

## WŁASNOŚCI MAGNETYCZNE MATERIAŁÓW

Klasyfikacji materiałów pod względem magnetycznym (ich właściwości magnetycznych) można dokonać poprzez określenie, w jaki sposób reagują one na zewnętrzne pole magnetyczne, czyli jakie jest *namagnesowanie (magnetyzacja, moment magnetyczny)*.

Namagnesowanie  $M$  opisane jest następującym równaniem:

$$M = \chi H$$

gdzie:

$\chi$  – podatność magnetyczna,

$M$  – namagnesowanie,

$H$  – natężenie zewnętrznego pola magnetycznego.

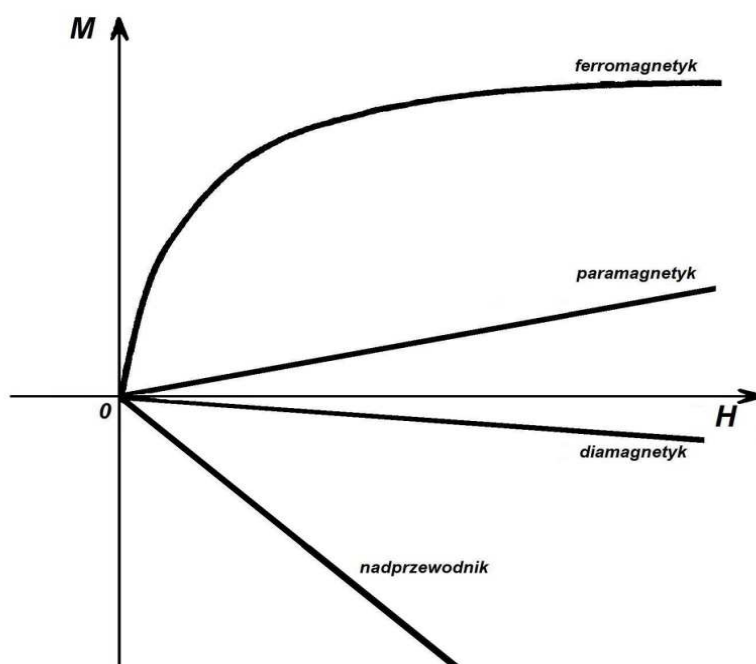
*Podatność magnetyczna* określa wielkość namagnesowania jako funkcję natężenia pola magnetycznego:

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

Ze względu na właściwości magnetyczne substancji można je ogólnie podzielić na trzy rodzaje: *diamagnetyki, paramagnetyki i ferromagnetyki*. Kryterium podziału ciał na te grupy może być podatność magnetyczną, mówiąca nam jak dany materiał zachowuje się w zewnętrznym polu magnetycznym, stąd też jeżeli:

- $\chi < 0$  – substancja jest diamagnetykiem,
- $\chi > 0$  – substancja jest paramagnetykiem,
- $\chi \gg 0$  – substancja jest ferromagnetykiem,
- $\chi = -1$  – substancja jest nadprzewodnikiem, czyli idealnym diamagnetykiem ( $B=0$ ).

Schematyczny wykresie zależności namagnesowania materiału od przyłożonego zewnętrznego pola magnetycznego został przedstawiony na rysunku poniżej.



## 2.1 Diamagnetyki

Diamagnetyki to substancje wykazujące zjawisko diamagnetyzmu. Diamagnetyzm cechuje wszystkie materiały, jednak nie zawsze zjawisko to można zaobserwować, gdyż często jest ono "maskowane" przez silniejsze efekty takie jak np. paramagnetyzm lub ferromagnetyzm. Idealny diamagnetyzm wykazują **nadprzewodniki**, których wnętrze jest całkowicie izolowane od zewnętrznego pola magnetycznego (**zjawisko Meissnera**).

Podatność magnetyczna diamagnetyków jest liczbą ujemną, rzędu  $10^{-5}$  i na ogół nie zależy od temperatury. Ujemny znak podatności oznacza, iż indukowany polem moment magnetyczny skierowany jest przeciwnie w stosunku do tego pola, a więc wektory  $H$  i  $M$  są antyrównoległe ( $\chi < 0$ ). O diamagnetykach mówimy, gdy atomy lub cząsteczki stanowiące daną substancję mają wypadkowe momenty magnetyczne równe zero. Do typowych diamagnetyków, których podatność nie zależy od temperatury, tzw. **diamagnetyków klasycznych** należą: złoto, srebro, rtęć, miedź, cynk, wiele związków organicznych oraz wszystkie gazy obojętne. Diamagnetyki, których wartości podatności różnią się od klasycznych dziesięciokrotnie, a w nielicznych przypadkach nawet stukrotnie (np. bizmut), a ponadto ich podatność znacznie zmienia się wraz ze zmianą temperatury, nazywamy **diamagnetykami anomalnymi**. Takimi diamagnetykami są: gal, antymon, bizmut.

