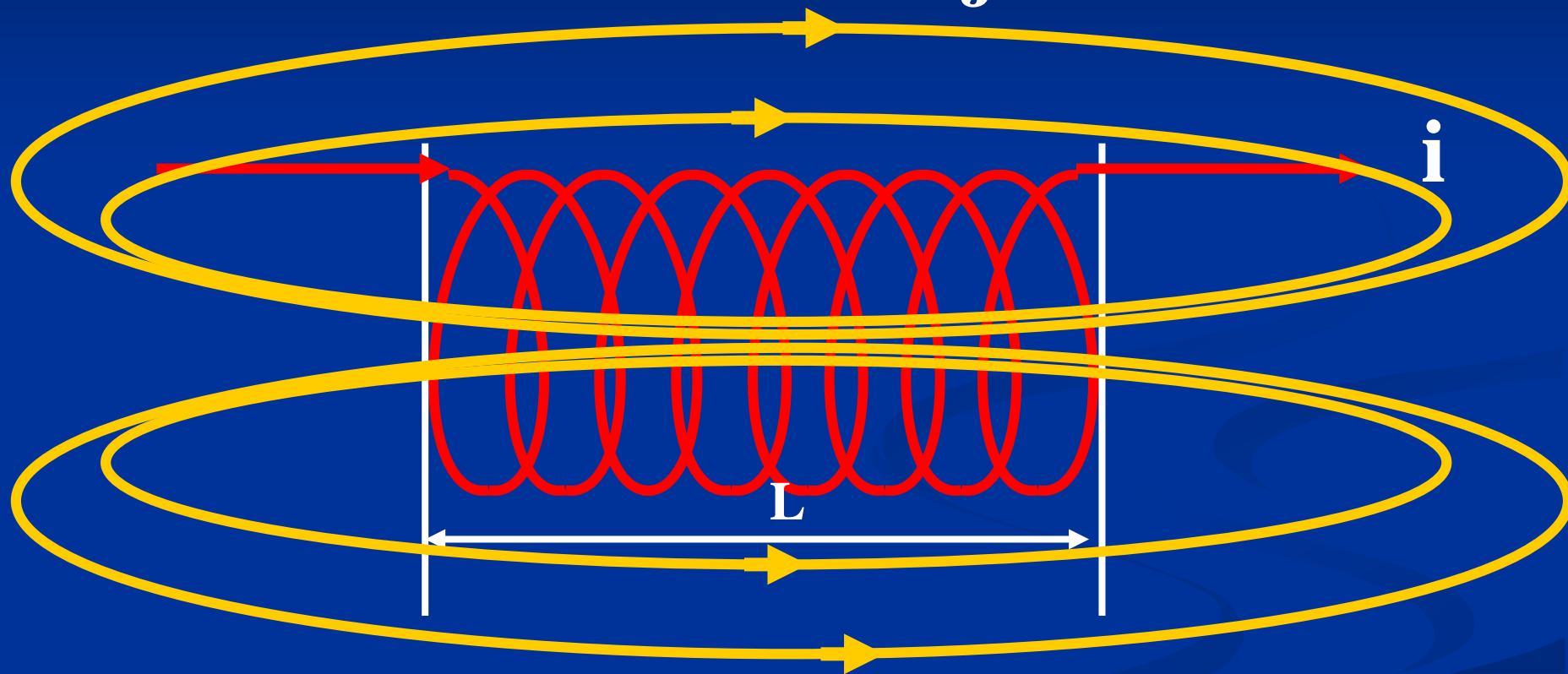


Materiały magnetyczne

**Właściwości podstawowych materiałów
magnetycznych**

Materialy magnetyczne

Nateżenie pola magnetycznego
Solenoid **N** - liczba zwojów



$$\mathbf{n} = \mathbf{N}/\mathbf{L}$$

$$\mathbf{H} = \mathbf{i} * \mathbf{n}$$

Materiały magnetyczne

Indukcja pola magnetycznego

$$\begin{aligned} \mathbf{B} &= \mu_0 \mathbf{H} + \mu_0 \mathbf{J} = \mu_0 \mathbf{H} + \mu_0 \chi \mathbf{H} = \\ &= \mu_0 \mathbf{H} (1 + \chi_\mu) = \mu \mu_0 \mathbf{H} \end{aligned}$$

Gdzie \mathbf{J} – moment magnetyczny jednostki objętości.

Diamagnetyki: $\mu < 1$

Paramagnetyki: $1 < \mu \ll 2$

Ferromagnetyki: $\mu \gg 1$

Podstawa zjawisk magnetycznych – posiadanie przez elektron momentu magnetycznego – spina.

W układzie okresowym są trzy pierwiastki, które posiadają właściwości ferromagnetyczne:

Materiały magnetyczne

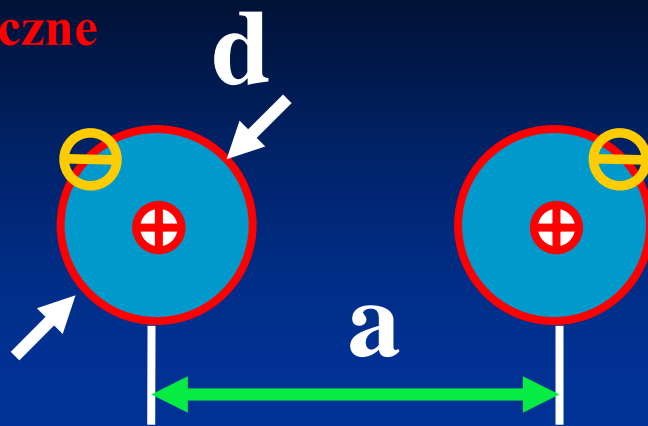
Żelazo (Fe), Nikiel (Ni), Kobalt (Co).

Wyróżnia te pierwiastki z pośród innych fakt, że na jednej z powłok wewnętrznych znajduje się nieparzysta liczba elektronów. Oznacza to, że momenty magnetyczne elektronów nie są skompensowane, a atom posiada moment magnetyczny nawet wchodząc w związki chemiczne z innymi pierwiastkami.

