

Badanie pętli histerezy magnetycznej ferromagnetyków, przy użyciu oscyloskopu (E1)

1. Wymagane zagadnienia

- klasyfikacja rodzajów magnetyzmu
- własności magnetyczne ciał stałych, wpływ temperatury
- atomistyczna teoria magnetyzmu – momenty magnetyczne atomów
- pętla histerezy magnetycznej
- zastosowanie ferromagnetyków

2. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zbadanie pętli histerezy, wyznaczenie jej charakterystycznych parametrów oraz pomiar względnej przenikalności magnetycznej dla wybranych materiałów ferromagnetycznych.

3. Wstęp

Parametrem określającym własności magnetyczne materiałów jest podatność magnetyczna definiowana na jednostkę objętości:

$$\chi = \frac{\vec{M}}{\vec{H}}$$

gdzie: \vec{M} - jest wektorem namagnesowania (momentem magnetycznym przypadającym na jednostkę objętości), natomiast \vec{H} - to wektor pola magnetycznego.

Substancje możemy podzielić na trzy główne kategorie: *diamagnetyki* (o ujemnej podatności magnetycznej), *paramagnetyki* i *ferromagnetyki* (o dodatniej podatności magnetycznej), zależnie od tego jak modyfikują one pole magnetyczne i jak się w tym polu zachowują. W substancjach należących do trzeciej kategorii w określonych warunkach temperatury i odpowiedniej fazie krystalicznej występuje uporządkowanie momentów magnetycznych atomów bez obecności zewnętrznego pola magnetycznego.

Zachowanie się magnetyków w polu magnetycznym można wyjaśnić na podstawie zjawisk zachodzących w atomach i cząsteczkach. Elektrony, ze względu na swój ruch wokół jąder atomowych mają orbitalny moment magnetyczny oraz spinowy moment magnetyczny. W nieobecności zewnętrznego pola magnetycznego moment magnetyczny atomu lub cząsteczki (wypadkowy moment orbitalnych i spinowych momentów magnetycznych

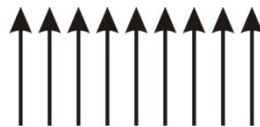
elektronów) może być równy bądź różny od zera. W pierwszym przypadku substancja jest diamagnetykiem, w drugim natomiast jest paramagnetykiem lub ferromagnetykiem.

Pole magnetyczne wywołuje we wszystkich substancjach powstanie indukowanego momentu magnetycznego, który jest skierowany – zgodnie z regułą Lentza – *przeciwnie* do wektora indukcji magnetycznej pola \vec{B} działającego na atomy. Zjawisko to nazywane powszechnym diamagnetyzmem, w wielu substancjach jest maskowane przez znacznie mocniejsze efekty paramagnetyczne lub ferromagnetyczne, polegające na porządkowaniu przez pole magnetyczne własnych momentów magnetycznych atomów i cząsteczek.

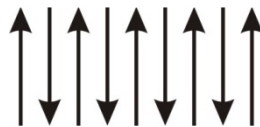
Efekt porządkowania momentów magnetycznych w ferromagnetykach jest związany z właściwościami substancji. Jest on wynikiem oddziaływań zachodzących pomiędzy elektronami sąsiednich atomów i nosi nazwę *oddziaływania wymiany*. Każdy układ fizyczny np. zbiór atomów tworzących ciało stałe, dąży do zminimalizowania swojej energii. W określonych warunkach fizycznych (budowa sieci krystalicznej, temperatura) uporządkowanie momentów magnetycznych atomów będzie stanem o minimalnej energii całkowitej.

Rozróżniamy kilka typów uporządkowania momentów magnetycznych. Najczęściej występujące to:

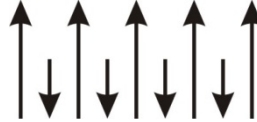
– ferromagnetyki – to materiały posiadające momenty magnetyczne atomów ustawione równoległe względem siebie. Drgania termiczne atomów przeciwdziałają uporządkowaniu. Powyżej pewnej temperatury zwanej *temperaturą Curie* (T_C) uporządkowanie magnetyczne zanika i substancja staje się paramagnetykiem, nie zmieniając stanu skupienia.



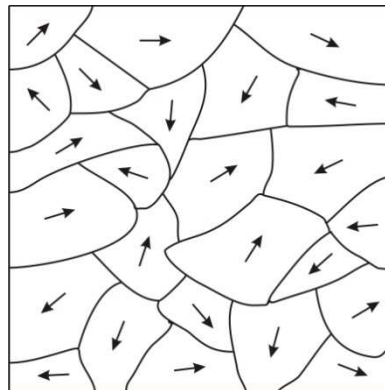
– antyferromagnetyki – to substancje w których stanowi o minimalnej energii sieci odpowiada antyrównoległe ustawienie momentów magnetycznych, zmieniające się od atomu do atomu. Antyferromagnetyk przechodzi w paramagnetyk powyżej *temperatury Neela* (T_N).



