

Podstawowe własności materiałów magnetycznych

materiały na obwody magnetyczne i magnesy trwałe:

$\left. \begin{array}{l} \textit{ferromagnetyki} \\ \textit{ferrimagnetyki} \end{array} \right\}$ materiały magnetyczne

indukcja magnetyczna B :

$$B = \mu H = \mu_r \mu_0 H = (1 + \mu_r - 1) \mu_0 H = \mu_0 H + (\mu_r - 1) \mu_0 H$$

polaryzacja M materiału magnetycznego:

$$B = \mu_0 H + M$$

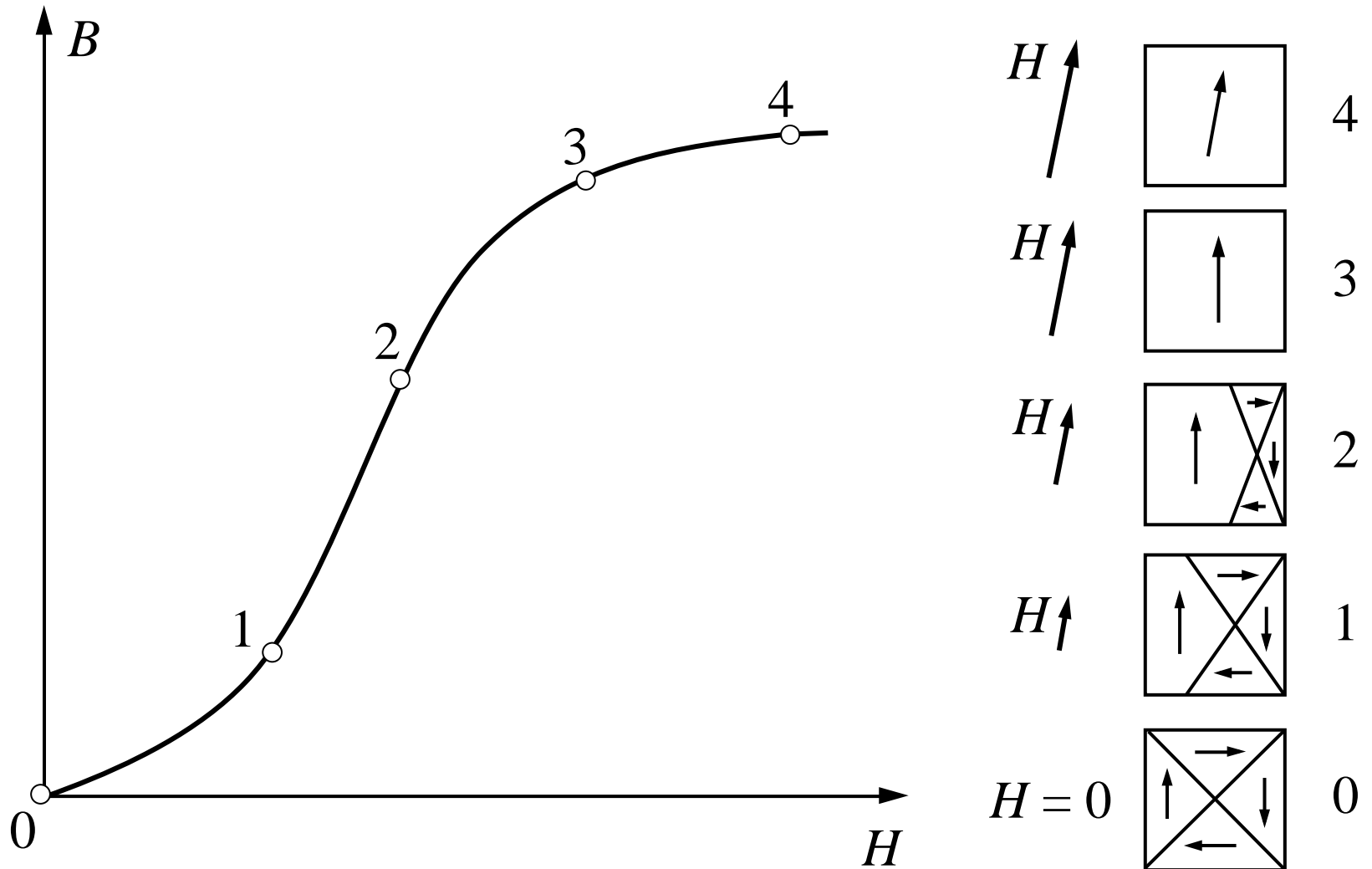
$$M = (\mu_r - 1) \mu_0 H \quad (\mu_r - 1) = \eta_m$$

