

Jarosław PSZCZOŁA¹
Tomasz CETNAR²

POMIARY OGROMNEJ MAGNETOSTRYKCJI ZWIĄZKÓW MIĘDZYMETALICZNYCH CIĘŻKA ZIEMIA RZADKA – ŻELAZO

Opisano metodę pomiaru ogromnej magnetostrykcji związków międzymetalicznych typu ciężka ziemia rzadka – żelazo przy użyciu tensometrów jako mierników odkształcenia. Przedstawiono układ pomiarowy oraz przebieg pomiaru. Podano wyniki pomiarów ogromnej magnetostrykcji otrzymane dla związków typu ciężka ziemia rzadka – żelazo posiadających strukturę krystaliczną typu MgCu₂.

Słowa kluczowe: odkształcenie, ogromna magnetostrykcja, układ pomiarowy, ciężka ziemia rzadka, żelazo, związki międzymetaliczne

1. WSTĘP

Magnetostrykcja odkryta przez J. Joule w niklu w 1842 roku polega na zmianie wymiarów i kształtu materiału pod wpływem pola magnetycznego [1]. Liniowa magnetostrykcja traktowana jako odpowiednik liniowego odkształcenia, jest zdefiniowana jako $\Delta l/l = \lambda$, gdzie Δl jest zmianą długości l wywołaną przez przyłożone zewnętrzne pole magnetyczne o natężeniu H [2-4]. Teoria zjawiska magnetostrykcji jest opisana w literaturze, jak na przykład w [4-6]. Wewnętrzne siły, które wywołują magnetostrykcję, posiadają kwantowo-mechaniczny charakter.

Iloraz $\Delta l/l$ oznaczony jako $\lambda(H)$ zmienia się, gdy natężenie H pola rośnie. Dla dużych wartości H osiąga wartość nasycenia λ_s . Zmiana odkształcenia związana jest z rotacją domen towarzyszącą rosnącemu H . Parametr λ_s wynosi -7×10^{-6} (-7 ppm) dla żelaza, -60 ppm dla kobaltu i -35 ppm dla niklu [7]. Wielkości magnetostrykcji obserwowane dla metali przejściowych 3d (Fe, Co, Ni) są zbyt małe do zastosowań.

Istnieją jednakże materiały międzymetaliczne z wielką, czy nawet ogromną magnetostrykcją, które znajdują różne zastosowania, przykładowo jako czujniki

¹ Wydział Matematyki i Fizyki Stosowanej, Politechnika Rzeszowska, Al. Powstańców Warszawy 6, 35-959 Rzeszów, e-mail: j.pszczola@prz.edu.pl (J. Pszczoła)

² AGH, Kraków, Polska

czy też wzbudniki [6,8]. Pod tym względem, związki typu ciężka ziemia rzadka – żelazo (RFe₂) posiadają znaczenie dominujące.

Materiały te posiadają liczne zalety, mianowicie: krótki czas reakcji, niskie zużycie energii, możliwość pracy w trudnych warunkach, wytrzymywanie dużych obciążeń – jak również podlegają względnie łatwej syntezie, co opisano w literaturze [9].

Występują zarówno naukowe, jak i praktyczne powody dla różnych badań tych materiałów. Istotne znaczenie posiadają badania magnetostrykcji tych materiałów. Różne metody eksperymentalne mogą być użyte do pomiaru magnetostrykcji liniowej, jak na przykład: technika dylatometryczna, pomiary interferometryczne, metoda pojemnościowa, badania za pomocą promieniowania X oraz metoda tensometryczna. Metoda tensometryczna jest prostym i tanim sposobem pomiaru odkształceń materiałów wynikłych z przyłożenia natężenia zewnętrznego pola magnetycznego.

Celem pracy jest opis podstawowej aparatury tensometrycznej do pomiaru odkształceń, opis procedury pomiarowej, jak również opis przykładowych wyników pomiaru dla materiałów z ogromną magnetostrycją.

