

Podstawy Nauki o Materiałach – Właściwości magnetyczne

Historia magnetyzmu

- ok. 1400 BC – chiński kompas;
- 1269 – Pierre Pelerin de Maricourt (*Epistola de magnete*) naturalne sferyczne magnesy z magnetytu magnetyzujące igły, obraz pola magnetycznego, pojęcie „bieguna”;
- ok. 1300 – kompasy nawigacyjne (Kolumb);

Podstawy Nauki o Materiałach – Właściwości magnetyczne

Historia magnetyzmu

William Gilbert (1544-1603)

- wyjaśnienie zachowania się kompasu,
- Ziemia jako pojedynczy magnes;
- indukcja magnetyczna,

Historia magnetyzmu

Charles Augustin de Coulomb (1736-1806)
 • pomiary siły magnetycznej,
 • waga skrętna,



Joseph Henry (1797-1878)
 • odkrycie zjawiska indukcji magnetycznej
 (Faraday był szybszy),



Michael Faraday (1791-1867)
 • odkrycie zjawiska indukcji magnetycznej,
 • prądnicą,



Andy Washnik

Historia magnetyzmu

Hans Christian Ørsted (1777-1851)
 • odkrycie zjawiska elektromagnetyzmu;



Carl Friedrich Gauss (1777-1855)
 • teoria magnetyzmu



Andy Washnik

Historia magnetyzmu

André Marie Ampère (1775-1836)
 • całka liniowa wektora gęstości strumienia magnetycznego obliczana po krzywej zamkniętej jest proporcjonalna do wypadkowego prądu otoczonego tą krzywą,
 • elektrostatyka, elektrodynamika, ...



James Clerk Maxwell (1831-1879)
 • unifikacja oddziaływań,



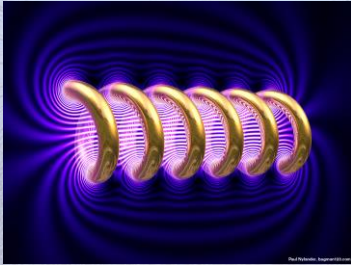
Nicola Tesla (1856-1943)
 • magnetyki zmiennoprądowe,
 • radio,



Andy Washnik

Podstawy magnetyzmu

Pole magnetyczne – zachowawcze pole sił powstające na skutek ruchu ładunków elektrycznych. Prąd stały powoduje powstanie statycznego pola magnetycznego, prąd zmienny – zmiennego (pole elektromagnetyczne).



Andy Washnik

Podstawy magnetyzmu

Indukcja magnetyczna - jeżeli w pewnym obszarze na ładunek elektryczny poruszający się z prędkością v działa siła (Lorentza) F określona przez iloczyn wektorowy:

$$\vec{F} = q \cdot \vec{v} \times \vec{B} \quad 1 \text{ Tesla} = \frac{1 \text{ Newton}}{1 \text{ Amper} \cdot 1 \text{ Metr}}$$

to w obszarze tym występuje pole magnetyczne o indukcji B .

Natężenie pola magnetycznego – wielkość wektorowa, H , wynikająca z prawa Ampera, opisująca pole magnetyczne w odległości r od przewodu, w którym płynie prąd o natężeniu I :

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{r} = I \quad \frac{1 \text{ Amper}}{1 \text{ Metr}}$$

Magnetyzacja – magnetyczny moment dipolowy na jednostkę objętości, M .

Andy Washnik

Podstawy magnetyzmu

Powstanie i zachowanie się takiego pola opisują równania Maxwella:

- zmiennie w czasie pole magnetyczne wytwarza wirowe pole elektryczne (prawo Faradaya),

$$-\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \text{rot}(\vec{E})$$

- przepływający prąd oraz zmienne pole elektryczne wytwarzają wirowe pole magnetyczne (rozszerzone prawo Ampera),

$$\vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \text{rot}(\vec{H})$$

- źródłem pola elektrycznego są ładunki (prawo Gaussa),

$$\text{div}(\vec{D}) = \rho$$

- pole magnetyczne jest bezźródłowe, linie pola magnetycznego są zamknięte (prawo Gaussa),

$$\text{div}(\vec{B}) = 0$$

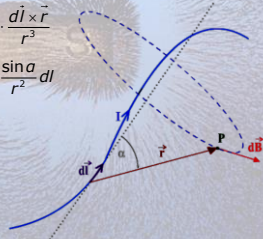
Andy Washnik

Podstawy magnetyzmu

Powstanie i zachowanie się takiego pola opisują równania Maxwella, oraz prawo Biota-Savarta w ujęciu Laplace'a: Indukcja magnetyczna, B , w dowolnym punkcie pola magnetycznego wytworzona przez przewodnik z prądem o dowolnym kształcie jest sumą wektorową indukcji, dB , pochodzących od małych odcinków, dI , przewodnika z prądem:

