

~ CURS 5 ~

4. Regim magnetostatic

4.1. Producerea câmpului magnetic. Starea de magnetizare

Există corpuri neîncărcate electric, nepolarizate electric și neparcurse de curent electric de conducție aflate într-o stare distinctă, între care se exercită interacțiuni calitativ diferite de cele petrecute în câmp electric. Starea fizică specifică acestor corpuri se numește *stare de magnetizare*. Aceste corpuri creează în jurul lor un sistem fizic asociat, care asigură transmiterea din aproape în aproape a acestui tip de interacțiuni care se numește *câmp magnetic*. Experimental, au fost puse în evidență interacțiuni de aceeași natură în vecinătatea corpurilor conductoare în stare electrocinetică sau a corpurilor electrizate în stare de mișcare, deci aceste corpuri în aceste stări își asociază un câmp magnetic propriu. Starea de magnetizare a corpurilor este caracterizată global de mărimea primitivă vectorială $\bar{\mathbf{m}}$ [$\text{A}\cdot\text{m}^2$] numită *moment magnetic*, iar local, de mărimea derivată vectorială $\bar{\mathbf{M}}$ [A/m] numită *magnetizație*.

Starea de magnetizare se poate obține atât dependent de existența unui câmp magnetic ce dispare după îndepărtarea acestuia (*magnetizare temporară*), dar poate exista și în absența acestuia (*magnetizare permanentă*). De aceea, în cel mai general mod, cele două mărimi vectoriale introduse anterior pot avea două componente:

$$\bar{\mathbf{m}} = \bar{\mathbf{m}}_t + \bar{\mathbf{m}}_p \quad \text{și} \quad \bar{\mathbf{M}} = \bar{\mathbf{M}}_t + \bar{\mathbf{M}}_p$$

4.2. Caracterizarea câmpului magnetic

În vid, câmpul magnetic este complet caracterizat cu ajutorul unei mărimi vectoriale primitive, $\bar{\mathbf{B}}_v$ numită *inducția magnetică în vid*. Câmpul magnetic, sistem fizic asociat corpurilor magnetizate, corpurilor conductoare parcurse de curent de conducție și corpurilor electrizate aflate în mișcare, este caracterizat de perechea de mărimi [A/m] numită *intensitatea câmpului magnetic* și de *inducția magnetică* [T]. În vid, între aceste două mărimi există următoarea relație:

$$\bar{\mathbf{B}}_v = \mu_0 \bar{\mathbf{H}}_v$$

în care μ_0 este o constantă universală numită *permeabilitatea magnetică a vidului*, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} [\text{H}/\text{m}]$.

Global, câmpul magnetic poate fi caracterizat prin următoarele mărimi derivate:

- *tensiunea magnetică* de-a lungul unei curbe (C) între două puncte A și B :

$$u_{m_{AB}} = \int_{A(C)}^B \bar{\mathbf{H}} \cdot d\bar{\mathbf{l}} = \int_{A(C)}^B H \cdot dl \cdot \cos \alpha = \int_{A(C)}^B H_t \cdot dl$$

și are ca unitate de măsură *amperul* [A] (fig. 4.1a);

- *tensiunea magnetomotoare* în lungul unei curbe închise Γ :

$$u_{mm_{AB}} = \oint_{(\Gamma)} \bar{\mathbf{H}} \cdot d\bar{\mathbf{l}} = \oint_{(\Gamma)} H \cdot dl \cdot \cos \alpha = \oint_{(\Gamma)} H_t \cdot dl$$

- *fluxul magnetic* printr-o suprafață $S / S_{\Gamma} / \Sigma$:

$$\Phi_{S_{\Gamma}} = \int_{S_{\Gamma}} \vec{B} \cdot \vec{n} \cdot dA = \int_{S_{\Gamma}} B \cdot dA \cdot \cos \alpha = \int_{S_{\Gamma}} B_n \cdot dA$$

și are ca unitate de măsură *weberul* [Wb] (fig. 4.1b).

