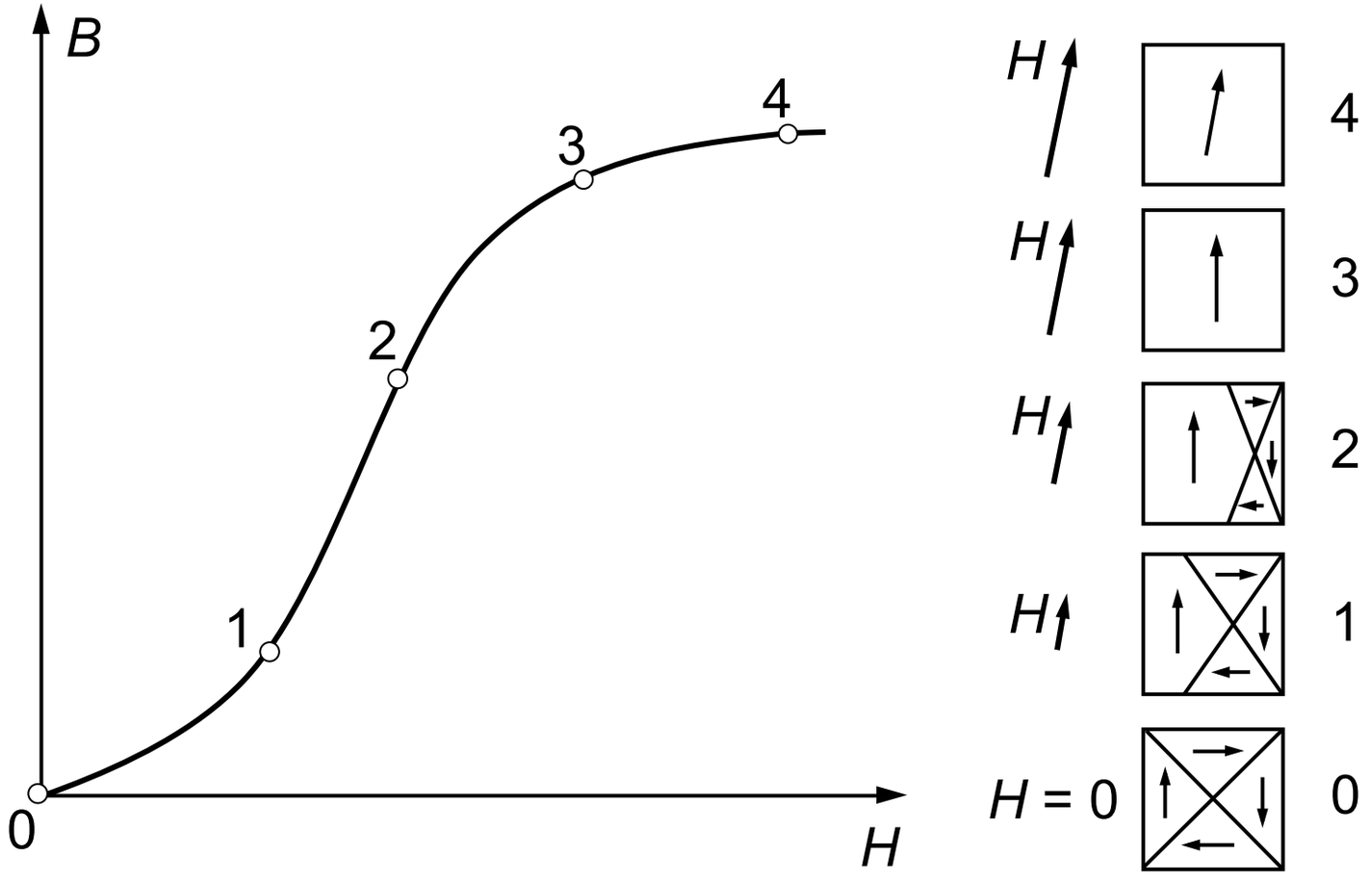
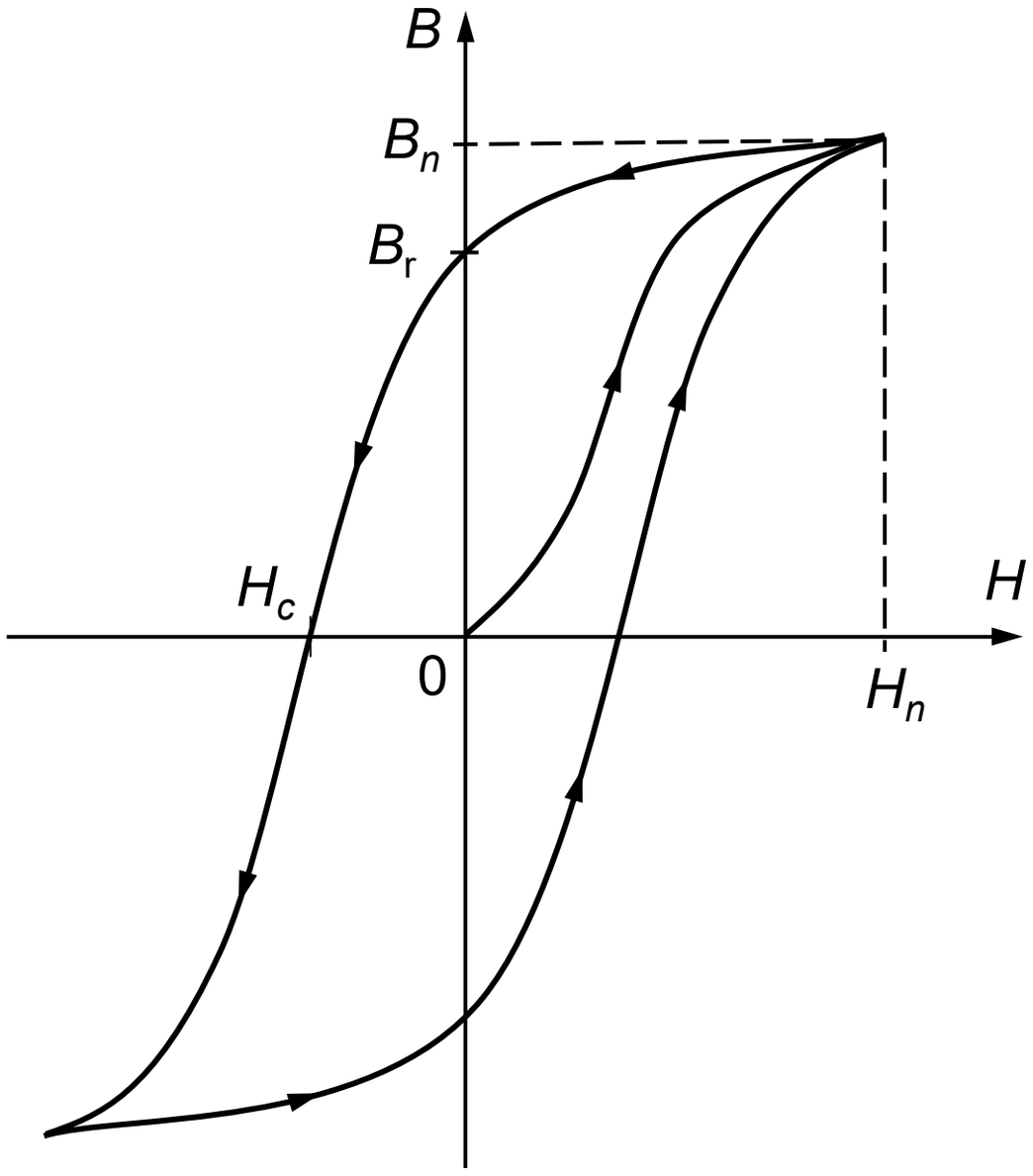
Podstawowe własności materiałów magnetycznych