Pomiędzy momentami magnetycznymi sąsiednich atomów w ciele stałym zachodzi oddziaływanie, tak że momenty magnetyczne mogą ustawić się równoległe lub na przemian w przeciwnych kierunkach (anty równoległe). Nazywają to uporządkowaniem spontanicznym.

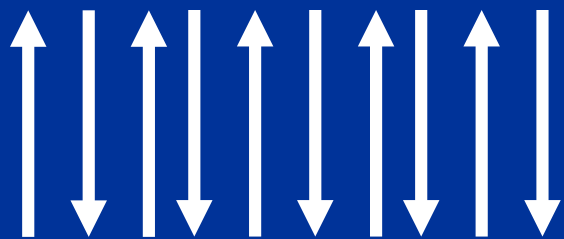
Sposób ustawienia zależy od odległości międzyatomowej.

Materialy magnetyczne



$$a/d < 6,4$$

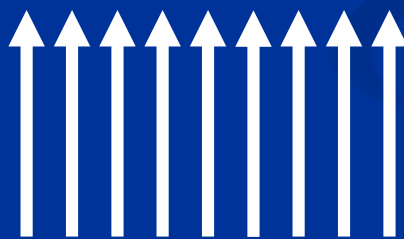
antyferromagnetyk



$$J = 0$$

$$a/d > 6,4$$

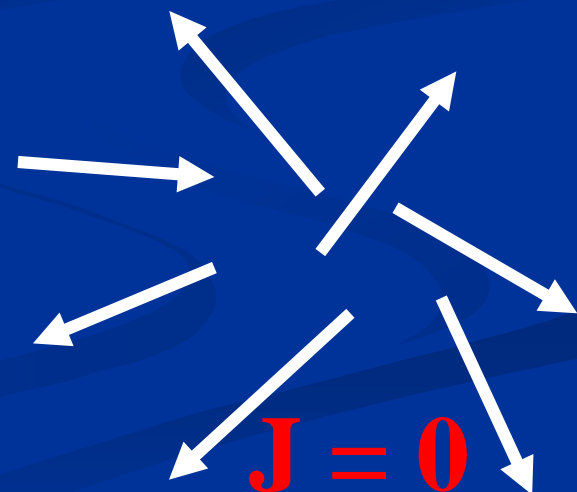
ferromagnetyk



$$J > 0$$

$$a/d > 12,4$$

paramagnetyk

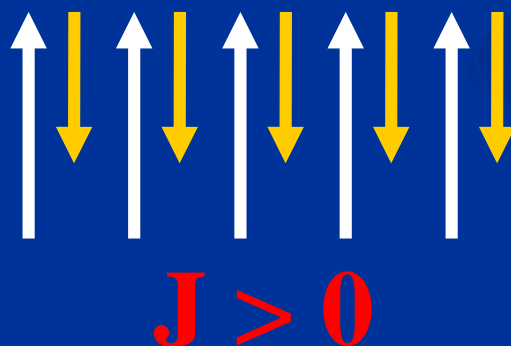


$$J = 0$$

Materialy magnetyczne

Istnieją również tzw. ferrimagnetyki. Materiały te składają się z kilku pierwiastków magnetycznych o różnych wartościach momentów magnetycznych przypadających na atom.

Ustawienie momentów magnetycznych w ferrimagnetykach jest podobne do ustawienia w antyferromagnetykach, to znaczy anty równoległe:



Temperatura Curie

Oddziaływanie pomiędzy sąsiednimi momentami magnetycznymi charakteryzuje się określoną wartością energii potencjalnej. Przy wzroście temperatury energia ruchu cieplnego wzrasta i przy pewnej temperaturze, nazywanej temperaturą Curie (T_C) ruch cieplny burzy uporządkowanie spontaniczne momentów magnetycznych. Wtedy obserwujemy przejście materiału do stanu paramagnetyku.