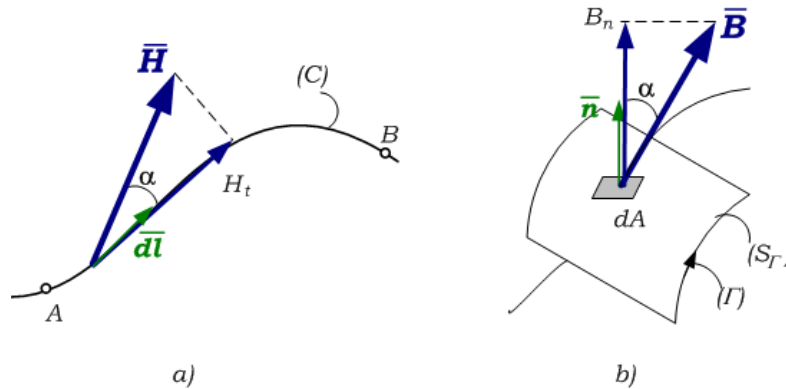


Fig. 4.1. Definirea tensiunii magnetice (a), respectiv a fluxului magnetic (b).

4.3. Legea fluxului magnetic

A. Forma generală integrală

Enunț: Fluxul magnetic prin orice suprafață închisă (Σ) este zero:

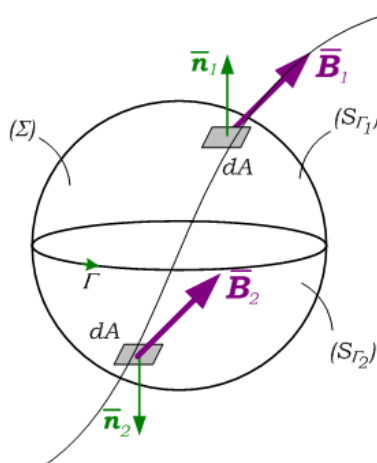
$$\Phi_{\Sigma} = 0$$

sau, dezvoltând fluxul magnetic, se obține:

$$\oint_{\Sigma} \vec{B} \cdot \vec{n} \cdot dA = 0$$

Prin analogie cu legea fluxului electric, putem concluziona:

- nu există corespondent al sarcinii electrice în câmp magnetic;
- liniile de câmp magnetic sunt linii închise;
- fluxul magnetic prin două suprafețe deschise (S_{Γ_1} și S_{Γ_2}) ce se sprijină pe aceeași curbă închisă (I) este același.



Demonstrație: Se consideră o suprafață închisă Σ ce se poate descompune în două suprafețe deschise (S_{Γ_1} și S_{Γ_2}) de-a lungul aceleiași curbe închise (I) (fig. 4.2):

$$\Phi_{\Sigma} = 0 \Rightarrow \Phi_{S_{\Gamma_1}} - \Phi_{S_{\Gamma_2}} = 0 \Rightarrow \Phi_{S_{\Gamma_1}} = \Phi_{S_{\Gamma_2}}$$

Fig. 4.2. Explicativă pentru consecința legii fluxului magnetic.

B. Forme locale

Pentru domeniile de variație continuă a mărimilor, aplicându-i membrului stâng al formei integrale teorema $G-O$ se obține forma locală a legii:

$$\operatorname{div} \bar{\mathbf{B}} = 0$$

Folosind egalitatea operațională $\operatorname{div} \operatorname{rot} \bar{\mathbf{X}} = 0$ în relația anterioară, se poate introduce o mărime nouă numită *potențialul magnetic vector*, $\bar{\mathbf{A}}$:

$$\bar{\mathbf{B}} = \operatorname{rot} \bar{\mathbf{A}}$$

Această mărime nu este complet definită prin relația anterioară, impunându-se și condiția de etalonare a câmpului magnetic ($\operatorname{div} \bar{\mathbf{A}} = 0$). Cu ajutorul acestei mărimi, fluxul magnetic poate fi calculat ca integrală pe o curbă, în loc de o suprafață:

$$\Phi_{S_\Gamma} = \int_{S_\Gamma} \bar{\mathbf{B}} \cdot \bar{\mathbf{n}} \cdot dA = \int_{S_\Gamma} \operatorname{rot} \bar{\mathbf{A}} \cdot \bar{\mathbf{n}} \cdot dA = \oint_{\Gamma} \bar{\mathbf{A}} \cdot d\bar{\mathbf{l}}$$

La o suprafață de discontinuitate (între două medii cu proprietăți magnetice diferite) se obține forma locală:

$$B_{2n} - B_{1n} = 0 \Rightarrow B_{2n} = B_{1n}$$

relația de conservare a componentei normale a inducției magnetice:

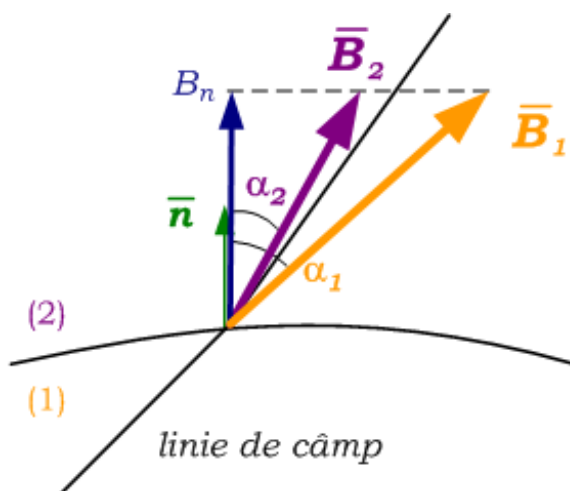


Fig. 4.3. Conservarea componentei normale a inducției magnetice.

4.4. Legea magnetizației temporare

Enunț: Pentru diferite tipuri de materiale magnetice și în diferite regimuri de desfășurare în timp a fenomenelor magnetizația temporară este o funcție de intensitatea câmpului magnetic inductor.

$$\bar{\mathbf{M}}_t = f(\bar{\mathbf{H}})$$

- pentru o clasă largă de materiale, în regimuri staționare sau nu prea rapid variabile în timp, relația este de proporționalitate:

$$\overline{\mathbf{M}}_t = \chi_m \cdot \overline{\mathbf{H}} \quad \text{- materiale liniare și izotrope,}$$

χ_m se numește susceptibilitatea magnetică;

- dacă $\chi_m = \chi_m(\overline{\mathbf{H}})$ - materialele sunt neliniare și anizotrope;
- dacă materialul este anizotrop, dar caracterizat de o rețea cristalină, uniformă și continuă:

$$\overline{\mathbf{M}}_t = \overline{\overline{\chi}}_m \overline{\mathbf{H}}$$

$\overline{\overline{\chi}}_m$ este tensorul susceptibilității magnetice.

4.5. Legea legăturii în câmp magnetic ($\overline{\mathbf{B}}$, $\overline{\mathbf{H}}$, $\overline{\mathbf{M}}$)

Enunț: În orice moment de timp și în orice punct din spațiu, indiferent de regimul de variație al mărimilor, între inducția magnetică $\overline{\mathbf{B}}$, intensitatea câmpului magnetic $\overline{\mathbf{H}}$ și magnetizația $\overline{\mathbf{M}}$ există relația:

$$\overline{\mathbf{B}} = \mu_0 (\overline{\mathbf{H}} + \overline{\mathbf{M}})$$

Aceste două legi pot fi folosite împreună pentru materiale liniare, rezultând:

$$\overline{\mathbf{B}} = \mu_0 (\overline{\mathbf{H}} + \overline{\mathbf{M}}_t + \overline{\mathbf{M}}_p) = \mu_0 (\overline{\mathbf{H}} + \chi_m \overline{\mathbf{H}}) + \mu_0 \overline{\mathbf{M}}_p = \mu_0 (1 + \chi_m) \overline{\mathbf{H}} + \mu_0 \overline{\mathbf{M}}_p = \mu_0 \mu_r \overline{\mathbf{H}} + \mu_0 \overline{\mathbf{M}}_p = \mu \overline{\mathbf{H}} + \overline{\mathbf{I}}_p$$

unde $\mu_r = (1 + \chi_m)$ - permeabilitatea magnetică relativă a materialului și $\overline{\mathbf{I}}_p = \mu_0 \overline{\mathbf{M}}_p$ se numește polarizația magnetică.

Pentru mediile lipsite de o polarizație magnetică permanentă relația devine:

$$\overline{\mathbf{B}} = \mu \overline{\mathbf{H}}$$

ceea ce arată că liniile de câmp ale celor două câmpuri de vectori sunt în acest caz coincidente.

Există și o categorie largă de materiale magnetice pentru care dependența $\mathbf{B-H}$ este neliniară și necunoscută analitic, materiale despre care se va discuta în capitolul următor.

4.6. Materiale magnetice

După modul cum se comportă la introducerea lor într-un câmp magnetic exterior, materialele se împart în două categorii: liniare și neliniare. La rândul lor, fiecare din aceste două categorii de materiale cunosc subîmpărțiri, determinate de structura lor fizică și de comportarea fenomenologică globală. Astfel, materialele magnetice liniare se clasifică în materiale *diamagnetice* și *paramagnetice*, iar cele neliniare în materiale *feromagnetice*, *ferimagnetice* și, respectiv, *antiferomagnetice*.