$$M = \eta_m \mu_0 H$$

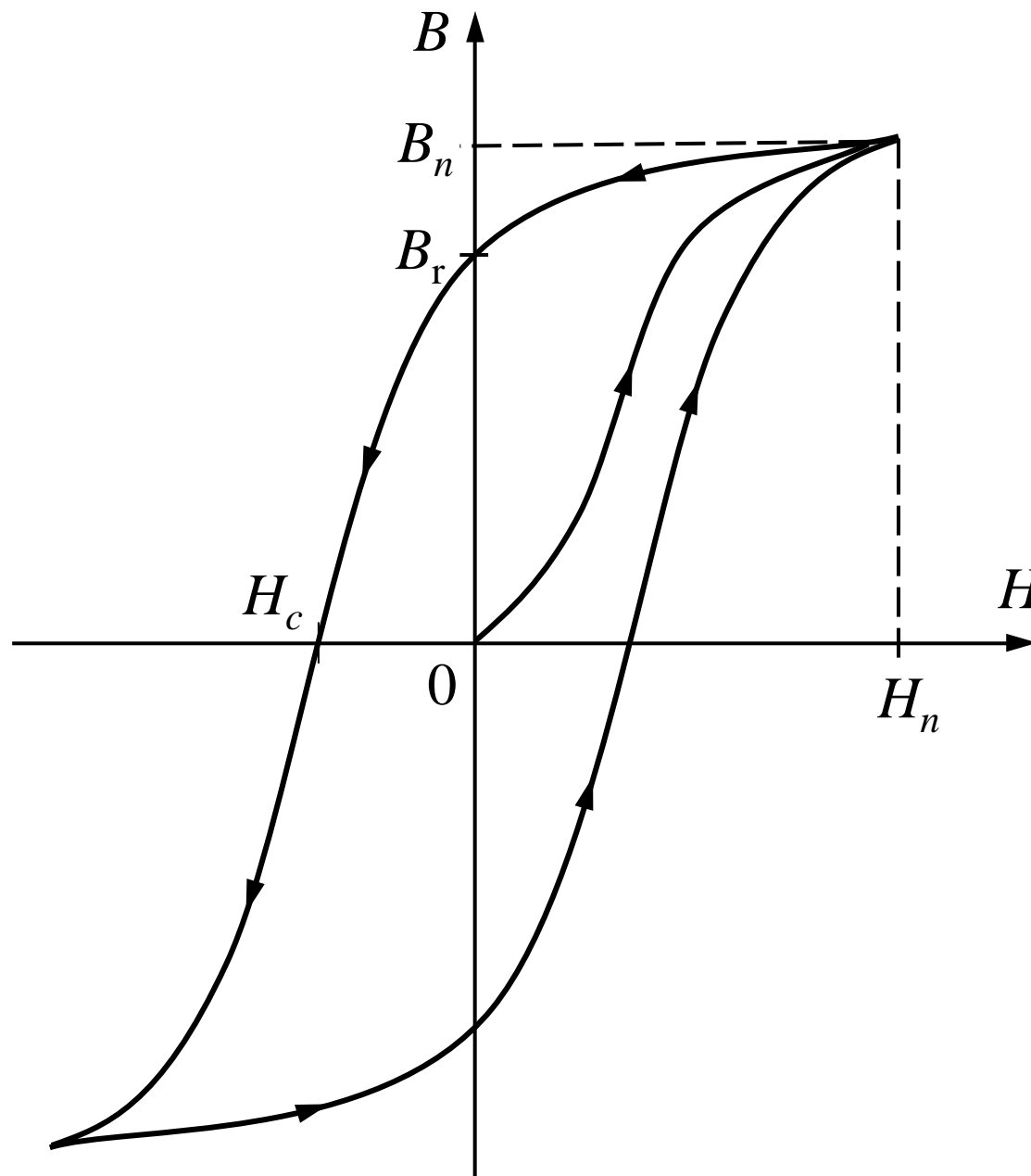
η_m - podatność magnetyczna materiału

$\eta_m = 10^2 \dots 10^6$ dla materiałów magnetycznych

poza obszarem nasycenia: $B \cong M$



Zależność indukcji magnetycznej B od rosnącego natężenia pola magnetycznego H . Ilustracja procesu pierwotnego magnesowania próbki materiału magnetycznego