Właściwości magnetyczne substancji wynikają z ich budowy wewnętrznej, a dokładniej z faktu, że elektrony krążące wokół jąder atomowych mają orbitalny i spinowy moment magnetyczny. Zgodnie z regułą Lentza zmiana momentu magnetycznego musi być taka, aby przeciwdziałać przyczynie go wywołującej, a więc wektor momentu magnetycznego będzie skierowany przeciwnie do kierunku zewnętrznego pola magnetycznego. Temu oddziaływaniu będą podlegać wszystkie elektrony wykonujące ruch orbitalny w każdym materiale ale efekty, spowodowane tym oddziaływaniem, mogą być obserwowane tylko w diamagnetykach, gdyż w innych substancjach zerowy moment magnetyczny będzie dominował nad zaindukowanym momentem magnetycznym. Tak więc tylko diamagnetyk będzie stawiał opór przy wprowadzaniu go do pola zewnętrznego, a narastanie pola w objętości zajmowanej przez próbkę powodować będzie wypychanie jej z obszaru pola.

## 2.2 Paramagnetyki

**Paramagnetyki** to materiały, których właściwości magnetyczne zdominowane są przez zjawisko paramagnetyzmu. Jedną z najistotniejszych właściwości paramagnetyków, jest fakt, iż atomy paramagnetyczne posiadają stały, niezerowy wypadkowy moment magnetyczny, ale oddziaływania pomiędzy tymi momentami są bardzo słabe. Na skutek tego w nieobecności pola magnetycznego, w wyniku fluktuacji termicznych wypadkowe namagnesowanie materiału jest równe zero. Dopiero pod wpływem przyłożenia zewnętrznego pola magnetycznego dochodzi do częściowego uporządkowania momentów magnetycznych poszczególnych atomów i powstania wypadkowego momentu magnetycznego w kierunku zewnętrznego pola. Tak więc, indukowany przez pole moment magnetyczny jest skierowany równoległe do pola, a co za tym idzie podatność paramagnetyczna jest dodatnia, choć stosunkowo mała co do wartości. Paramagnetyk będzie zawsze wciągany w obszar silnego pola magnetycznego. Objętościowa podatność paramagnetyczna w temperaturze pokojowej jest rzędu  $10^{-6}$ . W materiałach izotropowych podatność magnetyczna zależy od temperatury zgodnie z **prawem Curie**:

$$\chi = \frac{C}{T},$$

gdzie  $C$  to stała Curie. Oddziaływanie paramagnetyczne tych substancji wzrasta wraz ze spadkiem temperatury i staje się silne w zakresie temperatur bliskich temperaturze zera bezwzględnego. Przykładami paramagnetyków są m.in.: aluminium, NaCl (sól kuchenna), wolne rodniki organiczne (substancje organiczne z niesparowanymi elektronami).

### 2.3 Ferromagnetyki

Ferromagnetyki to materiały, w których w niskich temperaturach występuje spontaniczne namagnesowanie tzn. istnieje niezerowy moment magnetyczny nawet w nieobecności zewnętrznego pola magnetycznego. W temperaturze zera bezwzględnego, orientacja momentów magnetycznych jest całkowita i namagnesowanie spontaniczne osiąga swoją maksymalną wartość. Ze wzrostem temperatury, na skutek fluktuacji cieplnych, następuje rozporządkowanie orientacji poszczególnych momentów magnetycznych, w skutku czego namagnesowanie spontaniczne maleje ze wzrostem temperatury. Powyżej pewnej temperaturze krytycznej  $T_C$ , zwanej temperaturą Curie, w której zachodzi przemiana fazowa II-ego rodzaju, spontaniczne namagnesowanie znika i układ wykazuje zachowanie paramagnetyczne. Temperaturową zależność podatności magnetycznej ferromagnetyka powyżej temperatury Curie określa tzw. **prawo Curie-Weissa**:

$$\chi = \frac{Const}{T - T_C} .$$

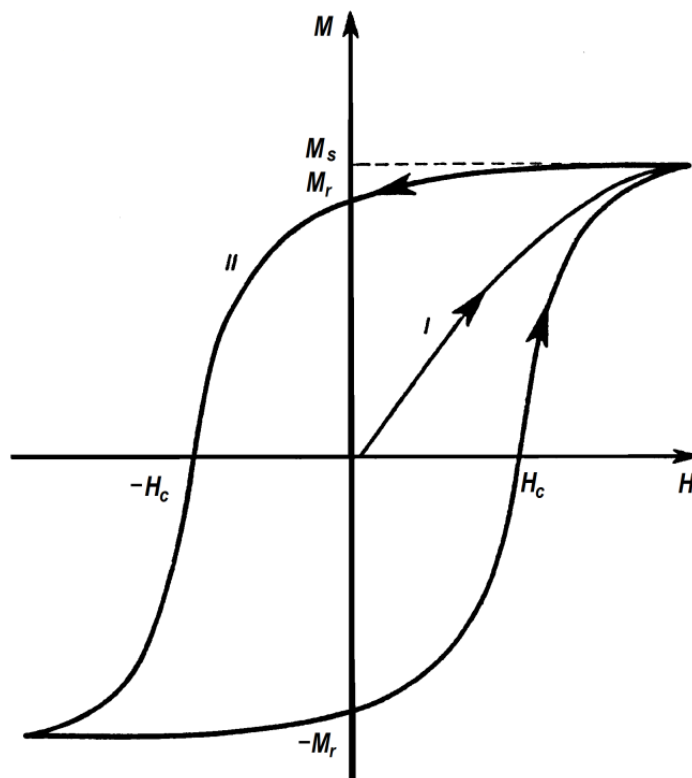
Do opisu ferromagnetyków używa się **modelu pola molekularnego**. Jest to klasyczna teoria namagnesowania spontanicznego zaproponowana przez Weissa zakładająca, że spontaniczne namagnesowanie ferromagnetyka można obliczyć jako namagnesowanie paramagnetyka umieszczonego w efektywnym polu molekularnym, gdzie pole efektywne to suma przyłożonego pola  $B$  oraz pola molekularnego Weissa.

W przypadku ferromagnetyków za oddziaływanie między jonami magnetycznymi odpowiedzialne jest tzw. silne oddziaływanie wymienne, które dąży do równoległego uporządkowania momentów magnetycznych, natomiast oddziaływanie dipolowe dąży do obniżenia energii układu jonów poprzez antyrównoległe ustawienie momentów magnetycznych. Ciągła rywalizacja pomiędzy tymi oddziaływaniami prowadzi do powstania tzw. **domen magnetycznych**, tj. makroskopowych obszarów namagnesowanych jednorodnie wzdłuż różnych kierunków.

Gdy ferromagnetyk jest rozmagnesowany, kierunki namagnesowania w różnych domenach zorientowane są w sposób chaotyczny i stąd właśnie wynika zerowy wypadkowy moment magnetyczny w przypadku nieobecności pola magnetycznego. W momencie gdy zostaje przyłożone niewielkie zewnętrzne pole magnetyczne ferromagnetyk namagnesowuje się trwale, na skutek ustawienia się wektorów namagnesowania poszczególnych domen w kierunku zewnętrznego pola, co prowadzi do powstania niezerowego wypadkowego namagnesowania, które rośnie w miarę zwiększania pola magnetycznego, aż osiągnie wartość  $M_0$  równą namagnesowaniu jednorodnego, bezdomenowego materiału. Wzrost natężenia pola magnetycznego powoduje zwiększenie objętości domen, których kierunki dipolowych momentów magnetycznych są zbliżone do kierunku pola magnetycznego i jednocześnie zmniejszanie objętości tych domen, których kierunki momentów są znacząco różne od kierunku pola magnetycznego, aż do ich całkowitego zaniku, co ostatecznie powoduje, że materiał wchodzi w stan nasycenia  $M_s$  (rys.2.).

Zmniejszanie pola magnetycznego po osiągnięciu natężenia nasycenia pola magnetycznego  $H_c$  powoduje, że punkt pracy przesuwają po innej krzywej niż krzywa pierwotna. Taka cykliczna zmiana pola

magnetycznego wywołuje zmianę namagnesowania i indukcji po krzywej zamkniętej zwanej **pętlą histerezy**. Pętlę histerezy charakteryzują dwa podstawowe parametry: pozostałość magnetyczna  $M_r$  (indukcja szczątkowa) określona jako wartość  $M$  w punkcie  $H=0$  oraz siła koercji  $H_c$  określona jako wartość pola  $H$  w punkcie  $M=0$ .



Rys. 2. Pętla histerezy magnetycznej ferromagnetyka.

Typowymi ferromagnetykami są: żelazo, kobalt, nikiel, gadolin, dysproz. Ze względu na charakter procesów namagnesowania materiały ferromagnetyczne dzielimy na **materiały magnetycznie twarde** i **materiały magnetycznie miękkie**. Do grupy materiałów magnetycznie miękkich zaliczamy ferromagnetyki, których namagnesowanie lub przemagnesowanie zachodzi w stosunkowo słabych polach magnetycznych. Materiały te tracą namagnesowanie po usunięciu pola magnetycznego. Natomiast do grupy materiałów magnetycznie twardych zaliczamy ferromagnetykami, których namagnesowanie zachodzi w stosunkowo silnych polach magnetycznych i materiały te zachowują stan namagnesowania pomimo braku zewnętrznego pola magnetycznego.