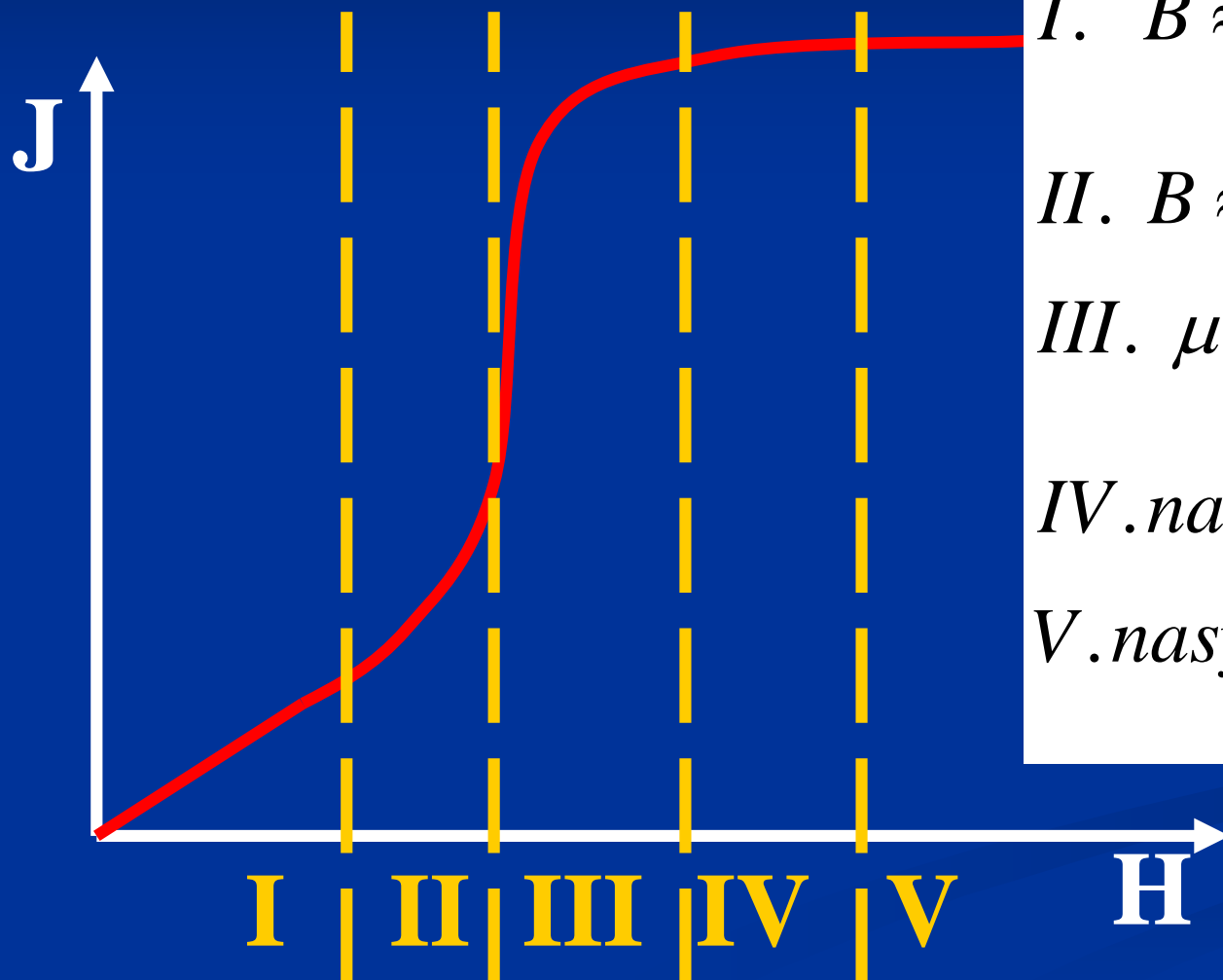
$$\text{Fe} - T_C = 770 \text{ C}$$

$$\text{Ni} - T_C = 358 \text{ C}$$

$$\text{Co} - T_C = 1120 \text{ C}$$

Pierwotna krzywa magnesowania

Stan początkowy: $B(H=0)=0$.