Graniczna pętla histerezy magnetycznej

B_n - graniczna wartość indukcji nasycenia

H_n - natężenie pola magnetycznego odpowiadające B_n

B_r - indukcja remanencji, pozostałość magnetyczna

H_c - natężenie koercji, natężenie powściągające

Przenikalność magnetyczna

$B = f(H)$ - nieliniowość, histereza

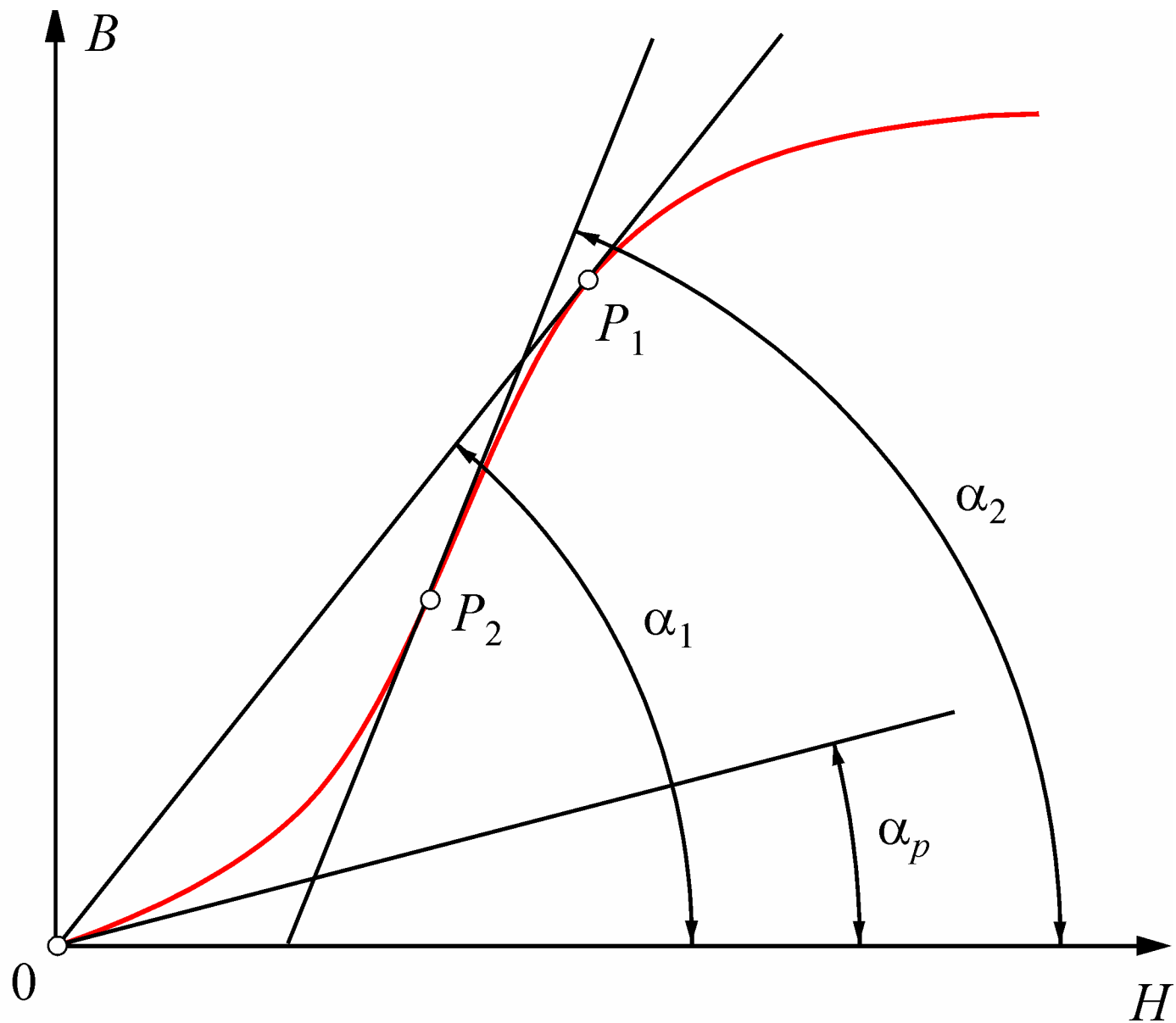
μ i μ_r - nie są stałe i jednoznaczne

przenikalność magnetyczna:

- statyczna (normalna)
- dynamiczna (różniczkowa)

charakterystyczne wartości przenikalności:

- początkowa
- maksymalna



Charakterystyczne wartości przenikalności magnetycznej statycznej i dynamicznej

przenikalność początkowa statyczna i dynamiczna:

$$\mu_{p(stat)} = \mu_{p(dyn)} = \lim_{H \rightarrow 0} \frac{B}{H} = \operatorname{tg} \alpha_p$$

przenikalność maksymalna statyczna:

$$\mu_{m(stat)} = \left(\frac{B}{H} \right)_{\max} = \operatorname{tg} \alpha_1$$

przenikalność maksymalna dynamiczna:

$$\mu_{m(dyn)} = \left(\frac{dB}{dH} \right)_{\max} = \operatorname{tg} \alpha_2$$

Stratność magnetyczna

część energii pola magnetycznego zmienia się na ciepło

- straty na histerezę