– ferrimagnetyki – to takie materiały w których występują momenty magnetyczne o różnych wartościach zmieniające swój zwrot od atomu do atomu. Są to tzw. nieskompensowane antyferromagnetyki, o wypadkowym momencie magnetycznym różnym od zera, które zachowują się jak słabe ferromagnetyki.



W temperaturze niższej od temperatury Curie momenty magnetyczne elektronów w ferromagnetyku, w skali mikroskopowej, są równoległe do siebie. Rozpatrując jednak próbkę jako całość, obserwujemy, że wspomniane uporządkowanie nie występuje w całej jej objętości, tylko w małych objętościach zwanych *domenami* (Rysunek 1). Kierunki momentów magnetycznych w poszczególnych domenach są różne. Powstawanie domen w ferromagnetyku jest uwarunkowane tym, że całkowita energia próbki podzielonej na domeny jest mniejsza niż próbki o jednolitym uporządkowaniu magnetycznym. Przejście z jednego kierunku magnetyzacji na drugi zachodzi w wąskim obszarze, zwanym *granicą (ścianą) domeny*.



Rysunek 1. Układ domen w nienamagnesowanym ferromagnetyku

Pod wpływem zewnętrznego pola magnetycznego \vec{H} działającego na materiały o strukturze domenowej następuje porządkowanie poszczególnych momentów magnetycznych (ustawianie domen zgodnie z tym polem). Zjawisko to nazywamy *namagnesowaniem* i związane jest z dwoma procesami:

– w słabym zewnętrznym polu magnetycznym objętość domen, których kierunki namagnesowania pokrywają się z kierunkiem przyłożonego pola, zwiększa się kosztem objętości domen zorientowanych w innych kierunkach (następuje przesuwanie ścian domen),

– w silnym polu namagnesowanie domen obraca się w kierunku zewnętrznego pola magnetycznego.

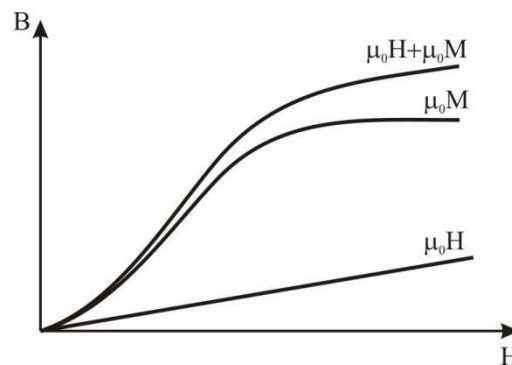
Namagnesowanie magnetyka jest wprost proporcjonalne do przyłożonego pola magnetycznego \vec{H} i powoduje wzrost indukcji magnetycznej \vec{B} wewnątrz tego ciała.

$$\vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H} = \mu_0 \vec{H} (1 + \chi)$$

gdzie: μ_0 – jest przenikalnością magnetyczną próżni, $\mu = 1 + \chi$ – względna przenikalność magnetyczna materiału, stąd:

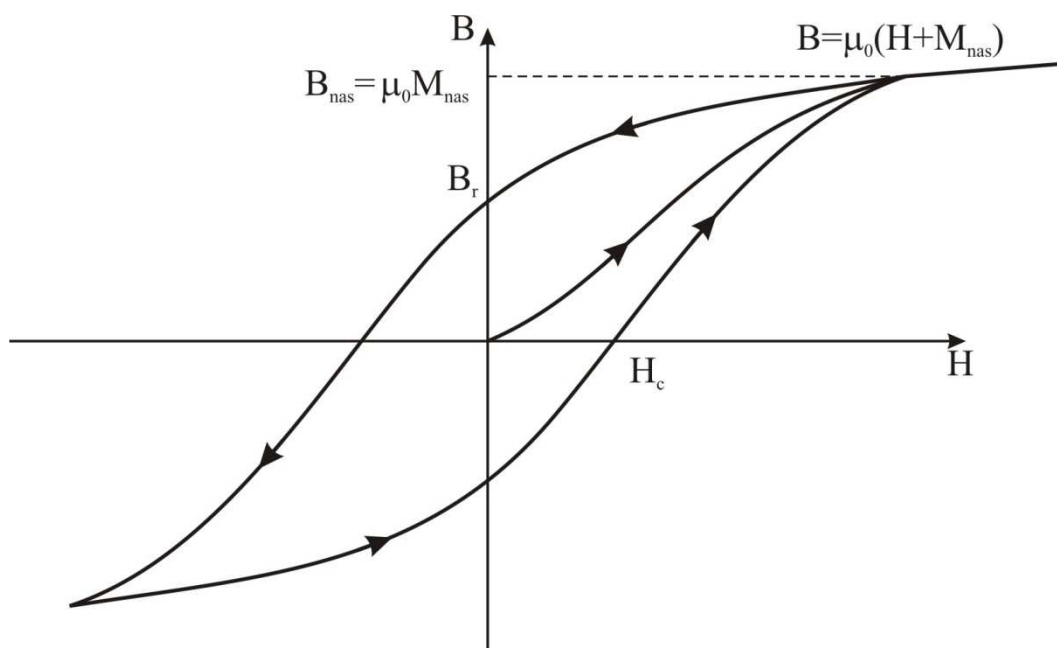
$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \vec{M}$$

