polu magnetycznym, zostaje ogrzana powyżej temperatury Curie za pomocą wymiennika ciepła. W wyniku tego, staje się ona paramagnetykiem i przestaje być utrzymywana w obszarze pola magnetycznego a na jej miejsce napływa chłodniejsza ciecz wciągana przez to pole. Powoduje to ruch cieczy ferromagnetycznej, która może, np. napędzać turbinę. Przewiduje się, że takie układy mogą mieć zastosowanie w elektrowniach termojądrowych. Ich zaletą jest niezawodność i prostota konstrukcji, natomiast wadę stanowi niska sprawność.



Rys. 3. Zasada działania układu do bezpośredniej przemiany energii cieplnej na energię mechaniczną z obiegiem cieczy ferromagnetycznej; 1 – nieferromagnetyczna rura, 2 – uzwojenie zasilane prądem stałym, 3 – wężownica wymiennika ciepła, 4 – ciecz ferromagnetyczna początkowo wciągana w obszar uzwojenia po ogrzaniu powyżej temperatury Curie traci swoje właściwości magnetyczne i wypływa z prawej strony rury

Indukcja magnetyczna, powodująca namagnesowanie do stanu nasycenia typowych cieczy ferromagnetycznych wynosi 0,03–0,1 T (tesli). Dla porównania, indukcja potrzebna do namagnesowania do stanu nasycenia czystego żelaza lub stali krzemowej, używanej do budowy rdzeni w transformatorach i maszynach elektrycznych – silnikach i prądnicach, wynosi ok. 2 T. Ciecze ferromagnetyczne zawierające bardzo małe, jednodomenowe cząstki, nie wykazują histerezy magnetycznej. W cieczach o cząstkach wielodomenowych pojawia się natomiast histereza. Ważną zaletą cieczy ferromagnetycznych jest to, że jej właściwości można łatwo zmieniać w pewnych granicach przez zmianę zawartości cząstek.

Dzięki swoim niezwykłym właściwościom ciecze ferromagnetyczne znalazły zastosowanie w różnych dziedzinach techniki. Można ich używać w układach do ciągłego pomiaru grubości produkowanego materiału. W takim układzie ciecz ferromagnetyczna stanowi element obwodu magnetycznego o długości zmieniającej się wraz z mierzoną grubością. Powoduje to zmianę oporności i natężenia

prądu płynącego przez cewkę. Z pozytywnym skutkiem zostały również przeprowadzone próby zastosowania cieczy ferromagnetycznych do wypełniania szczelin w obwodach magnetycznych maszyn elektrycznych. Uzyskano w ten sposób większą moc i lepsze chłodzenie tych urządzeń.

Interesującymi przykładami zastosowań cieczy ferromagnetycznych są próby zbierania za ich pomocą zanieczyszczeń z powierzchni zbiorników wodnych – szczególnie plam ropy naftowej z powierzchni morza oraz kontrola dawkowania pewnych leków o silnym działaniu ubocznym, stosowanych w leczeniu nowotworów. W obu przypadkach ciecz ferromagnetyczną miesza się z usuwanymi zanieczyszczeniami lub dawkowanym lekiem. Po przyłożeniu pola magnetycznego mieszanina cieczy i zanieczyszczeń wciągana jest w obszar najsilniejszego pola i może być zebrana z powierzchni wody. W przypadku leków, pole magnetyczne przyciąga się do obszaru zaatakowanego przez nowotwór, w którym należy utrzymać wysoką koncentrację leku. Dzięki temu, zmniejsza się potrzebna dawka leku i jego toksyczne działanie na cały organizm.

Wytwarzamy ciecz ferromagnetyczną

Wytworzenie stabilnej cieczy ferromagnetycznej metodą polikondensacji chemicznej nie jest specjalnie trudne i może być przeprowadzone w szkolnej pracowni chemicznej lub w domowym laboratorium. W tym celu, należy przygotować roztwór 11,2 g siarczanu żelazawego ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) w 300 ml wody destylowanej oraz roztwór 22,2 g chlorku żelazowego ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) również w 300 ml wody destylowanej. Temperatura roztworów powinna wynosić ok. 20°C.