I. $B \approx H$; $\mu = const.$

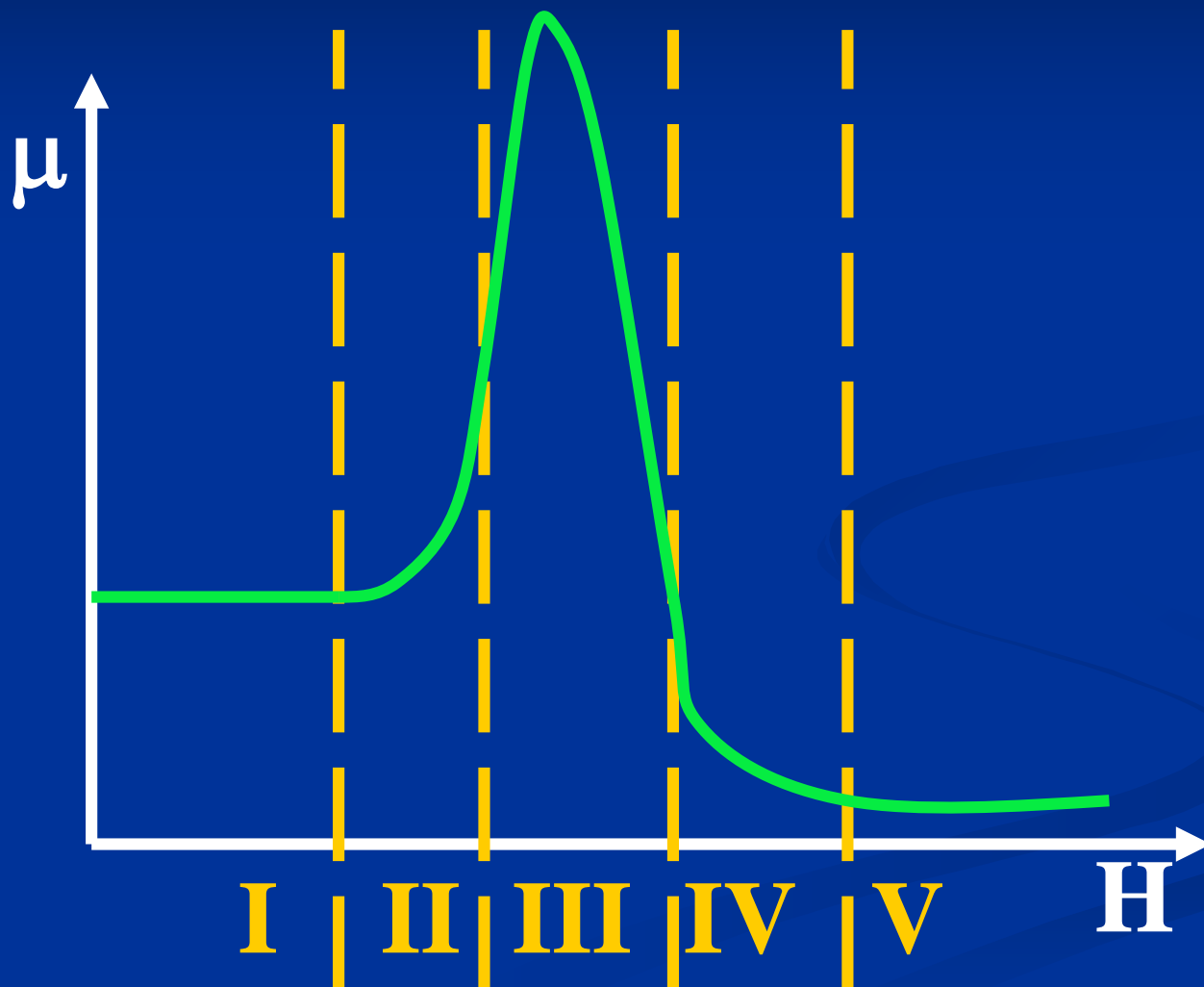
II. $B \approx H^2$; $\mu \neq const.$

III. $\mu = \mu_{max}$.

IV. nasycenie techniczne.

V. nasycenie fizyczne.

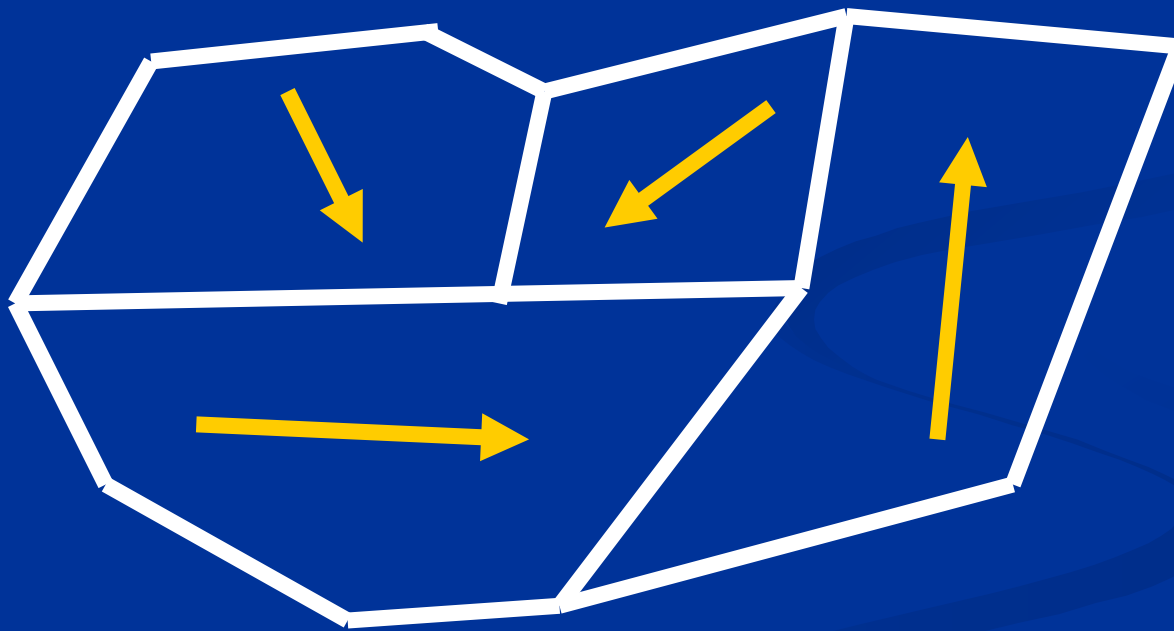
Przenikalność magnetyczna



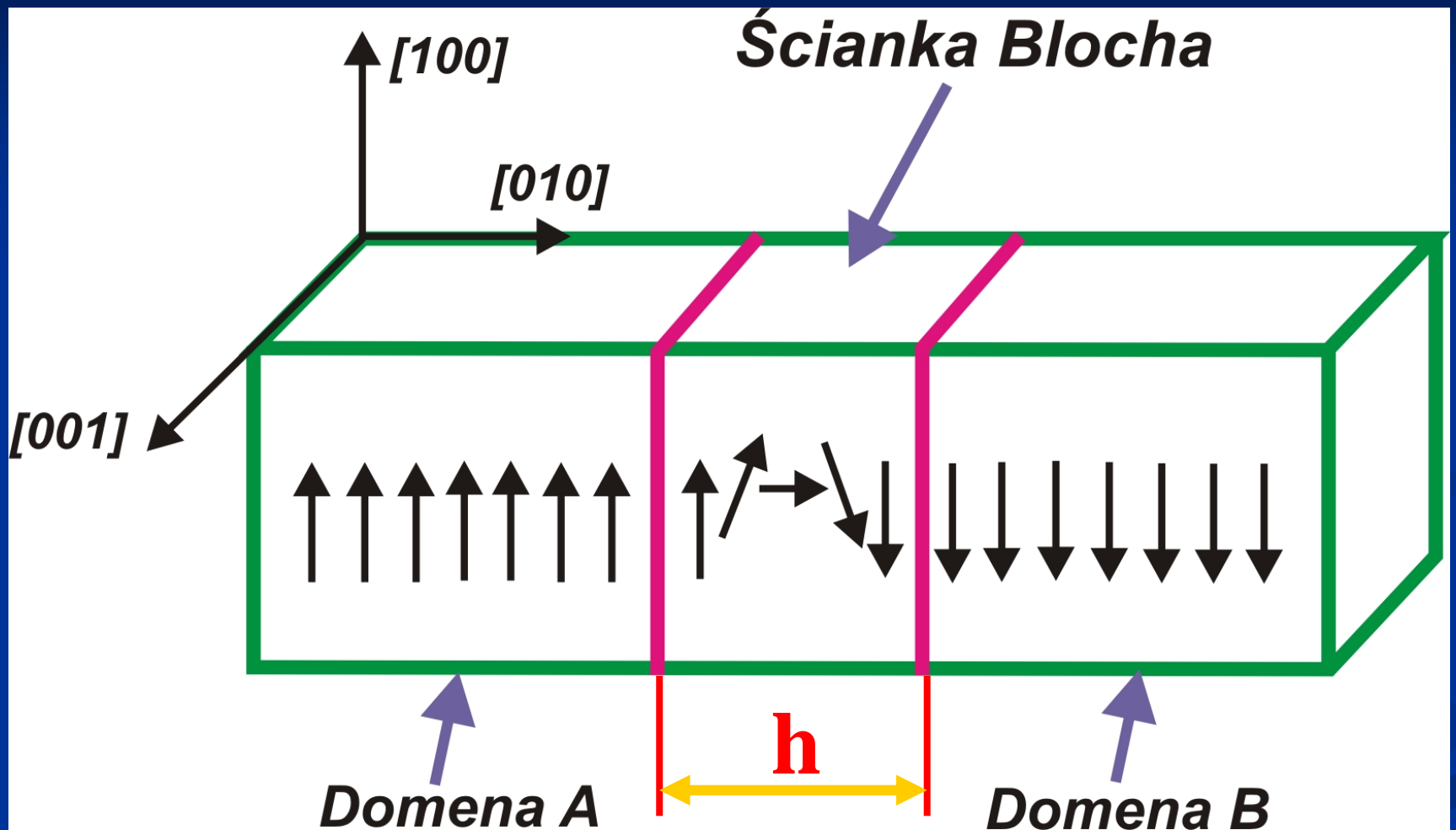
Materialy magnetyczne

Domeny

$R \cong 10 - 100 \mu m; h \cong 0,1 \mu m.$

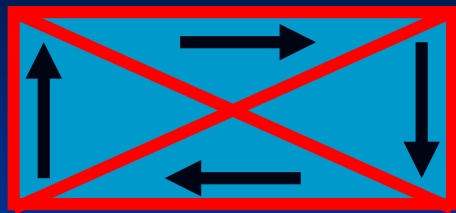


Materialy magnetyczne

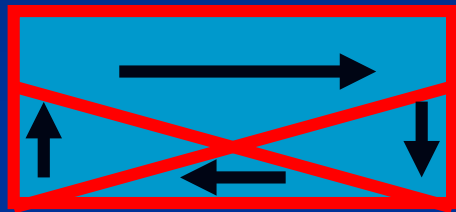


Materialy magnetyczne

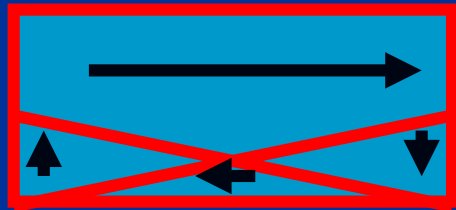