2. TENSOMETRIA NAPRĘŻEŃ

Naprężenie i odkształcenie

Naprężenie σ jest ilorazem przyłożonej siły F do powierzchni S na którą działa [10]. Stosownie do Rys.1 można to zapisać jako

$$\sigma = F/S = F/(x-\Delta x)(y-\Delta y) \quad (1)$$

Działająca siła F wymusza wzdłużne odkształcenie ε definiowane przez iloraz

$$\varepsilon = \Delta z / z \quad (2)$$

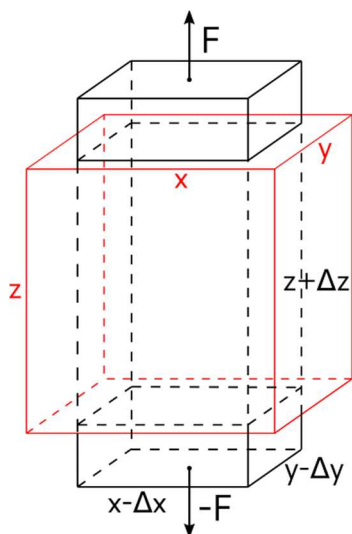
Naprężenie σ i odkształcenie ε wiąże prawo Hooke'a, mianowicie

$$\varepsilon = \sigma/E \quad (3)$$

gdzie E jest modułem Younga.

Podłużnemu odkształceniu ε towarzyszy poprzeczne kurczenie się η zdefiniowane przez stosunek (rys. 1)

$$\eta = \Delta x/x \quad (4)$$



Rys. 1. Napężenie i odkształcenie prostopadłościennej próbki jako wynik działającej siły F ; czerwony kontur – przed zadziałaniem siły F , czarny kontur – wynik działającej siły F

Opór elektryczny i odkształcenie

Opór elektryczny R drutu jest opisany przez prosty wzór [10]

$$R = \rho l / A \quad (5)$$

gdzie ρ jest opornością właściwą materiału drutu, l jest jego długością, a A jest jego przekrojem poprzecznym.

Po przyłożeniu napężenia do drutu, jego długość wzrasta o Δl , jego przekrój A maleje i w następstwie opór drutu wzrasta o ΔR .

Zatem dla drutu można zdefiniować czułość κ za pomocą wyrażenia [10]

$$\kappa = (\Delta R / R) / (\Delta l / l) = (\Delta R / R) / \varepsilon \quad (6)$$

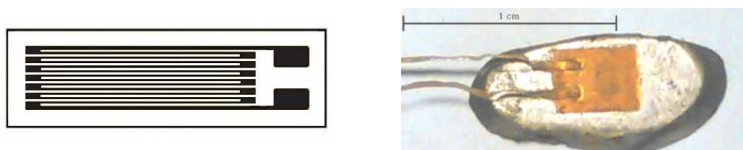
Przyjmując stałość parametru κ z ostatniego wzoru wynika, że elektryczny opór ΔR zmienia się proporcjonalnie do odkształcenia ε .

Ostatni wzór stanowi podstawę pomiaru metodą tensometryczną [10].

Tensometr – miernik odkształcenia

Jak wspomniano powyżej, użycie tensometrów jest powszechną i prostą metodą do wyznaczania odkształceń. W celu zredukowania rozmiarów tensometru oraz zwiększenia jego sprawności, główny składnik tensometru, czyli cienki drut oporowy jest ułożony w postaci siatki (Rys. 2, lewa część). Zwykle są

używane cienkie druty stopu miedź-nikiel (konstantan) lub stopu nikiel-chrom. Siatka drutu jest umieszczona na cienkim nośniku oraz przymocowana doń przez równie cieką powłokę. Siatka jest zakończona końcówkami lutowniczymi umożliwiającymi połączenie z mostkiem Wheatstone'a. Aktywny tensometr jest ściśle przyklejony do badanej próbki za pomocą cienkiej warstwy kleju cyjanoakrylowego (Rys. 2, prawa część) [11,12]. Tensometr jest charakteryzowany przez parametry κ i R (wzór 6).