zmiana orientacji domen magnetycznych
- straty na prądy wirowe
indukowanie prądów w materiale magnetycznym

jednostka stratności magnetycznej: $1 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$

stratność całkowita ferromagnetyka lub ferrimagnetyka:

$$\Delta p_{Fe} = \Delta p_h + \Delta p_w.$$

stratność histerezowa

proporcjonalna do pola powierzchni ograniczonej pętlą histerezy

$$\Delta p_h = k_h \frac{f}{f_{50}} \left(\frac{B_m}{B_1} \right)^2$$

k_h - stała materiałowa, stratność histerezowa w $\text{W} \cdot \text{kg}^{-1}$
przy częstotliwości pola magnetycznego 50 Hz (f_{50})
i amplitudzie indukcji 1 T (B_1)

f - częstotliwość zmian pola magnetycznego

B_m - amplituda indukcji magnetycznej

stratność wiropądowa

ciepło wydzielone w czasie przepływu prądów wirowych

$$\Delta p_w = k_w \left(\frac{f}{f_{50}} \frac{B_m}{B_1} \frac{\delta}{\delta_{0,5}} \right)^2$$

k_w - stała materiałowa, stratność wiropądowa w $\text{W} \cdot \text{kg}^{-1}$ przy częstotliwości pola magnetycznego 50 Hz (f_{50}), amplitudzie indukcji 1 T (B_1) i grubości blach rdzenia równej 0,5 mm ($\delta_{0,5}$)