Ruch domen podczas namagnesowania



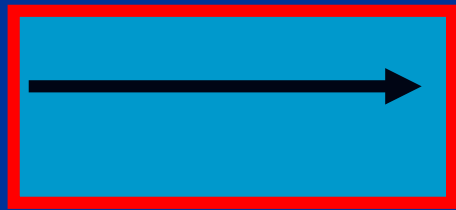
$H=0; J=0$



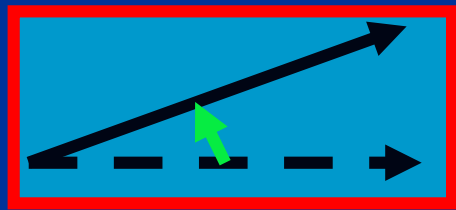
$H_1 > 0; J_1 > 0$
Obszar I



$H_2 > H_1; J_2 > J_1$
Obszar II



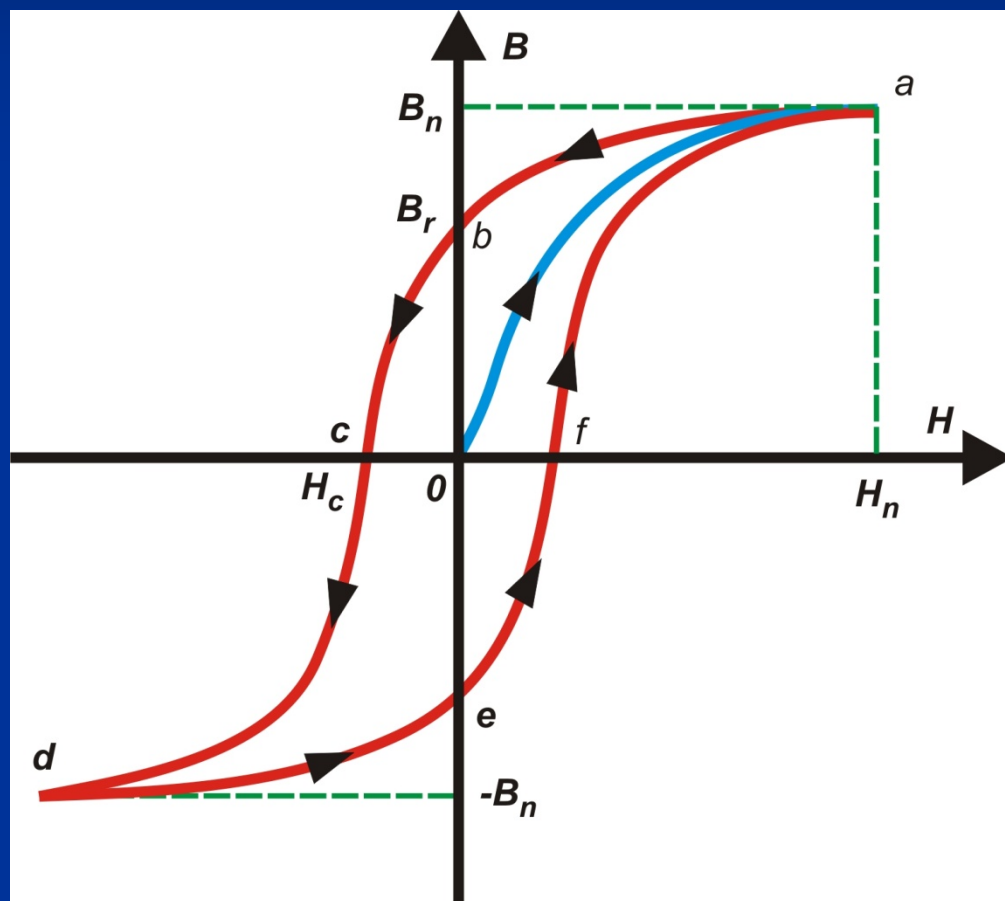
$H_3 > H_2; J_3 > J_2$
Obszar III



$H_4 > H_3; J_4 > J_3$
Obszar IV

Podstawowe właściwości materiałów magnetycznych

Pętla histerezy



- B_n – indukcja nasycenia
- B_r – indukcja szczątkowa
- H_n – natężenie nasycenia
- H_C – natężenie koercji
- $B_n * H_C / 2$ – gęstość energii magnetycznej
- T_C – temperatura Curie
- ρ - rezystywność