Rys. 2. Wzdłużny tensometr: siatka drutu oporowego (na lewo), próbka z przyklejonym tensometrem (na prawo)

Gdy próbka (Rys. 1) jest odkształcana wzdłuż osi Z, odkształcenie to jest przekazywane poprzez warstwę kleju do siatki z drutu zmieniając jej opór elektryczny R . Wzmacniacz tensometryczny wzbudza elektrycznie mostek Wheatstone'a (Rys. 3) dostarczając napięcie wejściowe U_{in} [11]. Zmiany oporu elektrycznego siatki przyklejonego aktywnego tensometru zmieniają napięcie wyjściowe U_{out} . Układ wzmacniacza rejestruje również to napięcie i mikroprocesor wylicza wielkość ΔR i w następstwie odkształcenie ε (wzór 6). W przypadku gdy tensometr jest przyklejony wzdłuż osi X, układ wzmacniacza rejestruje poprzeczne naprężenie η .

Mostek Wheatstone'a

Rysunek 3. przedstawia schemat i fotografię mostka Wheatstone'a. Próbka z przyklejonym tensometrem i trzy towarzyszące tensometry są zamontowane na cienkiej płytce z laminatu.

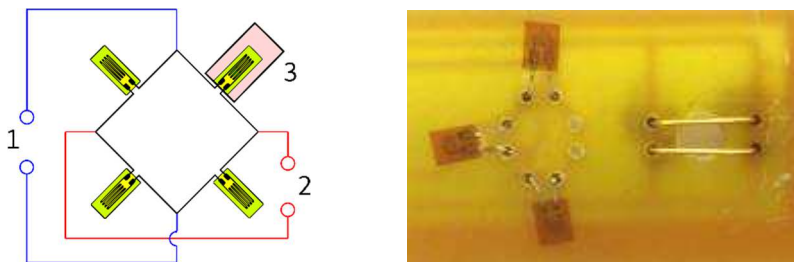
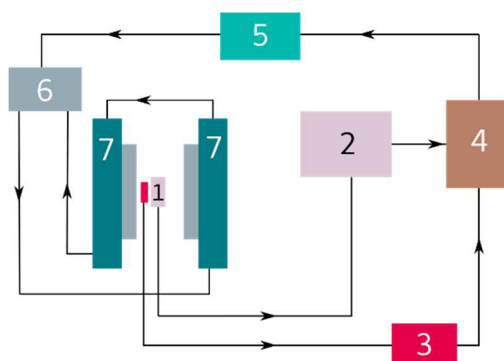


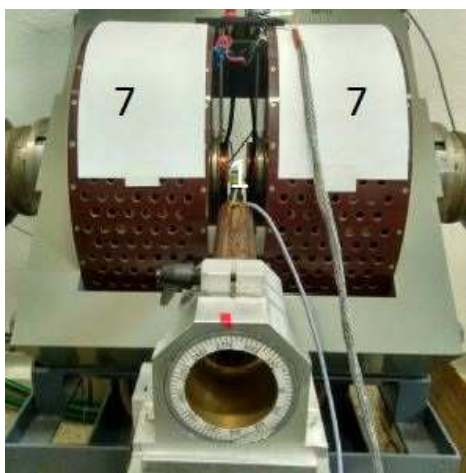
Fig. 3. Mostek Wheatstone'a złożony z czterech tensometrów (schemat z lewej):
1 - napięcie wejściowe U_{in} , 2 - napięcie wyjściowe U_{out} , 3- próbka z przyklejonym tensometrem.
Fotografia mostka Wheatstone'a na cienkiej płytce nośnej (z prawej).

3. UKŁAD DO POMIARU MAGNETOSTRYKCJI

Układ pomiarowy (schemat na rys. 4.) składa się z: 1 - próbki materiału magnetostrykcyjnego (z mostkiem Wheatstone'a) umieszczonej centralnie pomiędzy nabiegunnikami elektromagnesu za pomocą systemu pozycjonującego XYZ; 2 - wzmacniacza tensometrycznego, 3 - układu pomiarowego z halotronem (halotron jest umieszczony blisko badanej próbki), 4 - komputera PC, 5 - multiimetru, 6 - zasilacza elektromagnesu, 7 - elektromagnesu. Fotografia (Rys. 5) prezentuje główne części układu pomiarowego.



Rys. 4. Schemat układu pomiarowego magnetostrykcji:
 1 - próbka z mostkiem Wheatstone'a, 2 - wzmacniacz tensometryczny,
 3 - miernik halotronowy, 4 - PC, 5 - multiimetr, 6 - zasilacz elektromagnesu, 7 - elektromagnes z nabiegunnikami.