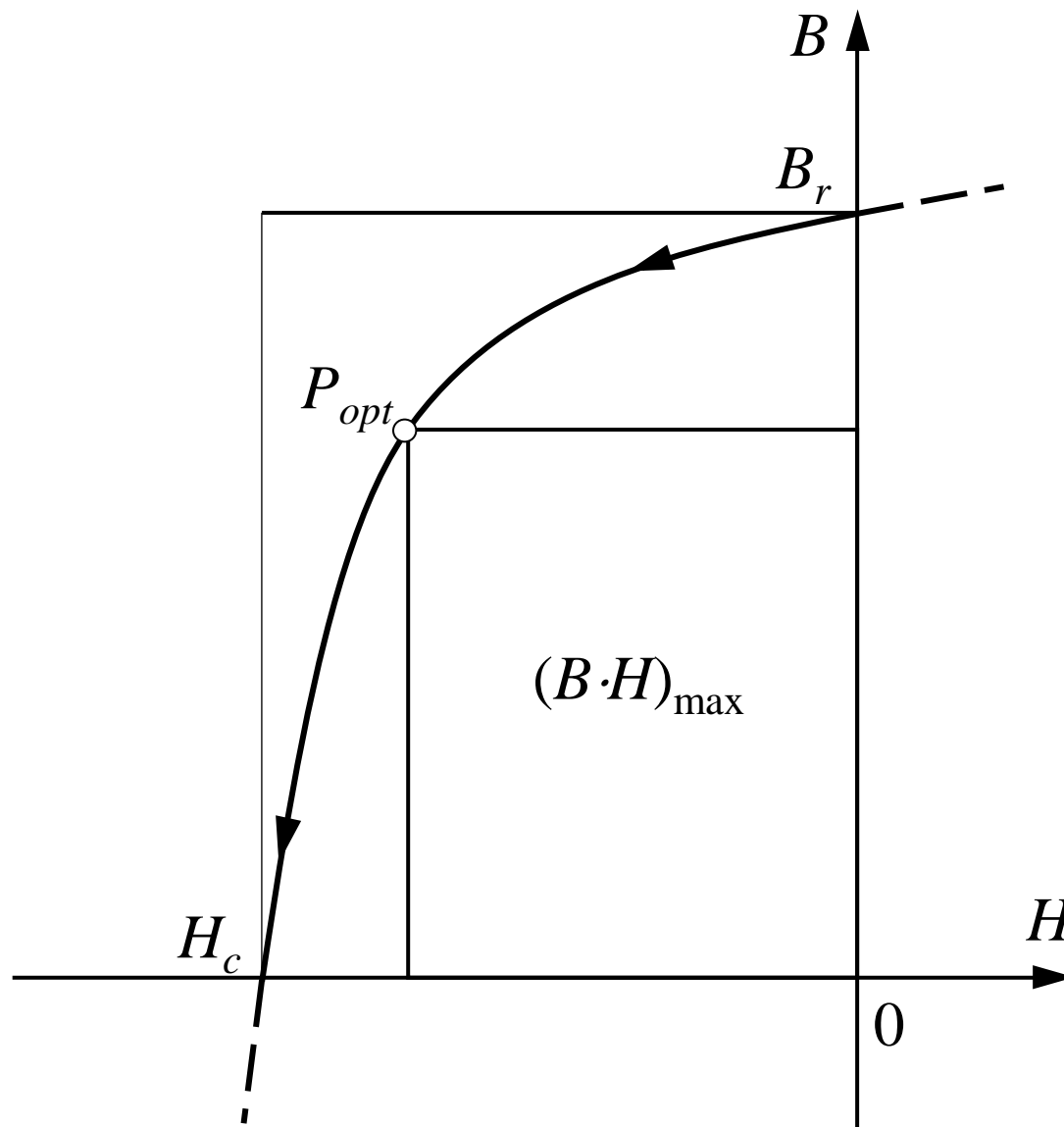
f - częstotliwość zmian pola magnetycznego