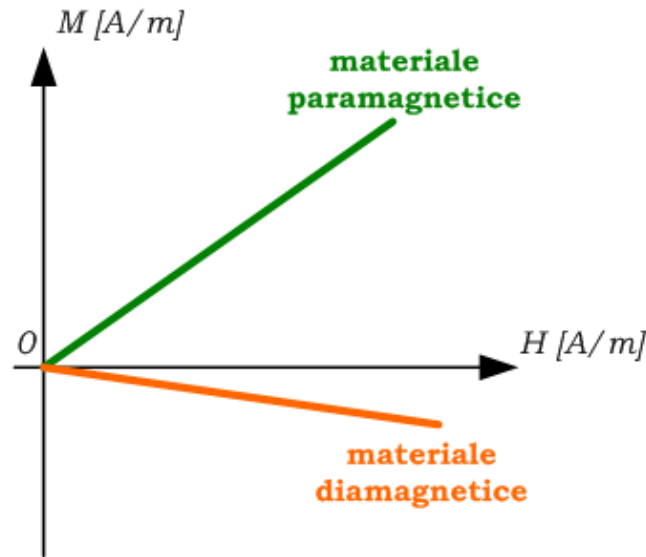


Fig. 4.4. Caracteristica de magnetizare a materialelor diamagnetice și paramagnetice.

- a. **Materialele diamagnetice** sunt acele materiale a căror susceptibilitate magnetică este negativă și foarte mică (în general, de ordinul $10^{-5} - 10^{-6}$). În consecință, permeabilitatea magnetică a acestor materiale este mai mică decât cea a vidului, deși rămâne foarte apropiată de aceasta. Conform legii magnetizației temporare, introduse într-un câmp magnetic exterior, materialele diamagnetice se magnetizează în sens opus câmpului (de exemplu: Bi, Cu, Pb, Ag, apă, grafit, toate materialele organice).
- b. **Materialele paramagnetice** sunt, spre deosebire de cele diamagnetice, caracterizate de o susceptibilitate magnetică pozitivă, deși încă foarte mică (de ordinul $10^{-3} - 10^{-4}$). Permeabilitatea lor magnetică relativă este deci supraunitară, rămânând însă apropiată de unitate. În acord cu legea magnetizației temporare, aceste materiale se magnetizează în sensul câmpului și sunt astfel atrase spre regiunile în care câmpul magnetic aplicat este mai intens (de exemplu: Al, N, O, Mg).
- c. **Materialele feromagnetice** sunt substanțe a căror susceptibilitate și, deci permeabilitate magnetică, nu mai sunt constante și depind de intensitatea câmpului magnetic stabilit în interiorul lor, având valori cu mult mai mari decât la materialele magnetice liniare (astfel, la foarte multe materiale utilizate curent în tehnică, μ ajunge să depășească de $10^4 - 10^5$ ori valoarea corespunzătoare vidului).

Mai mult chiar, permeabilitatea magnetică a acestor materiale depinde în afara factorilor fizici de mediu și structură, și de antecedentele (istoria trecută a) stării de magnetizare a corpului și chiar de configurația geometrică a probei și de procesul tehnologic de obținere a materialului. O influență sporită, în cazul acestor materiale, o au și prelucrările mecanice și tratamentele termice.