Oba roztwory zlewa się do szklanego naczynia i mieszając bagietką szybko dodaje 60 ml stężonego roztworu wodorotlenku amonu (NH_4OH). Mieszaninę należy pozostawić w spokoju na okres 2 godzin w celu ustania się. W wyniku tego, w górnej części naczynia zbierze się prawie przezroczysty roztwór, który trzeba ostrożnie usunąć przy pomocy lewara wodnego lub pipety. Pozostała mętna zawiesina powinna mieć objętość ok. 160 ml. Zawiera ona wytrącone cząstki magnetytu i będzie wykorzystana do dalszej obróbki.

Do zawiesiny, przy ciągłym mieszaniu, dodaje się 6 g kwasu oleinowego ($\text{C}_{18}\text{H}_{37}\text{COOH}$) i 90 ml dowolnego oleju roślinnego. Naczynie z tą mieszaniną wstawia się do większego naczynia z wrzącą wodą i na otrzymanej w ten sposób łaźni wodnej ogrzewa przez 30 min. Z mieszaniny wydziela się ciecz ferromagnetyczna w postaci warstwy, którą zlewa się lub zbiera pipetą. Otrzymana ciecz ferromagnetyczna stanowi zawiesinę cząstek magnetytu w oleju roślinnym, otoczonych stabilizującą warstewką cząsteczek kwasu oleinowego.

Składniki potrzebne do wytworzenia opisanej cieczy ferromagnetycznej bez większego problemu można znaleźć w szkolnej pracowni chemicznej. W przypadku trudności ze zdobyciem kwasu oleinowego można zastąpić go innym wyższym kwasem tłuszczowym, np. palmitynowym lub stearynowym albo

3 razy większą masą szamponu do włosów lub płynu do mycia naczyń. Warto więc spróbować wytworzyć ciecz ferromagnetyczną według podanego przepisu.

Podsumowanie

Przedstawione w niniejszym artykule sposoby otrzymywania, właściwości i zastosowania cieczy ferromagnetycznych stanowią jedynie niewielki fragment obszernej problematyki, dotyczącej tych materiałów. Na temat cieczy ferromagnetycznych odbywają się międzynarodowe konferencje i istnieją obszerne monografie, jak dotychczas tylko w języku angielskim. Tym, którzy chcieliby dowiedzieć się więcej na ten temat, a nie mają dostępu do zagranicznej literatury, można polecić dwa artykuły przeglądowe w języku polskim [1, 2]. Zostały też opracowane i zastrzeżone licznymi patentami różne modyfikacje sposobów wytwarzania cieczy ferromagnetycznych, poprawiające ich trwałość i właściwości. Ciecze ferromagnetyczne zaczynają powoli znajdować zastosowanie w urządzeniach powszechnego użytku, np. do twardych dysków i głośników, gdzie wypełniają szczelinę powietrzną, umożliwiając jej zmniejszenie i poprawę parametrów tych urządzeń. Miłośników motoryzacji zainteresuje pewnie fakt, że w niektórych typach samochodów stosuje się sprzęgła zawierające ciecze ferromagnetyczne.

Literatura

- [1] S. Bednarek, *Ferrofluidy – ciekłe materiały magnetyczne*, „Przegląd Elektrotechniczny”, Roczn. LXXI, Nr 1, 1995, s. 1.
- [2] S. Bednarek, *Dyspersyjne materiały ferromagnetyczne*, „Postępy Fizyki”, T. 46, Z. 2, 1995, s. 103.

Temperatura Curie, punkt Curie – temperatura przemiany fazowej (II rodzaju) ferro- i antyferromagnetyków w paramagnetyki.

W temperaturach poniżej punktu Curie ferromagnetyki wykazują spontaniczne namagnesowanie, spowodowane lokalnym uporządkowaniem momentów magnetycznych tworząc domeny ferromagnetyczne. Powyżej punktu Curie ferromagnetyk gwałtownie traci swoje właściwości magnetyczne i staje się paramagnetykiem. Drgania cieplne sieci krystalicznej niszczą ustawienia dipoli magnetycznych.

Nazwa pochodzi od nazwiska francuskiego fizyka **Piotra Curie**, męża Marii Skłodowskiej-Curie.