B_m - amplituda indukcji magnetycznej

δ - grubości blach magnetycznych rdzenia

Krzywa odmagnesowania

własność materiałów magnetycznie twardych



Krzywa odmagnesowania materiału magnetycznie twardego

$(B \cdot H)_{max}$ - największa gęstość energii pola magnetycznego

P_{opt} - punkt, któremu odpowiada optymalna wartość indukcji magnetycznej

współczynnik kształtu krzywej od magnesowania:

$$k_o = \frac{(B \cdot H)_{max}}{B_r \cdot H_c}$$

Materiały magnetycznie miękkie

powinny charakteryzować się możliwie dużymi wartościami:

- indukcji nasycenia B_n
- przenikalności magnetycznej statycznej względnej początkowej μ_{rp} i maksymalnej μ_{rm}
- rezystywności (praca przy dużej częstotliwości)

oraz możliwie małymi wartościami:

- natężenia powściągającego H_c
- stratności Δp_{Fe}

ponadto powinny charakteryzować się:

- stabilnością wymienionych wyżej własności w czasie
- łatwością obróbki mechanicznej i cieplnej
- niską ceną

materiały magnetycznie miękkie:

- magnesują się łatwo i nietrwale
- są najczęściej stosowane na obwody magnetyczne maszyn elektrycznych, transformatorów, dławików, elektromagnesów
- strumień magnetyczny wzbudzony przez prąd w uzwojeniu

$$\Phi = B \cdot S$$

B – indukcja magnetyczna w rdzeniu magnetycznym

S – pole przekroju poprzecznego rdzenia

- po wyłączeniu prądu w rdzeniu przepływa niewielki strumień związany z pozostałością magnetyczną B_r
- strumień resztkowy jest niepożądany (możliwie małe H_c i B_r)

Materiały magnetycznie miękkie metaliczne

Żelazo

- największy udział w materiałach magnetycznie miękkich
- tworzy stopy z metalami: Ni, Co, Si
- trudne do usunięcia zanieczyszczenia: C, O, N, S, P
- nawet śladowe ilości zanieczyszczeń pogarszają własności materiałów magnetycznie miękkich
- chemicznie czyste Fe doskonały materiał magnetycznie miękki
- μ_{rm} dochodzi do 1,5 miliona, a H_c wynosi zaledwie $1,2 \text{ A}\cdot\text{m}^{-1}$
- Fe o najwyższej czystości technicznej zawiera: 0,005 % węgla i 0,001 % tlenu

Żelazo karbonylkowe

- stosowane do wytwarzania rdzeni proszkowych
- termiczny rozkład pięciokarbonylku żelaza $\text{Fe}(\text{CO})_5$
- zawiera po 0,005 % węgla i tlenu
- $\mu_{rm} = 21500$, $H_c \cong 6,4 \text{ A}\cdot\text{m}^{-1}$

Żelazo armco

- magnesowane prądem stałym rdzenie mierników i przekaźników
- uzyskiwane w specjalnych procesach wytapiania
- zawiera aż 0,025 % węgla i 0,035 % tlenu
- $\mu_{rm} =$ zaledwie 5000, $H_c =$ aż $80 \text{ A}\cdot\text{m}^{-1}$

inne własności żelaza:

- $\mu_{rp} = 200$ do 20000 (zależy od zawartości zanieczyszczeń)
- $B_n = 2,15$ do $2,17$ T (dla żelaza armco $B_n = 2,0$ T)
- $\rho_{Fe} \cong 0,1 \mu\Omega\text{m}$ ($\rho_{Cu} \cong 0,017 \mu\Omega\text{m}$), zbyt mała dla ograniczenia prądów wirowych