Rys. 5. Główne składniki układu pomiarowego:
 1 - próbka z mostkiem Wheatstone'a, 7 - elektromagnes z nabiegunnikami

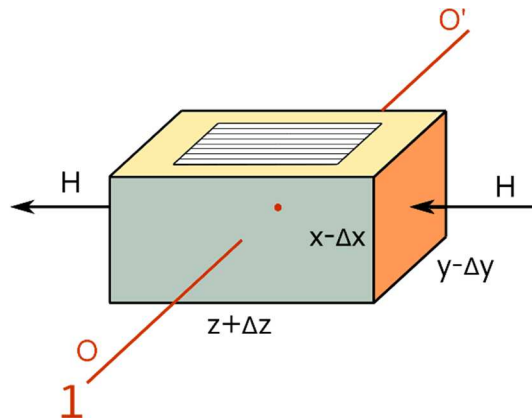
Proces pomiaru. W wyniku polecenia z komputera (4) zasilacz elektromagnesu (6) zwiększa powoli natężenie prądu stałego płynącego przez uzwojenia elektromagnesu (7) i tym samym zwiększa natężenie H pola magnetycznego od zera do zadanego H_{max} , a pole to indukuje naprężenie w próbce. Prąd stały jest sterowany przez komputer (4) poprzez multimetr (5).

W następstwie wzrastające odkształcenie $\varepsilon(H)$ jest mierzone przez układ tensometryczny (2) (mostek Wheatstone'a i wzmacniacz tensometryczny) i wynik pomiaru jest zapisywany przez komputer (4). Halotron (3) i komputer (4) nastawiają natężenie H pola magnetycznego.

Wyznaczone odkształcenie ε równe jest parametrowi magnetostrykcji λ .

Pomiar magnetostrykcji wzdłużnej λ_{\parallel}

Rysunek 6 przedstawia geometrię pomiaru magnetostrykcji wzdłużnej λ_{\parallel} .



Rys. 6. Geometria pomiaru wzdłużnej magnetostrykcji λ_{\parallel} .
 Natężenie pola magnetycznego jest prostopadłe do ścianki (x,y) .
 Tensometr jest przyklejony do próbki wzdłuż kierunku z
 i mierzy odkształcenie wzdłuż z .

Oś obrotu OO' znajduje się w pozycji 1, wymiar z jest równoległy do natężenia H pola magnetycznego. W rezultacie działania pola magnetycznego, próbka jest wydłużona do $z+\Delta z$ i tensometr mierzy odkształcenie ε . Prostopadle do pola H próbka jest skurczona do wymiarów $x-\Delta x$ i $y-\Delta y$.

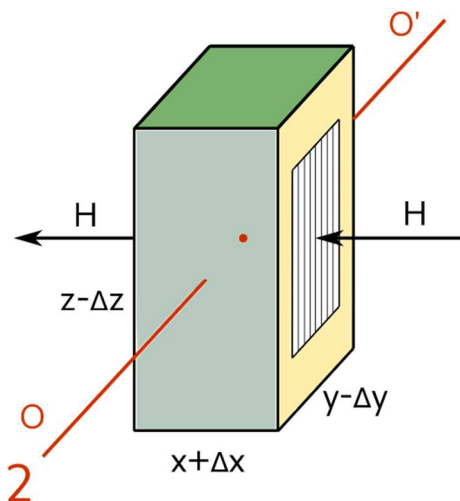
Magnetostrykcja podłużna λ_{\parallel} wynosi

$$\varepsilon = \Delta z / z = \lambda \quad (7)$$

stosownie do rys. 1 i 6.

Pomiar magnetostrykcji poprzecznej λ_{\perp}

Rysunek 7 przedstawia geometrię pomiaru magnetostrykcji poprzecznej λ_{\perp} . Oś OO' znajduje się w pozycji 2, jest obrócona o 0.5π . W tym przypadku wymiar x jest równoległy do natężenia pola magnetycznego H .



Rys. 7. Geometria pomiaru magnetostrykcji poprzecznej λ_{\perp} . Natężenie pola magnetycznego jest prostopadłe do ścianki (y,z) . Tensometr jest przyklejony wzdłuż kierunku z i mierzy skrócenie wzdłuż kierunku z .