Postać wektorowa -
$$d\vec{B} = \frac{\mu \cdot \mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot I \cdot \frac{d\vec{l} \times \vec{r}}{r^3}$$

Postać skalarna -
$$dB = \frac{\mu \cdot \mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot I \cdot \frac{\sin \alpha}{r^2} dI$$



Andy Washnik

Podstawy magnetyzmu

strumień magnetyczny w próżni

strumień magnetyczny w materiale



$$\vec{B}_0 = \mu_0 \cdot \vec{H}$$

$$\vec{B}_0 = \mu_0 \cdot \vec{H} + \vec{J}$$

$$\vec{B}_0 = \mu_0 \cdot (\vec{H} + \vec{M})$$

μ_0 – przenikalność magnetyczna próżni,

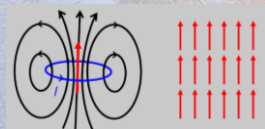
Andy Washnik

Podstawy magnetyzmu

Przyczyną powstania pola magnetycznego jest ruch ładunków, w ujęciu mikroskopowym jest to:

- ruch protonów w jądrze atomowym – jądrowy moment magnetyczny (w zdecydowanej większości przypadków jest pomijalnie mały);
- ruch elektronów wokół jądra atomowego – orbitalny moment magnetyczny związany z orbitalnym momentem pędu (raczej niewielki):

$$\mu_e = \frac{e}{2 \cdot m} \cdot L$$



minimalny moment orbitalny:

$$\mu_B = \frac{e \cdot h}{4 \cdot \pi \cdot m}$$

magneton Bohra, $9,27 \cdot 10^{-24}$ A·m²

Andy Washnik

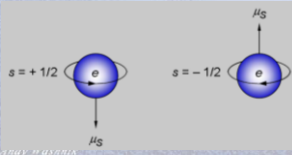
Podstawy magnetyzmu

Przyczyną powstania pola magnetycznego jest ruch ładunków, w ujęciu mikroskopowym jest to:

- ruch protonów w jądrze atomowym – jądrowy moment magnetyczny (w zdecydowanej większości przypadków jest pomijalnie mały);
- ruch elektronów wokół jądra atomowego – orbitalny moment magnetyczny związany z orbitalnym momentem pędu (raczej niewielki);

$$\mu_o = \frac{e}{2 \cdot m} \cdot L$$

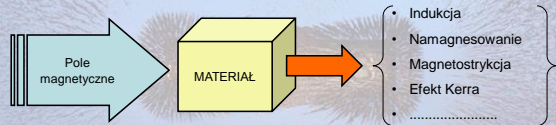
• „ruch obrotowy” elektronów – spinowy moment magnetyczny (decydujący o właściwościach);



$$\mu_s = 2 \cdot \mu_B \cdot S = \pm \mu_B$$

Moment magnetyczny atomu jest sumą wszystkich momentów magnetycznych – jądrowego, orbitalnych i spinowych.

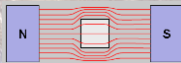
Materiały w polu magnetycznym



Materiały w polu magnetycznym

Zewnętrzne pole magnetyczne zmienia orbitalne momenty pędu elektronów. Jeżeli momenty magnetyczne elektronów wchodzących w skład danego atomu znoszą się wzajemnie tak, że moment magnetyczny atomu jest równy zeru to materiał jest **diamagnetykiem**.

Zjawisko diamagnetyzmu polega na indukcji w materiale, przez zewnętrzne pole magnetyczne, skierowanego przeciwnie pola, osłabiającego działanie zewnętrznego pola.