Materiały na obwody magnetyczne i magnesy trwałe:

ferromagnetyki } materiały magnetyczne
ferrimagnetyki }



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.

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:

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

gdzie η_m - podatność magnetyczna materiału.

Dla materiałów magnetycznych: $\eta_m = 10^2 ... 10^6$.

Poza obszarem nasycenia: $B \cong M$

Przenikalność magnetyczna

$B = f(H)$ - nieliniowość, histereza,

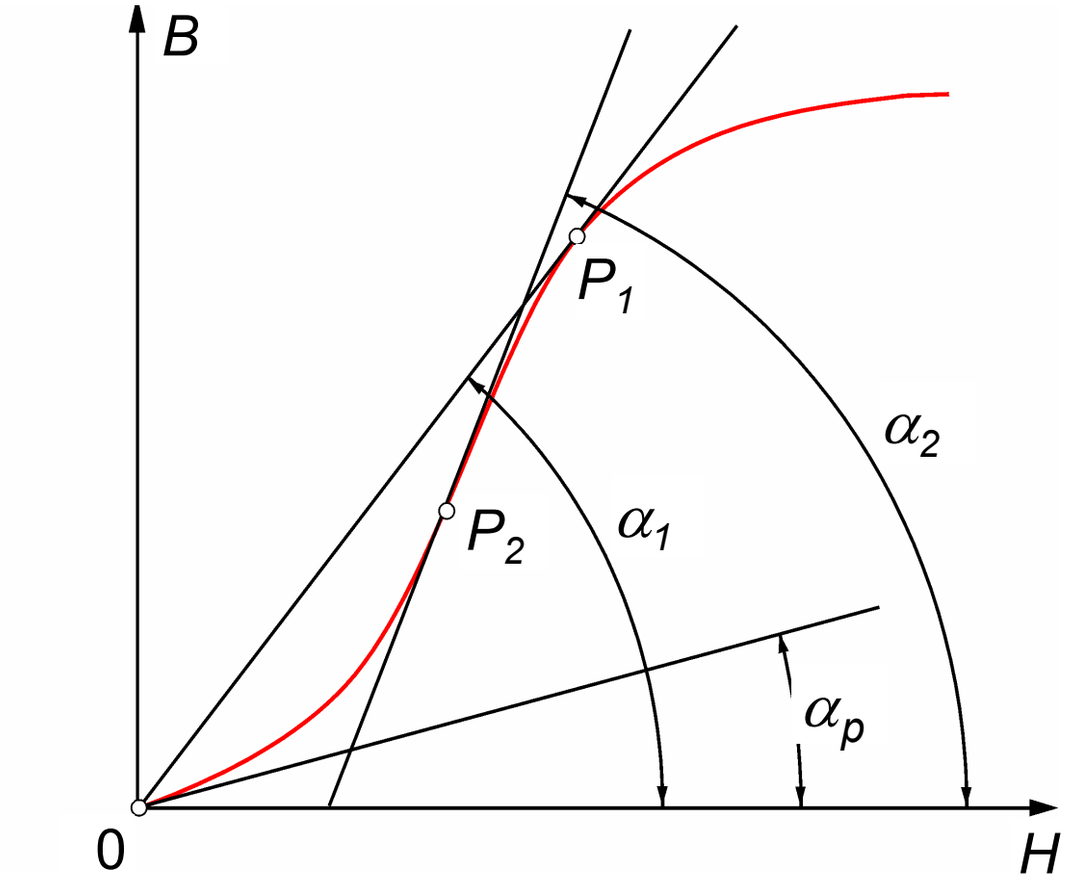
μ i μ_r - nie są stałe i jednoznaczne.

Przenikalność magnetyczna:

- statyczna (normalna).
- dynamiczna (różniczkowa).

Charakterystyczne wartości przenikalności:

- początkowa,
- maksymalna.



Przenikalność początkowa statyczna i dynamiczna:

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

Przenikalność maksymalna statyczna:

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

Przenikalność maksymalna dynamiczna:

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

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 $W \cdot kg^{-1}$.

Stratność całkowita ferromagnetyka lub ferrimagnetyka:

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

Stratność histerezowa jest proporcjonalna do pola powierzchni ograniczonej pętlą histerezy:

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

gdzie:

k_h - stała materiałowa, stratność histerezowa w $W \cdot kg^{-1}$ 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 wiroprądowa jest związana z ciepłem wydzielonym w czasie przepływu prądów wirowych:

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

gdzie:

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

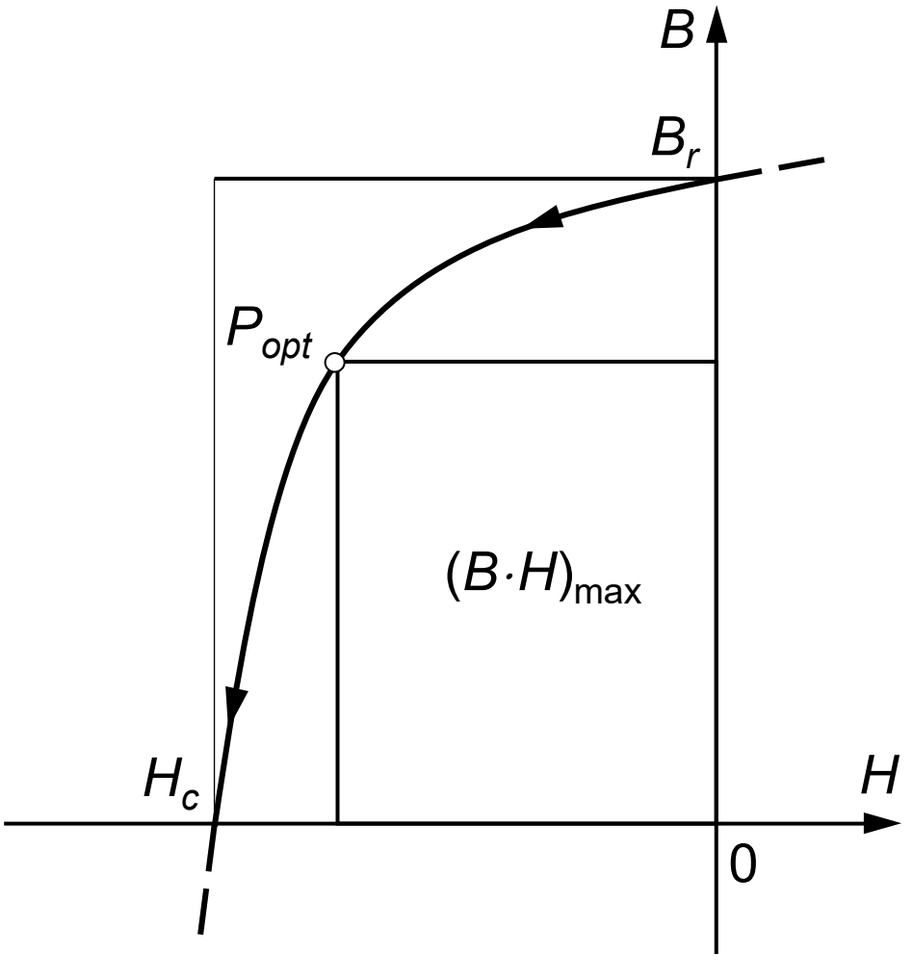
f - częstotliwość zmian pola magnetycznego,

B_m - amplituda indukcji magnetycznej,

δ - grubości blach magnetycznych rdzenia.

Krzywa odmagnesowania

(własność materiałów magnetycznie twardych)



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

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

Krzywa odmagnesowania materiału magnetycznie twardego

Współczynnik kształtu krzywej odmagnesowania:

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

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}.

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:

$$\Phi = B \cdot S$$

gdzie:

B - indukcja magnetyczna w rdzeniu magnetycznym,

S - pole przekroju poprzecznego rdzenia.

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 to doskonały materiał magnetycznie miękki,
- μ_{rm} dochodzi do 1,5 miliona, a H_c wynosi zaledwie 1,2 $A \cdot m^{-1}$,
- Fe o najwyższej czystości technicznej zawiera: 0,005 % węgla i 0,001 % tlenu.

Żelazo karbonylkowe

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

Żelazo armco

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

Inne własności żelaza:

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

Stal krzemowa

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

- krzem 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.

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),
- $\mu_{rm} = 60000$, $H_c = 10\ \mathrm{A \cdot m^{-1}}$, $\Delta p_{Fe} = 0{,}7\ \mathrm{W \cdot kg^{-1}}$.

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 urządzeń w.cz.,
- w porównaniu do stali krzemowej: większa przenikalność magnetyczna, mniejsza B_n,
- przy 78 % Ni wąska pętla histerezy i bardzo duże μ_{rp} i μ_{rm},
- bardzo drogie - rdzenie 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.