Dla materiałów ferromagnetycznych składowa $\mu_0 \vec{M}$ jest o kilka rzędów wielkości większa od składowej $\mu_0 \vec{H}$. Zależność indukcji wypadkowej i jej składowych od zewnętrznego pola magnetycznego przedstawia Rysunek 2:



Rysunek 2. Zależność indukcji wypadkowej i jej składowych od zewnętrznego pola magnetycznego

Umieszczając materiał ferromagnetyczny nie wykazujący namagnesowania ($\vec{M} = 0$) w zewnętrznym polu magnetycznym \vec{H} możemy mierzyć wartości \vec{M} i \vec{B} odpowiadające danemu polu \vec{H} . Wraz z jego wzrostem następuje wzrost namagnesowania \vec{M} aż do osiągnięcia wartości nasycenia M_{nas} (krzywa namagnesowania pierwotnego). Namagnesowanie nasycenia odpowiada całkowitemu uporządkowaniu domen w kierunku pola \vec{H} . Dalszy wzrost indukcji magnetycznej w próbce spowodowany jest tylko wzrostem pola \vec{H} (patrz Rysunek 3).

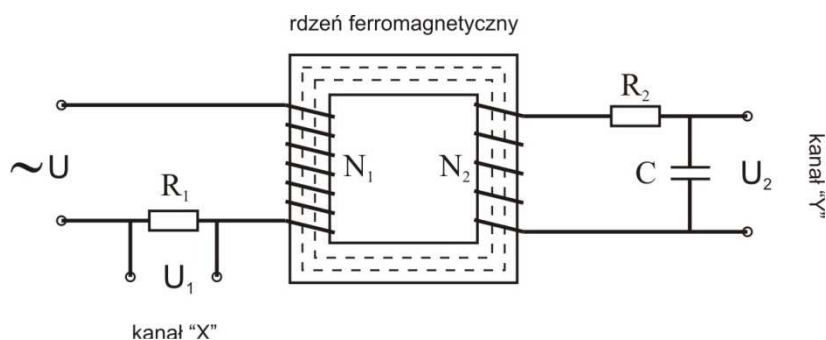


Rysunek 3. Pętla histerezy magnetycznej ferromagnetyka oraz krzywa namagnesowania pierwotnego

Przy zmniejszaniu natężenia pola magnetycznego \vec{H} , indukcja próbki będzie maleć, ale wzdłuż innej krzywej. Oznacza to, że domeny nie wracają do pierwotnej orientacji. Przy całkowitym zaniku pola magnetycznego indukcja w próbce posiadać będzie wartość B_r różną od zera, zwaną *indukcją szczątkową* (*pojemnością remanencji, pozostałością magnetyczną*). Przyłożenie pola \vec{H} w kierunku przeciwnym, o wartości H_c zwanym *pojemnością koercji*, spowoduje zmniejszenie indukcji do zera. Pełne przemagnesowanie, czyli zmiana natężenia od H_{max} do $-H_{max}$ i z powrotem, odbywa się wzdłuż krzywej zamkniętej, zwanej *pętlą histerezy*.

4. Wykonanie pomiarów

Jednym ze sposobów obserwacji pętli histerezy jest zastosowanie oscyloskopu. Układ pomiarowy musi być dobrany tak, aby wytwarzał sygnał napięciowy proporcjonalny do pola \vec{H} (podawany do kanału X oscyloskopu) i sygnał napięciowy proporcjonalny do pola \vec{B} (podawany do kanału Y oscyloskopu).