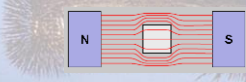
$\chi_m < 0$, $\mu_r < 1$ (aczkolwiek efekt jest słaby);

Diamagnetyzmem cechują się atomy z całkowicie wypełnionymi orbitalami – np. gazy obojętne, kryształy jonowe, półprzewodniki, metale takie jak Cu, Au, Ag.

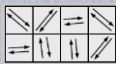
Materiały w polu magnetycznym

Zewnętrzne pole magnetyczne zmienia orbitalne momenty pędu elektronów. Jeżeli momenty magnetyczne elektronów wchodzących w skład danego atomu znoszą się wzajemnie tak, że moment magnetyczny atomu jest równy zeru to materiał jest **diamagnetykiem**.

Zjawisko diamagnetyzmu polega na indukcji w materiale, przez zewnętrzne pole magnetyczne, skierowanego przeciwnie pola, osłabiającego działanie zewnętrznego pola.



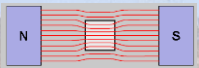
$\chi_m < 0, \mu_r < 1$ (aczkolwiek efekt jest słaby);
Bez pola magnetycznego materiał nie wykazuje momentu magnetycznego, w polu magnetycznym indukowane są słabe dipole magnetyczne.



Andy Washnik

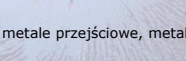
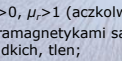
Materiały w polu magnetycznym

Paramagnetyzm to zjawisko słabego magnesowania się ciała w zewnętrznym polu magnetycznym w kierunku zgodnym z kierunkiem pola zewnętrznego. Paramagnetyzm wykazują atomy z częściowo wypełnionymi orbitalami.



W niezbyt niskich temperaturach oraz dla niezbyt silnych pól magnetycznych paramagnetyki, podobnie jak diamagnetyki, wykazują liniową wielkość namagnesowania od pola zewnętrznego:

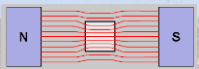
$\chi_m > 0, \mu_r > 1$ (aczkolwiek niewiele);
Paramagnetykami są: metale alkaliczne, metale przejściowe, metale ziem rzadkich, tlen;



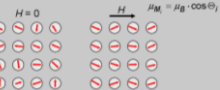
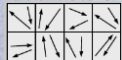
Andy Washnik

Materiały w polu magnetycznym

Paramagnetyzm to zjawisko słabego magnesowania się ciała w zewnętrznym polu magnetycznym w kierunku zgodnym z kierunkiem pola zewnętrznego. Paramagnetyzm wykazują atomy z częściowo wypełnionymi orbitalami.



W paramagnetykach obecne są niewielkie, nieuporządkowane momenty magnetyczne pochodzenia spinowego. Zewnętrzne pole magnetyczne porządkuje spiny elektronów zgodnie z liniami zewnętrznego pola magnetycznego.

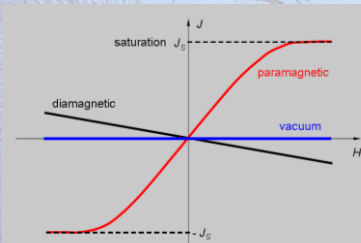


Paramagnetyki wykazują silną zależność właściwości od temperatury zgodnie z prawem Curie.

Andy Washnik

Materiały w polu magnetycznym

Dla wyższych wartości natężenia pola magnetycznego w przypadku materiałów paramagnetycznych obserwuje się zjawisko nasycenia (saturacji) – wszystkie możliwe dipole zostały zorientowane.



dia	χ_m
Al ₂ O ₃	1,81·10 ⁻⁵
NaCl	1,41·10 ⁻⁵
Si	0,41·10 ⁻⁵
Cu	0,96·10 ⁻⁵
Zn	1,56·10 ⁻⁵

para	χ_m
Al	2,07·10 ⁻⁵
MnSO ₄	3,70·10 ⁻⁵
Mo	1,19·10 ⁻⁵
Ti	1,81·10 ⁻⁵
Zr	1,09·10 ⁻⁵

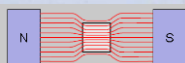
W obu przypadkach $\mu_r \sim 1$, więc takie materiały nie mają znaczenia z punktu widzenia magnetyzmu

Materiały w polu magnetycznym

Ferromagnetyzm to zjawisko samoistnego silnego uprządkowania momentów magnetycznych w obszarze domeny magnetycznej. Ferromagnetyzm wykazują materiały (nie pojedyncze atomy), których atomy mają częściowo wypełnione orbitale. W przypadku braku pola sumaryczny moment magnetyczny może być zerowy.