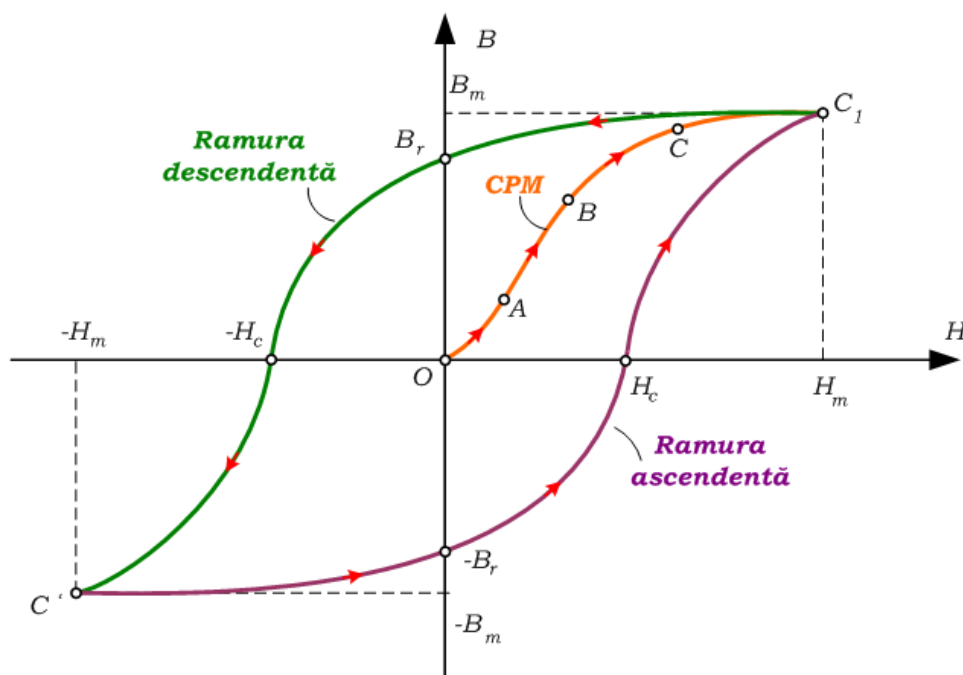


Fig. 4.5. Ciclu de histerezis pentru un material feromagnetic.

La materialele feromagnetice, dependența reciprocă a inducției și intensității câmpului magnetic are un caracter foarte special, fiind esențial influențată de succesiunea stărilor anterioare de magnetizare ale probei.

Presupunând corpul inițial demagnetizat, la aplicarea unui câmp magnetic de direcție constantă a cărui intensitate crește progresiv, se observă că inducția magnetică crește urmărind ramura OABC, numită *curba de primă magnetizare*. De la un anumit punct (C_1), se poate observa că, indiferent cât am crește intensitatea câmpului magnetic, inducția magnetică crește foarte puțin, se spune astfel că s-a atins *saturarea* materialului magnetic. Pe baza structurii de domenii a corpului feromagnetic, pe curba de primă magnetizare pot fi identificate câteva regiuni distincte: porțiunea OAB corespunde magnetizării materialului realizată pe baza măririi volumului domeniilor magnetizate după direcții apropiate de cele ale câmpului aplicat, în dauna celorlalte domenii învecinate. Într-o primă etapă, aceste proces are un caracter reversibil (regiunea OA), după care el devine ireversibil (regiunea AB). În fine, la aplicarea unor câmpuri magnetice intense (regiunea BC), magnetizarea crește în special datorită rotirii bruște a direcției de magnetizare spontană a unor domenii după direcția câmpului exterior.

Urmărind acum scăderea câmpului magnetic, se observă că și inducția magnetică scade, dar nu mai urmărește curba inițială, astfel încât la anularea câmpului aplicat, corpul mai prezintă o inducție, numită *inducția remanentă*, B_r . Pentru anularea acestei inducții trebuie aplicat un câmp magnetic de sens opus celui inițial și de valoare H_c , numit *câmp magnetic coercitiv*. O scădere în continuare a intensității câmpului magnetic, se atinge punctul C' , corespunzător valorilor minime absolute ale intensității și inducției magnetice. Curba descrisă în acest paragraf poartă denumirea de *ramura descendentă*.

Creșterea câmpului de la $-H_m$ la $+H_m$, duce la parcurgerea traseului $C'(-B_r)H_cC_1C$, numită *ramura ascendentă*. Întreg traseul parcurs poartă denumirea de *ciclu de histerezis*, această curbă fiind foarte importantă în caracterizarea materialului feromagnetic, aria sa fiind direct proporțională cu energia necesară parcurgerii stărilor succesive de magnetizare ce alcătuiesc

punctele ciclului, energie care în cele din urmă se dezvoltă în corp sub formă de căldură (conform teoremei lui Warburg).

- d. **Materialele ferimagnetice** (numite și *ferite*) sunt o altă clasă de materiale magnetice neliniare cu deosebit de multe aplicații practice. Proprietățile lor magnetice sunt comparabile cu cele ale materialelor feromagnetice, de care se deosebesc însă printr-un caracter pronunțat semiconductor, având rezistivități de ordinul a $10^4 - 10^6 \Omega\text{m}$. Feritele sunt de regulă compuși ai unor metale bivalente cu oxidul de fier. Ele se realizează ca materiale magnetice *moi* (feritele de Ni, Cd, Mn, Mg, Zn, etc), cât și *dure* (Ba, Co, Pb).
- e. **Materialele antiferomagnetice** sunt, de asemenea, materiale magnetice neliniare, construite tot din două subrețele cristaline (asemănător feritelor), dar care se compensează complet. Ele se prezintă de obicei sub forma unor cristale ionice, care conțin obligatoriu și ioni ai unor metale de tranziție. În stare fundamentală ($T \rightarrow 0$) aceste cristale nu au electroni de conducție și se comportă deci ca semiconductoare sau electroizolanți (de exemplu: Cr, Mn, MnO).