Pod wpływem pola magnetycznego H , próbka jest wydłużona do $x+\Delta x$ wprowadzając odkształcenie ε . Prostopadłe do pola H próbka jest zmniejszona do wymiarów $z-\Delta z$ i $y-\Delta y$. W tym przypadku tensometr mierzy skurczenie wzdłuż kierunku z ,

$$\eta = \Delta z/z = \lambda_{\perp} \quad (8)$$

co znaczy że mierzy odkształcenie η czyli magnetostrykcję poprzeczną λ_{\perp} .

4. MAGNETOSTRYKCJA ZWIĄZKÓW TYPU ZIEMIA RZADKA – ŻELAZO

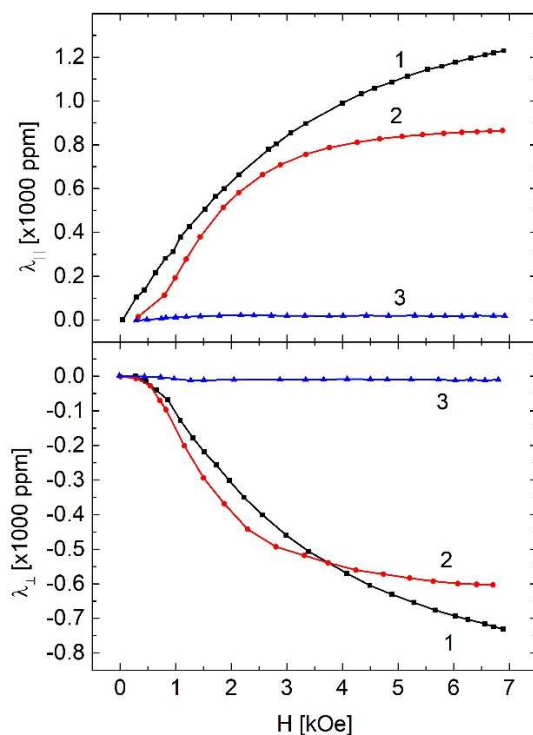
Materiały

Metodę tensometryczną zastosowano do pomiarów magnetostrykcji przykładowych związków typu RFe_2 (R-ziemia rzadka). Syntezę materiałów przeprowadzono w łuku elektrycznym z bezkontaktowym zapłonem, jak to opisano w pracy [9]. Z badań przy pomocy promieniowania X wiadomo, że

związki międzymetaliczne RFe_2 tworzą regularną płasko centrowaną fazę Lavesa $Fd3m$, $C15$, typu $MgCu_2$. Faza Lavesa $C15$ jest szczegółowo opisana w literaturze [13].

Magnetostrykcje

Rysunek 8 prezentuje wyniki pomiarów magnetostrykcji dla związków polikrystalicznych $TbFe_2$ (krzywa 1), $Tb_{0.27} Dy_{0.73} Fe_2$ (2) i YFe_2 (3). Dla związków $TbFe_2$ i $Tb_{0.27} Dy_{0.73} Fe_2$ magnetostrykcje podłużna λ_{\parallel} , poprzeczna λ_{\perp} osiągają ogromne wartości. Ponieważ związek $TbFe_2$ posiada dużą magnetokryształiczną anizotropię, jego parametry magnetostrykcji rosną, gdy zwiększa się natężenie pola magnetycznego, ale nie zmierzają do nasycenia. Właściwość ta tworzy problemy przy zastosowaniach. Mieszanina $R = Tb_{0.27} Dy_{0.73}$ w związku $Tb_{0.27} Dy_{0.73} Fe_2$ znanym jako Terfenol D usuwa tę trudność [6]. Magnetostrykcje są mniejsze w porównaniu do wartości obserwowanych dla $TbFe_2$, ale nadal są ogromne i dążą do nasycenia, gdy narasta natężenie zewnętrznego pola magnetycznego (krzywa 2). Dla tego składu ziem rzadkich anizotropia magnetokryształiczna jest zredukowana niemal do zera [6,8].



Rys. 8. Zależność magnetostrykcji podłużnej λ_{\parallel} i poprzecznej λ_{\perp} od natężenia H zewnętrznego pola magnetycznego dla związków: 1 – $TbFe_2$, 2 – $Tb_{0.27} Dy_{0.73} Fe_2$ i 3 – YFe_2 .