Pole magnetyczne porządkuje domeny prowadząc do pojawienia się dużego momentu magnetycznego w całej objętości materiału.



$\chi_m > 0$, $\mu_r >> 1$ (czasami bardzo);
 Ferromagnetykami są żelazo, kobalt, nikiel, stopy metali ferromagnetycznych, Nd₂Fe₁₄B, SmCo, ...

Materiały w polu magnetycznym

W materiałach **antyferromagnetycznych** dipole magnetyczne w domenach mają charakter antyrównoległy. Zjawisko to, podobnie jak ferromagnetyzm, występuje w materiałach zbudowanych z atomów o częściowo wypełnionych orbitalach lecz oddalonych od siebie tak, że energia wymiany nie pozwala na uporządkowanie spinów. Zarówno w przypadku braku zewnętrznego pola jak i w polu sumaryczny moment magnetyczny jest praktycznie równy zero.



$\chi_m \approx 0$, $\mu_r \approx 1$;
 Antyferromagnetykami są MnO, FeO, CoO, NiO.

Materiały w polu magnetycznym

Materiały **ferrimagnetycznych** cechują się również antyrównoległym uporządkowaniem elementarnych momentów magnetycznych, przy czym momenty te nie kompensują się całkowicie. Zjawisko to, podobnie jak ferromagnetyzm, występuje w materiałach zbudowanych z atomów o częściowo wypełnionych orbitalach. Struktura krystaliczna decyduje o antyrównoległym ułożeniu spinów lecz nie takich samych atomów.



$\chi_m > 0$, $\mu_r > 1$;
Ferrimagnetykami są tlenki typu AB_2O_4 - ferryty.

Andy Washnik

Materiały w polu magnetycznym

Obszar materiału, w którym wszystkie momenty magnetyczne wykazują to samo uporządkowanie nazywamy domeną magnetyczną lub **obszarem Weissa**.



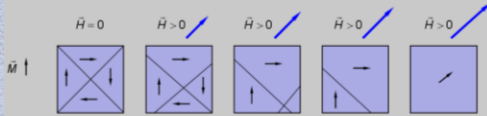
Ich powstanie związane jest z minimalizacją energii całkowitej. Oddzielone są od siebie obszarami dezorientacji zwanymi **ścianami Blocha**. Wielkość domeny dochodzi nawet do mm, grubość ścianki Blocha to kilkadziesiąt atomów 50-100nm.



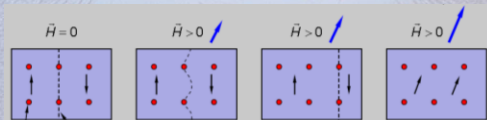
Andy Washnik

Materiały w polu magnetycznym

W zewnętrznym polu magnetycznym domeny obracają się zgodnie z liniami sił pola.



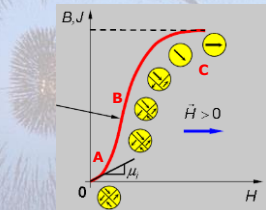
Jednocześnie przesuwają się ścianki domen, których ruch zależy od defektów sieciowych, zanieczyszczeń, granic ziarnowych, wtrąceń ...



Andy Washnik

Materiały w polu magnetycznym

Porządkowanie się domen w zewnętrznym polu magnetycznym jest odpowiedzialne za zjawisko pętli histerezy – opóźnienia reakcji układu na czynniki zewnętrzne. Krzywa magnesowania pierwotnego –

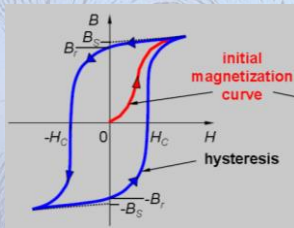


- A – odwracalny ruch ścianek Blocha,
- B – nieodwracalny ruch ścianek Blocha,
- C – odwracalny obrót momentów magnetycznych,

Andy Washnik

Materiały w polu magnetycznym

Porządkowanie się domen w zewnętrznym polu magnetycznym jest odpowiedzialne za zjawisko pętli histerezy – opóźnienia reakcji układu na czynniki zewnętrzne.