După forma și mărimea ciclului de histerezis, materialele feromagnetice se împart în două mari categorii (*moi* și *dure*), căroră, datorită dezvoltărilor din ultimele decenii li se poate adăuga și o a treia, cea a materialelor *semidure* (dedicată înregistrărilor magnetice).

- a. **materialele magnetice moi** sunt acele materiale feromagnetice care se pot magnetiza și demagnetiza ușor, având o valoare redusă a intensității câmpului magnetic coercitiv și deci un ciclu de histerezis îngust, deși inducția lor magnetică poate avea valori relativ ridicate.

Din punct de vedere tehnic, cele mai importante proprietăți magnetice ale acestor materiale sunt: permeabilitatea magnetică cât mai ridicată și pierderi de magnetizare cât mai reduse. Datorită faptului că pierderile de putere necesare magnetizării sunt mici, materialele magnetice moi se utilizează în electrotehnică în special la realizarea circuitului magnetic al echipamentelor electromagnetice (mașini, aparate și transformatoare electrice).

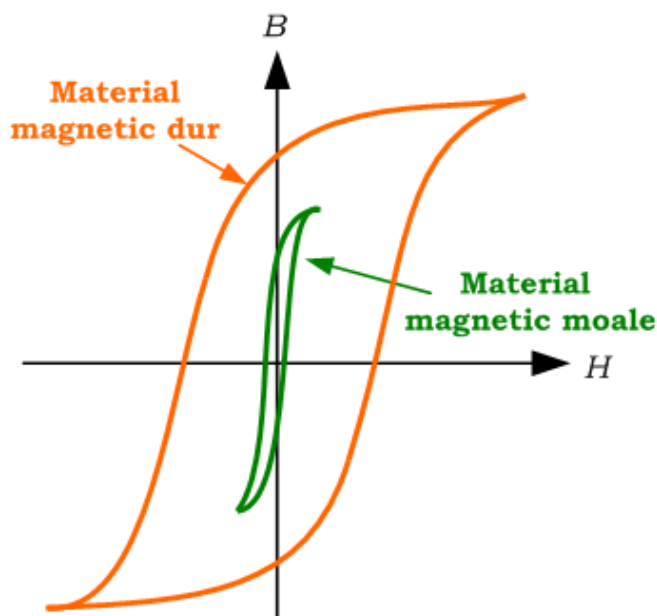


Fig. 4.6. Ciclul de histerezis pentru un material magnetic dur, respectiv moale.

Din categoria materialelor magnetice moi fac parte: fierul tehnic, fonta, oțelul, aliajele de Fe-Si, Fe-Ni, Fe-Co cu eventuale adaosuri, anumite aliaje cu permeabilitate magnetică practic independentă de temperatură (izoprenul) sau altele la care ea variază foarte puternic cu temperatura (*termalloy*). În ultimele decenii s-au obținut materiale magnetice moi (amorfe sau cristaline) prin topirea rapidă a unor compuși asigurându-se permeabilități relative foarte ridicate și cicluri de histerezis foarte înguste.

b. **materialele magnetice dure** se caracterizează prin faptul că ciclul lor de histerezis este larg, ele magnetizându-se și demagnetizându-se foarte greu, având o intensitate a câmpului coercitiv foarte mare (inducția remanentă este în schimb comparabilă cu cea a materialelor moi). Corespunzător, aceste materiale sunt utilizate mai ales la fabricarea magneților permanenți, cu o arie foarte largă de utilizare: elemente inductoare în generatoarele electrice de mică și medie putere, elemente componente de bază în unele dispozitive de prindere și ridicare a greutateților metalice, în echipamente electronice, în construcția unor apartamente de măsurare etc.

Din categoria materialelor magnetice dure fac parte unele oțeluri aliate și oțeluri de carbon (cu circa 0,6...1% C), diferite aliaje pe bază de Fe-Ni-Al (alni, alnico), V-Co sau metale prețioase ca și unele materiale obținute din pulberi sintetizate. Îmbunătățirea produsului energetic $(BH)_{\max}$ a dus în ultimele decenii la dezvoltarea unor magneți permanenți foarte puternici, pe bază de pământuri rare: SmCo_2 , Sm_2Co_5 și, mai ales, $\text{Nd}_2\text{FeB}_{14}$.