Stal krzemowa

- na obwody magnetyczne transformatorów i maszyn wirujących
- obok Fe zawiera: 1...4 % Si, do 0,05 % C, śladowe ilości innych pierwiastków
- Si zmienia korzystnie własności magnetyczne:
 - zwiększa wartości μ_{rp} i μ_{rm}
 - zmniejsza wartość H_c
 - zwiększa rezystywność ρ (kilkakrotnie)
 - polepsza stabilność własności magnetycznych w czasie

- Si zmienia niekorzystnie własności magnetyczne:
 - zmniejsza B_n (z 2,15 T do 1,95 T przy 4 % Si),
 - zwiększa twardość i kruchość materiału

stal krzemowa na rdzenie magnetyczne

- blachy o grubości dziesiątych części milimetra (konieczność ograniczenia prądów wirowych przy prądach zmiennych)
- rdzeń magnetyczny - pakiet blach izolowanych od siebie
- pierwotnie stosowano blachy walcowane na gorąco (wytwarzane podobnie, jak blachy konstrukcyjne)
- obecnie stosuje się blachy walcowane na zimno, które mają:
 - mniejszą stratność
 - lepszą magnesowalność (większe wartości indukcji B przy określonym prądzie magnesującym)
 - większą gładkość i mniejsze odchyłki (współczynnik wypełnienia rdzenia - ponad 0,97)

izolacja blach pakietu rdzenia:

- cienka warstwa izolacji ceramicznej odpornej na wysokie temperatury (do 800 °C)
- eliminacja prądów wirowych poprzecznie do blach
- ograniczenie prądów wirowych równoległych do blach przez małą ich grubość

blachy ze stali krzemowej walcowane na zimno *nieorientowane*

- własności izotropowe
- stosowane w maszynach elektrycznych wirujących
- na małe rdzenie - blachy o mniejszej zawartości Si

blachy ze stali krzemowej walcowane na zimno *orientowane*:

- wielokrotne walcowanie na zimno w tym samym kierunku i wyżarzanie odprężające
 - kierunki łatwego magnesowania w większości zgodne z kierunkiem walcowania
 - blacha ma silne własności anizotropowe
 - w kierunku walcowania mniejsza jest stratność, nawet 4-krotnie, a magnesowalność większa o 35 %
 - droższe blachy orientowane (transformatory energetyczne)
- $$\mu_{rm} = 60000, H_c = 10 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}, \Delta p_{Fe} = 0,7 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$$

blachy ze stali bezkrzemowej

- walcowane na zimno nieorientowane
- do 0,3 % C i niewielkie ilości Mn, Mo, V i S
- łatwa magnesowalność, dobra wykrawalność, wysoki współczynnik wypełnienia i relatywnie niska cena

Stopy żelazo-niklowe i żelazo-kobaltowe

Fe + 30...80 % Ni

- taśmy 0,05...0,35 mm na rdzenie pracujące przy wyższych częstotliwościach
- w porównaniu do stali krzemowej: łatwiejsza magnesowalność, większa przenikalność magnetyczna, mniejsza B_n
- przy 78 % Ni wąska pętla histerezy i bardzo duże μ_{rp} i μ_{rm}
- bardzo drogie - rdzenie dokładnych przekładników i mierników

Fe + 30...40 % Co

- duża wartość B_n (do 2,36 T), większe Δp_{Fe} i mniejsze μ_{rp} i μ_{rm}
- kruche i przez to trudne do obróbki mechanicznej
- stosowane na specjalne rdzenie w przyrządach elektrycznych lotniczych i kosmicznych

stop amorficzny

- skład: Fe, Co i Ni z dodatkiem B, Si i C
- ciekły stop schładza się z prędkością (rzędu 10^6 K/s) większą niż prędkość krystalizacji
- w porównaniu do blach krzemowych orientowanych ma około 3-krotnie mniejszą Δp_{Fe} i o około 25 % mniejszą B_n