Rysunek 4. Schemat budowy układu do badania własności magnetycznych ferromagnetyków

Najważniejszym elementem układu pomiarowego jest rdzeń badanego materiału ferromagnetycznego, na którym nawinięte są dwa uzwojenia, pierwotne N_1 oraz wtórne N_2 (Rysunek 4). Prąd płynący w uzwojeniu pierwotnym, jest proporcjonalny do wytwarzanego pola magnetycznego \vec{H} . Jego przepływ powoduje spadek napięcia U_1 na zaciskach rezystora R_1 , który jest podawany na kanał „X” oscyloskopu. Prąd w uzwojeniu wtórnym transformatora płynący poprzez układ całkujący (rezystor R_2 i kondensator C) powoduje powstanie sygnału napięciowego U_2 podawanego na kanał „Y” oscyloskopu. Sygnał ten jest proporcjonalny do indukcji pola magnetycznego \vec{B} .

Podstawowym parametrem opisującym własności magnetyczne jest jego względna przenikalność magnetyczna μ :

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H}$$

gdzie: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \left[\frac{\text{V}\cdot\text{s}}{\text{A}\cdot\text{m}} \right]$.

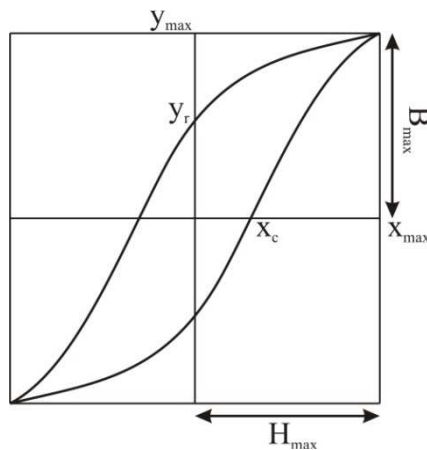
Znając liczbę zwojów uzwojenia pierwotnego N_1 oraz jego długość l_1 możemy wyznaczyć wartość natężenia pola magnetycznego H :

$$H = \frac{N_1 U_x}{l_1 R_1}$$

przy czym:

$$U_x = C1 \cdot x$$

gdzie: $C1$ – to czułość kanału „X” oscyloskopu, x - wartość wychYLENIA pętli histerezy w kierunku OX.



Rysunek 5. Przykładowy obraz obserwowany na ekranie oscyloskopu

Dzięki zastosowaniu układu całkującego napięcie U_2 jest proporcjonalne do wartości indukcji magnetycznej B . Znając liczbę zwojów uzwojenia wtórnego N_2 , pole przekroju poprzecznego rdzenia S możemy wyznaczyć wartość indukcji B :

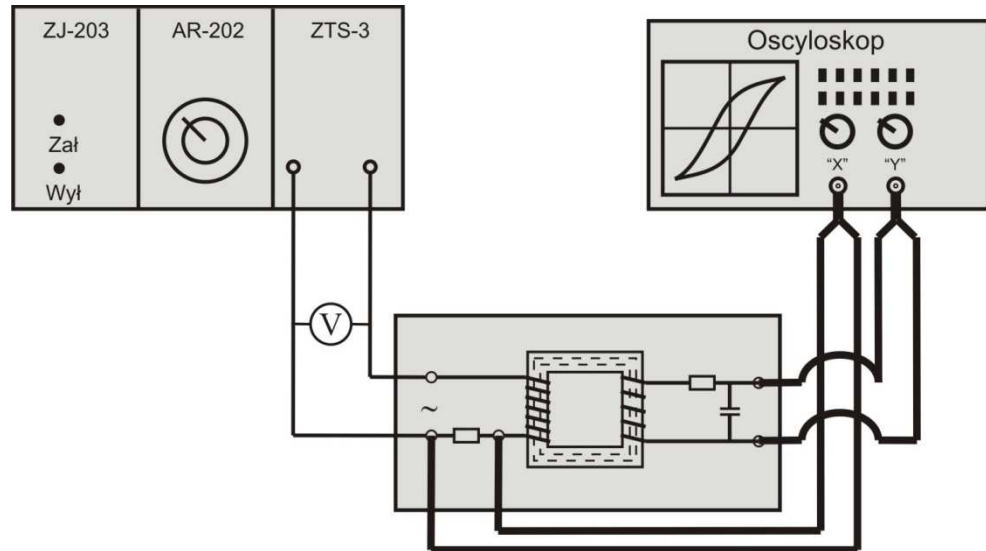
$$B = \frac{R_2 C U_y}{N_2 S}$$

przy czym:

$$U_y = C2 \cdot y$$

gdzie: $C2$ – to czułość kanału „Y” oscyloskopu, y - wartość wychylenia pętli histerezy w kierunku OY.