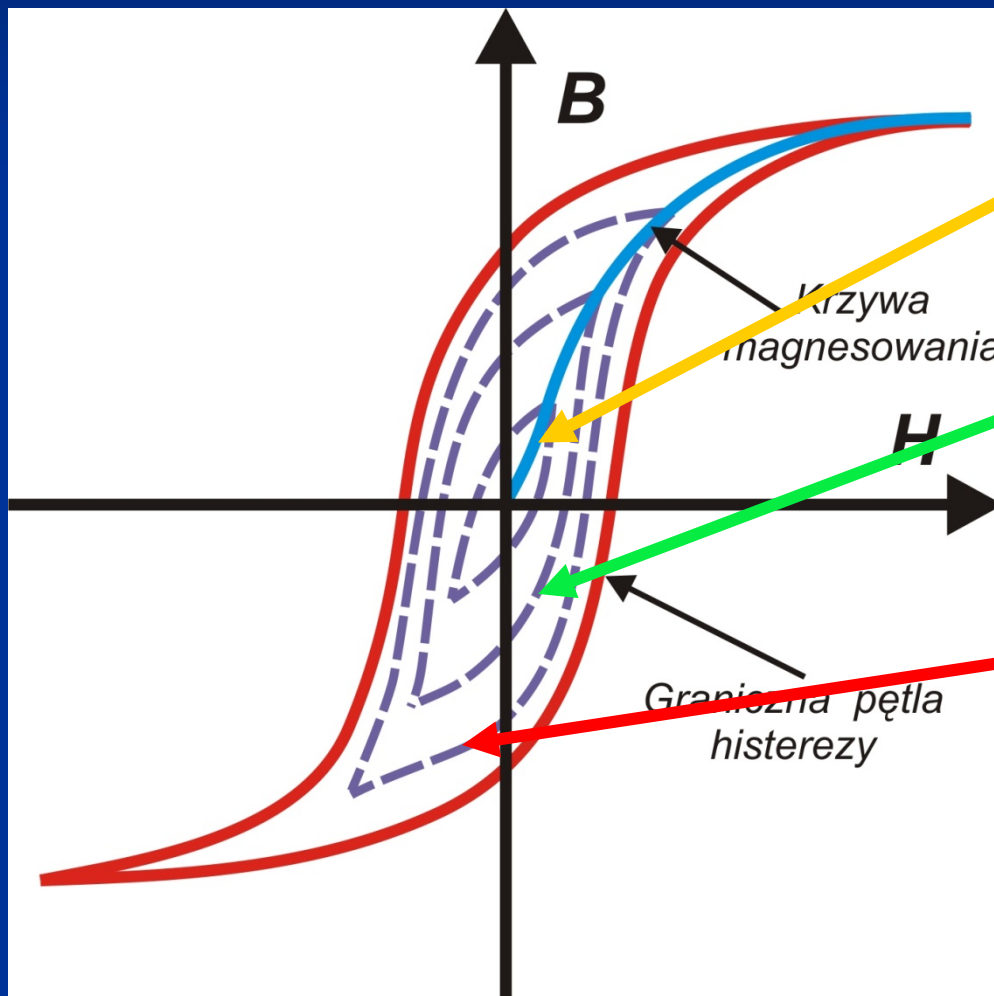
Materialy magnetyczne

Wpływ podstawowego składu chemicznego na właściwości materiałów magnetycznych

material	skład	B_n , T	T_c , °C
Fe	99,9% Fe	2,15	770
Ni	99,0% Ni	0,61	358
Co	99,0% Co	1,79	1120
Permalloy	79%Ni;16%Fe;4%Mo	0,80	400
Blacha krzemowa	97%Fe;3%Si	2,0	700
FeCo	50%Fe;50%Co	2,45	980
Ferryt	12%NiO;22%ZnO;66%Fe ₂ O ₃	0,32	150

Magnesowanie dla prądu przemiennego

$$H = H_{\max} \sin(\omega t)$$



Obszar I

$$B = B_{\max} * \sin(\omega t)$$

Obszar II

$$B = B_{\max} * \sin(\omega t - \phi)$$

Obszar III

$$B \neq B_{\max} * \sin(\omega t - \phi)$$

Materialy magnetyczne

Materialy magnetyczne na częstotliwość 50 Hz

Są to blachy magnetyczne krzemowe o składzie Fe + Si. Zawartość Si < 4,8%. Blachy krzemowe wytwarzane są walcowaniem na zimno lub na gorąco.

Straty w materiałach magnetycznych na częstotliwość 50 Hz

Straty na przemagnesowanie lub straty na histerezę

Powstają wskutek konieczności dwukrotnego przemagnesowania blachy w każdym okresie przebiegu prądu. Ponieważ gęstość energii magnetycznej namagnesowanej blachy wynosi:

$$B_n * H_c / 2$$

a częstotliwość f , to w jednostkę czasu jednostka masy blachy pochłania energię:

$$P_h = K * f * B_{max} * H_c \quad (\text{Wt/kg})$$

Współczynnik K jest funkcją grubości blachy d .

Materialy magnetyczne

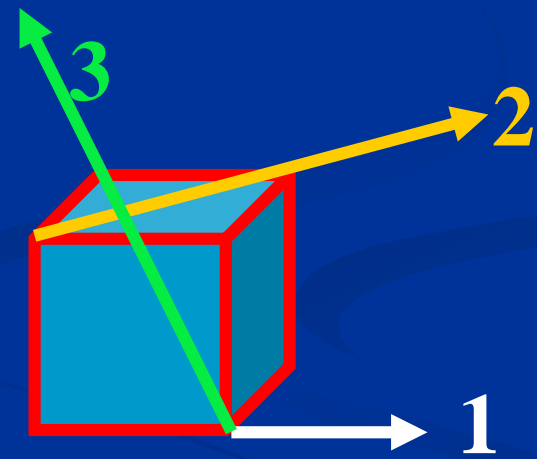
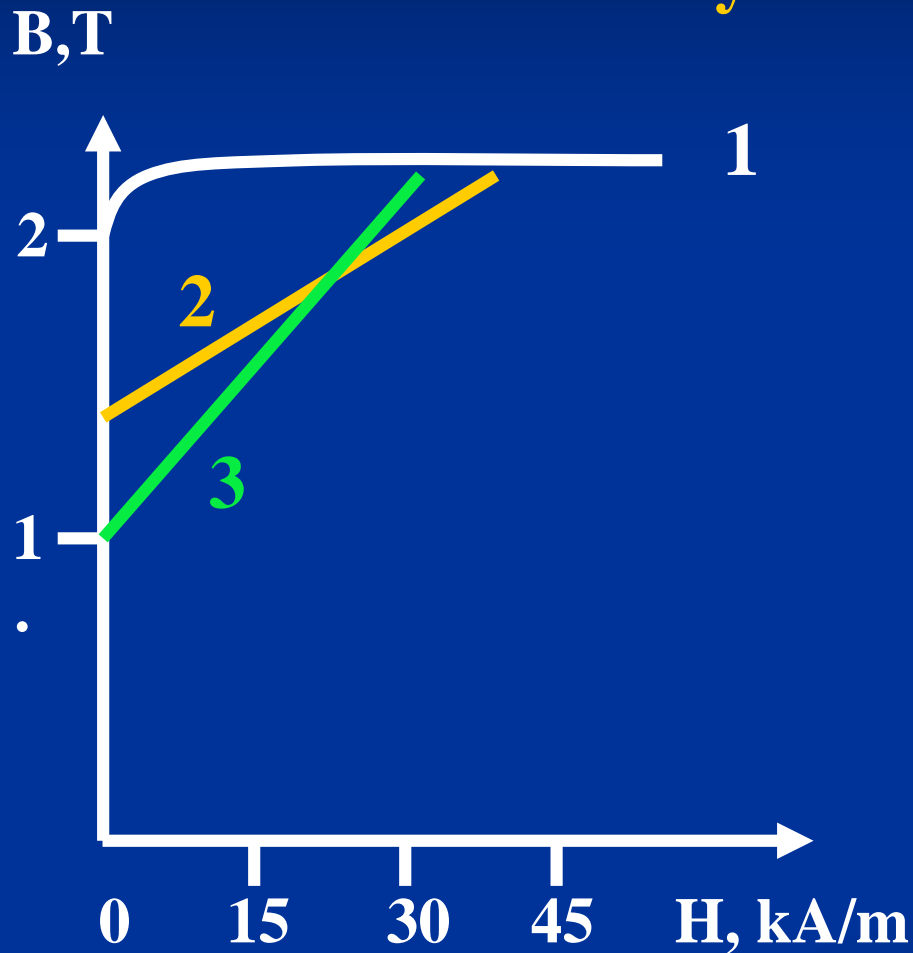
Ponieważ pole koercji H_c wzrasta wraz ze wzrostem indukcji maksymalnej B_{max} nieco wolniej, niż liniowo, w technice stosują często wzór na straty na histerezę w postaci:

$$P_h = \chi * f * B^{1,6} \quad (\text{Wt/kg})$$

gdzie χ jest parametrem określanym doświadczalnie dla danego materiału.

Materialy magnetyczne

Namagnesowanie w zależności od kierunku sieci krystalicznej Fe



Materialy magnetyczne

Kierunek 1 – kierunek namagnesowania lekkiego.

Kierunek 2 – kierunek namagnesowania średniego.

Kierunek 1 – kierunek namagnesowania trudnego.

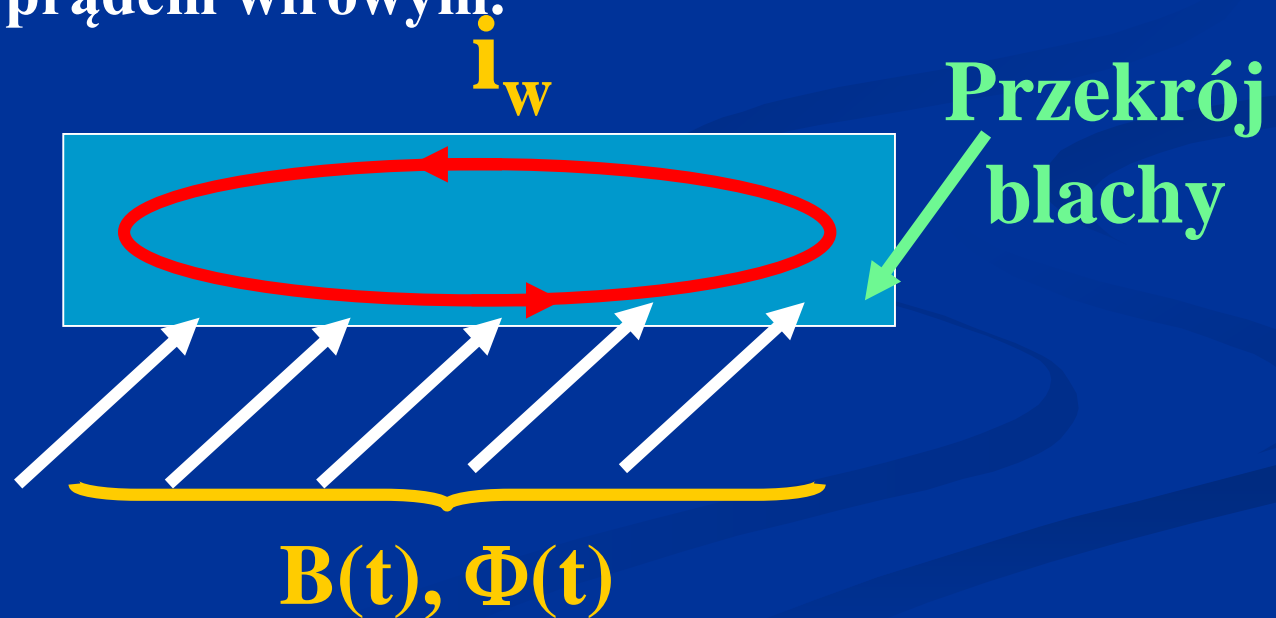
Zastosowanie blach, w których wektor indukcji magnetycznej jest zgodny z kierunkiem lekkiego namagnesowania pozwala w sposób istotny obniżyć pole koercji, a co za tym idzie i straty na histerezę.

W tym celu blachę po walcowaniu poddają wygrzewaniu w temperaturach od 900C do 1200C.

Materiały magnetyczne

Straty na prądy wirowe

Zgodnie z prawem indukcji Faradaya w każdym obwodzie przez który przepływa zmienny strumień pola magnetycznego powstaje siła elektromotoryczna. W obwodzie zamkniętym pod jej wpływem powstaje prąd elektryczny. Prąd powstający w blasze magnetycznej nazywają prądem wirowym.



Materiały magnetyczne

Wzór opisujący straty na prądy wirowe:

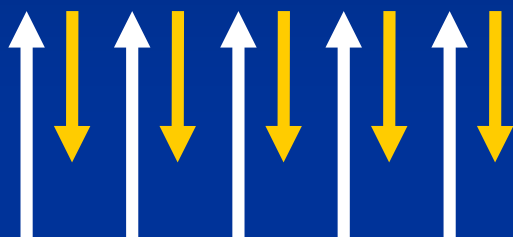
$$P_p = \frac{4B_{max}^2 f^2 d^2 k^2}{3D\rho} \times 10^{11} \text{ (Wt / kg)}$$

Gdzie: d – grubość blachy, D – gęstość masy, ρ – rezystywność blachy, k – współczynnik bliski jedności, zależny od kształtu krzywej magnesowania.