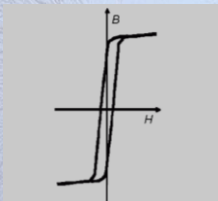


- H_c – natężenie pola koercji,
- B_r – gęstość strumienia remanencji (indukcja resztkowa),
- B_s – gęstość strumienia nasycenia,

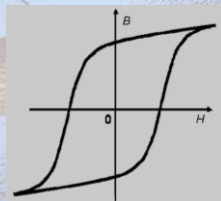
Andy Washnik

Materiały w polu magnetycznym

W zależności od kształtu pętli histerezy materiały ferromagnetyczne są:



miękkie, $H_c < 10 \text{ A}\cdot\text{m}^{-1}$



twarde, $H_c > 100 \text{ A}\cdot\text{m}^{-1}$

Andy Washnik

Materiały magnetyczne - metale

Powstanie ferromagnetyzmu w metalach (i stopach) związane jest z obecnością elektronów 3d (4f). Widoczny jest również wpływ struktury krystalicznej, zwłaszcza wielkości komórki elementarnej.



Materiały magnetyczne - metale

Materiał	T_C [K]	m_{spin} [μ_B]	m_{orbit} [μ_B]	J [T]
Fe	1044	2,14	0,08	2,15
Fe _{0,65} Co _{0,35} (Permendur)	1210		2,46	2,45
Ni _{0,80} Fe _{0,20} (Permalloy)	843		1,02	1,04
α -Fe _{0,40} Ni _{0,40} P _{0,14} B _{0,06} (Metglas)	5,35		1,2	0,81
Co	1360	1,58	0,14	1,81
CoPt	840			1,01
MnBi	633		3,95	0,72
Nd ₂ Fe ₁₄ B (Neomax)	588	2,2 (at), 37,3 (cell)		1,61

Materiały magnetyczne – ceramika nienitlenkowa

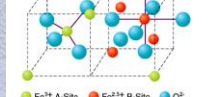
Table 11.16. Lattice parameters and magnetic properties of iron carbide and nitrides

	a	b	c	T_C	J_s	$(m)_0(\mu_B/Fe)$
α Fe ₉₇ N ₃	287			1010	2.2	2.20
α' Fe ₉₀ N ₁₀	283		312	835	2.3	2.48
α' Fe ₁₆ N ₂	572		629	810	2.3	2.35
γ' Fe ₄ N	379.5			769	1.8	2.25
ϵ Fe ₃ N	270		436	567		
ζ Fe ₂ N	483	552	443	9		0.05
Fe ₃ C	452	509	674	483	1.5	1.78

Materiały magnetyczne – tlenki

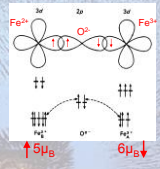
1/4 unit cell of inverse spinel structure

A site (tetrahedral position) B site (octahedral position)

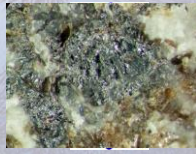


spinel $FeFe_2O_4$

granat $Y_3Fe_5O_{12}$



magnetoplumbit $BaFe_{12}O_{19}$



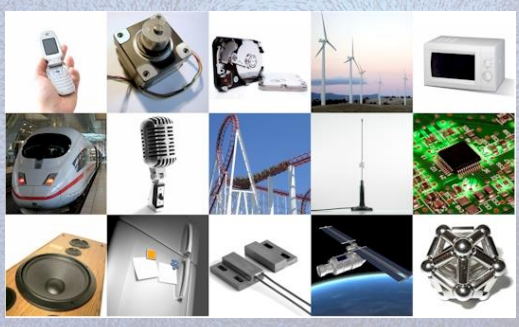
Andy Washnik

Materiały magnetyczne – tlenki

Materiał	T_c [K]	H_c [A/m]	J [T]
$ZnFe_2O_4$	378	3,2	0,5
$NiFe_2O_4$	520	60	0,4
$Y_3Fe_5O_{12}$	470	120	0,2
$BaFe_{12}O_{19}$	610	200000	0,5

Andy Washnik

Materiały magnetyczne – zastosowanie



Andy Washnik