4.1. Schemat układu pomiarowego



Rysunek 6. Schemat układu pomiarowego do badania pętli histerezy magnetycznej

4.2. Przygotowanie stanowiska do pomiarów

- Odłączyć wszystkie urządzenia od zasilania
- Przygotować oscyloskop do pracy w trybie X-Y wciskając klawisz XY na jego panelu
- Zmontować układ pomiarowy przedstawiony na Rysunek 6.
- Woltomierz ustawić na pomiar napięcia zmiennego na zakresie 10 V.
- Ustawić pokrętkę panelu AR-202 w lewym skrajnym położeniu

4.3. Parametry próbek pomiarowych.

- Próbka nr 2

Napięcie zasilające od 2 do 5 V, zmieniane co 0,5 V.

$$N_1 = 250, R_1 = 10 \Omega, l = 95,7 \text{ mm}, N_2 = 200, R_2 = 82 \text{ k}\Omega, C = 1,5 \mu\text{F}, S = 150 \text{ mm}^2$$

4.4. Pomiar krzywej namagnesowania pierwotnego.

- a) Po uzyskaniu zgody osoby prowadzącej zajęcia podłączyć urządzenia do sieci elektrycznej, włączyć oscyloskop oraz panele ZJ-203 i ZTS-3
- b) Dobrać odpowiednią czułość kanałów „X” i „Y” oscyloskopu (przy pomocy pokręteł „zewnętrznych”), odczytać i zapisać wielkości $C1$ i $C2$. Pokręta wewnętrzne muszą być w skrajnym prawym położeniu.
- c) Przekręcając powoli w prawo pokrętko panelu AR-202 ustalać napięcie na zadaną wartość i odczytać z oscyloskopu wartości parametrów pętli histerezy (x_{max} , y_{max} , x_c , y_r).
- d) Zanotować wartości x_{nas} , y_{nas} przy których następuje nasycenie namagnesowania.
- e) Po wykonaniu pomiarów ustawić pokrętko panelu AR-202 w lewym skrajnym położeniu.
- f) Wyniki zebrać w tabeli.

Opis badanej próbki:				
$N_1 = \dots\dots\dots$		$N_2 = \dots\dots\dots$		$C1 = \dots\dots\dots$
$R_1 = \dots\dots\dots \Omega$		$R_2 = \dots\dots\dots k\Omega$		$C2 = \dots\dots\dots$
$l = \dots\dots\dots mm$		$C = \dots\dots\dots \mu F$		
$S = \dots\dots\dots mm^2$				
U [V]	x_c [mm]	x_{max} [mm]	y_r [mm]	y_{max} [mm]
$x_{nas} = \dots\dots\dots [mm]$		$y_{nas} = \dots\dots\dots [mm]$		

5. Opracowanie wyników pomiarów

- a) Korzystając z pomiarów przeprowadzić obliczenia H_c , H_{max} , B_r , B_{max} i zestawić w tabeli:

Opis badanej próbki:				
$N_1 = \dots\dots$		$N_2 = \dots\dots$		$C1 = \dots\dots$
$R_1 = \dots\dots \Omega$		$R_2 = \dots\dots k\Omega$		$C2 = \dots\dots$
$l = \dots\dots mm$		$C = \dots\dots \mu F$		
		$S = \dots\dots mm^2$		
U [V]	H_c [A/m]	H_{max} [A/m]	B_r [T]	B_{max} [T]

- b) Narysować krzywą namagnesowania pierwotnego $B_{max} = f(H_{max})$
 c) Wyliczyć wartość względnej przenikalności magnetycznej μ dla każdej próbki w punkcie $B = B_{nas}$. Obliczenia zebrać w tabeli:

I.p.	Opis badanej próbki	B_{nas} [T]	μ
1			
2			
3			

- d) Określić który z badanych materiałów lepiej nadaje się do wykonania magnesu trwałego

6.

Literatura

1. H. Szydłowski, *Pracownia fizyczna*, PWN, Warszawa 1999
2. A. K. Wróblewski, J. A. Zakrzewski, *Wstęp do Fizyki, Tom 2, Część 2*, PWN, Warszawa 1991
3. Ch. Kittel, *Wstęp do fizyki ciała stałego*, PWN, Warszawa, 1999
4. J. Massalski, *Fizyka dla inżynierów t. 2*, WNT, Warszawa 1977
5. D. Halliday, R. Resnick, *Fizyka, t. 2*, PWN, Warszawa 1998