Materialy magnetyczne

Ferryty

Są to materiały magnetyczne o uporządkowaniu ferrimagnetycznym:



$$J > 0$$

w skład których wchodzi tlenki różnych metali, w tym tlenki metali ferromagnetycznych. Ogólny wzór chemiczny ferrytów:



Materialy magnetyczne

Podstawową zaletą ferrytów jest ich wysoka rezystywność, wynosząca od 10^{-3} Ohm*m do 10^8 Ohm*m, co w sposób zdecydowany obniża straty na prądy wirowe i rozszerza zakres częstotliwości roboczych nawet do 50 GHz.

Indukcja nasycenia $B_n > 0,3$ T;

Przenikalność magnetyczna μ od 400 do 4000.

Pole koercji H_C ok. 16 A/m.

Przykładowe składy chemiczne ferrytów:

MnO ZnO Fe₂O₃

NiO ZnO Fe₂O₃

Li₂O ZnO Fe₂O₃

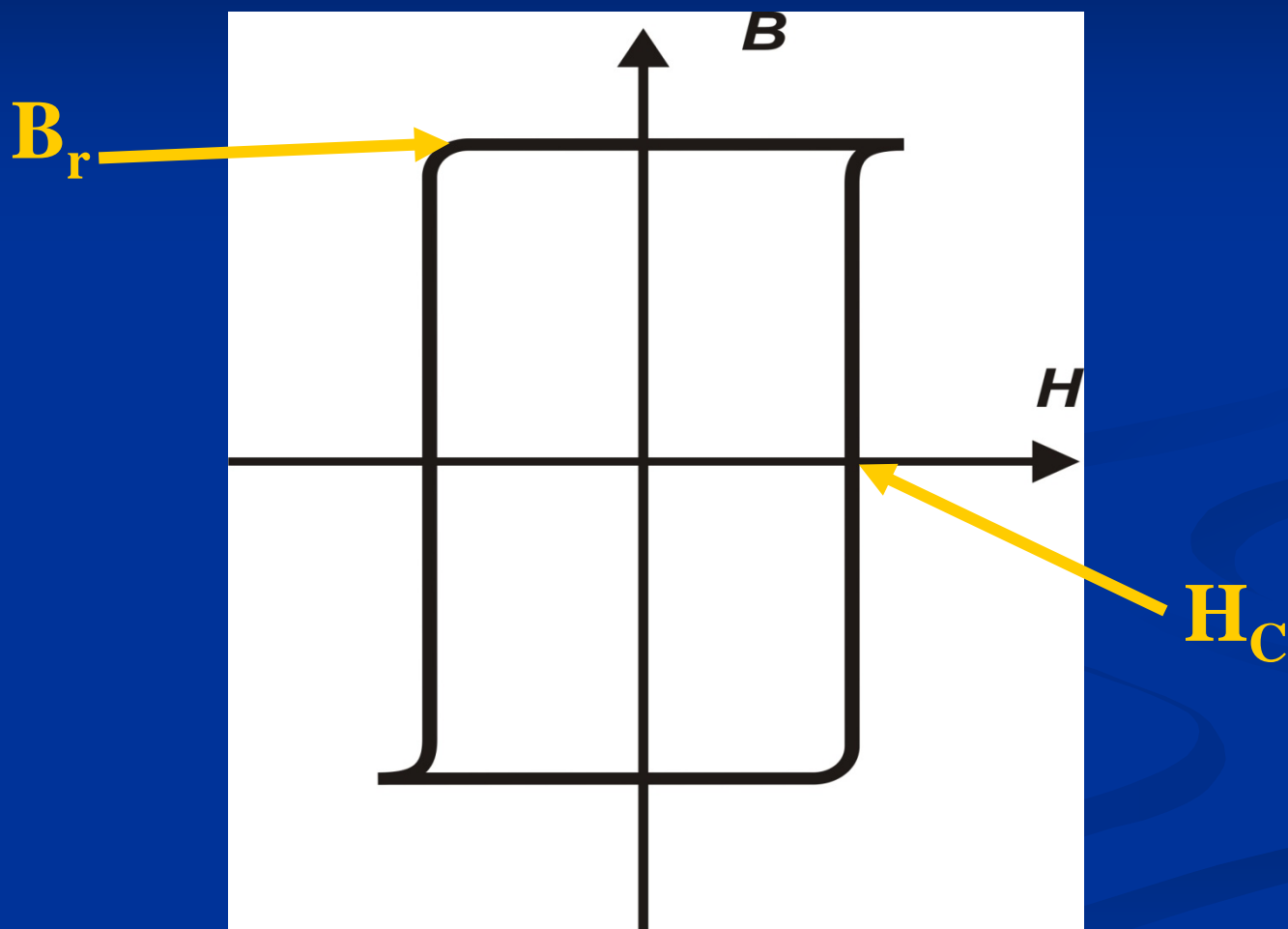
MgO Fe₂O₃

Wytwarzanie ferrytów

1. Proszki tlenków metali + spirytus poliwinilowy
2. Prasowanie
3. Wypalanie w atmosferze suchego tlenu w temperaturach od 1100 C do 1400 C
4. Szlifowanie
5. Polerowanie miejsc styczności elementów magnetowodu.

Materialy magnetyczne

Materialy z prostokątną pętlą histerezy



Materialy magnetyczne

Warunki prostokątności:

Indukcja szczątkowa $B_r > 0,85 B_n$

Natężenie pola przy którym osiągnana jest indukcja nasycenia $H_n > 1,8 H_C$

Czas przemagnesowania –czas przejścia ze stanu B_n do stanu $-B_n$:

$$\tau < 10^{-9} \text{ s}$$

Materialy, posiadające prostokątną pętlę histerezy – ferryty oraz cienkie warstwy metali ferromagnetycznych o grubości warstwy wiele mniejszej od wymiarów domeny. Powstaje przy tym jedna domena obejmująca całą objętość metalu.