Źródłem ogromnych magnetostrykcji są duże momenty magnetyczne powłok atomowych $4f$ w ziemiach rzadkich. Momenty te poddane działaniu zewnętrznego pola magnetycznego oddziałują z siecią krystaliczną wprowadzając odkształcenia, czyli magnetostrykcję tej sieci [4,6]. Można przytoczyć, że teoretyczny moment magnetyczny $gJ\mu_B$ dla Tb wynosi $9\mu_B$ (wartość eksperymentalna - 9.34), a moment dla Dy wynosi $10\mu_B$ (wartość eksperymentalna - 10.33) [14]. Litera g oznacza czynnik Landé, a J oznacza liczbę całkowitego momentu pędu powłoki atomowej $4f$, μ_B jest magnetonem Bohra [3,4,14].

Ponieważ atomy itru są niemagnetyczne, nie posiadają momentów magnetycznych, zatem magnetostrykcje zmierzone dla związku YFe_2 (krzywe 3) są bliskie zera. Ten izostrukuralny materiał jest dodany dla porównania z materiałami o ogromnej magnetostrykcji.

Błąd eksperymentalny pomiarów magnetostrykcji można oszacować na 1-2 procent.

5. PODSUMOWANIE

Technologia produkcji związków międzymetalicznych typu ciężka ziemia rzadka – żelazo posiadających ogromną magnetostrykcję została w pełni opracowana i opisana w literaturze [9].

W niniejszej pracy opisany jest zrealizowany prosty układ pomiarowy ogromnej magnetostrykcji. Przedstawione zestawy technologiczne i pomiarowe mogą być używane do produkcji materiałów z ogromną magnetostrykcją dla celów laboratoryjnych, bądź do produkcji dla celów przemysłowych w ograniczonym zakresie. Zestawy te mogą być rozbudowane z przeznaczeniem dla celów technologicznych i pomiarowych prowadzonych na skalę przemysłową.

Podziękowania: Finansowane w części przez Politechnikę Rzeszowską, projekt nr UPB.FE. 20.001.

LITERATURA

- [1] Gibbs M.R.J., *Magnetostriction: 150 Years from the Discovery*, Physica Scripta, 1992, Vol. T45, p.p. 115-119.
- [2] Bozorth R.M., *Ferromagnetism*, Van Nostrand, Toronto 1951.
- [3] Morrish A.H., *Fizyczne podstawy magnetyzmu*, PWN, Warszawa 1970.
- [4] S.W. Wonsowskij S.W., *Magnetizm*, Nauka, Moskwa 1971 (po rosyjsku).
- [5] Callen E., Callen H.B., *Magnetostriction, Forced Magnetostriction, and Anomalous Thermal Expansion in Ferromagnets*, Phys. Rev., 1965, Vol.139, p.p. A 445-471.
- [6] Clark A.E., *Magnetostrictive Rare Earth-Fe₂ Compounds*, in: Wohlfarth E.P., Ed. *Ferromagnetic materials*, Vol.1, North-Holland 1980.

-
- [7] Coey J.M.D., *Magnetism and Magnetic Materials*, Cambridge University Press, New York 2009.
- [8] Engdahl G., *Handbook of Giant Magnetostrictive Materials*, Academic Press, San Diego 2000.
- [9] Onak M., Pszczoła J., *An arc melting system with a non-contact ignition*, Phys. for Economy, 2018, Vol. 1, p.p.27-41.
- [10] Roliński Z., *Tensometria oporowa. Podstawy teoretyczne i przykłady zastosowań*, WNT, Warszawa 1981.
- [11] TENMEX (prodcent); www.tenmex.pl
- [12] OMEGA; www.omega.com/en-us/resources/strain-microstrain
- [13] Laves F., *Kristallographie der Legierungen*, Naturwissenschaften, 1939, Vol. 27, p.p. 65-73 (po niemiecku).
- [14] Legvold S., *Rare Earth Metals and Alloys*, in: Wohlfarth E.P., Ed. *Ferromagnetic materials*, Vol.1, North-Holland 1980.

DOI: 10.7862/rf.2021.pfe.4

Received: 15.02.2021

Accepted: 23.08.2021