

5. MATERIALE MAGNETICE

5.1. Definiții. Clasificări

Materialele magnetice sunt acele materiale care introduse într-un câmp magnetic exterior produc ele însele, în interiorul și în exteriorul lor, un câmp magnetic, deci se magnetizează. Ele deformează câmpul inițial, concentrând un mare număr de linii de câmp în spațiul ocupat de ele. Magnetizarea este o proprietate generală a materiei, dar numai la anumite materiale, numite – magnetice - ea este vizibilă.

Starea de magnetizație (caracteristică materialelor magnetice) este acea stare a materiei care prezintă moment magnetic al unității de volum \overline{M} (vectorul magnetizație) diferit de zero. Ea este de natură atomică, fiind generată de mișcarea electronilor pe orbită și în jurul axei proprii, mișcări ce dau naștere momentelor magnetice orbitale și de spin. Momentul magnetic elementar spontan \overline{m}_p este suma vectorială a momentelor magnetice orbitale și de spin pe o particulă și, în lipsa unui câmp magnetic exterior, poate fi nul sau nenul. Pentru un atom el are expresia:

$$\overline{m}_p = \sum_{i=1}^n \overline{m}_{se_i} + \sum_{i=1}^n \overline{m}_{orbe_i} + \overline{m}_{sn} , \quad (5.1)$$

unde \overline{m}_{se_i} , \overline{m}_{orbe_i} sunt momentele magnetice de spin, respectiv orbitale ale electronilor iar \overline{m}_{sn} este momentul magnetic de spin al nucleului. Dintre acestea numai momentul magnetic de spin al electronilor prezintă importanță în apariția momentului magnetic elementar spontan deoarece momentele magnetice orbitale se compensează, în general, iar cel de spin al nucleului este foarte mic în raport cu cel al electronului.

Elementele care au substraturile electronice interne complet ocupate cu electroni nu au moment magnetic spontan deoarece electronii (câte doi pe fiecare nivel energetic) au spinii orientați antiparalel și se compensează reciproc. Cei de valență, care formează gazul electronic, nu contribuie la apariția momentului magnetic spontan. Deci, numai acele elemente metalice care au substraturi interne incomplet ocupate cu electroni (elementele de tranziție, pământurile rare, actinidele) prezintă moment magnetic elementar

nenul. Materialele pot fi magnetic polare, când $\overline{m}_p \neq 0$, sau nepolare, când $\overline{m}_p = 0$.

În funcție de dependența de câmpul magnetic exterior, starea de magnetizație poate fi temporară (\overline{M}_t există numai atâta timp cât există și câmpul exterior) sau permanentă (\overline{M}_p este independentă de prezența câmpului magnetic exterior).

Dependența magnetizației temporare de intensitatea câmpului magnetic exterior este dată de *legea magnetizației temporare*:

$$\overline{M}_t = \chi_m \overline{H}, \quad (5.2)$$

unde χ_m este o caracteristică de material ce depinde numai de natura lui fizico-chimică și se numește *susceptivitate magnetică*. Ea este o mărime scalară la corpurile izotrope și una tensorială la cele anizotrope. Materialele la care χ_m nu depinde de intensitatea câmpului magnetic se numesc materiale magnetic liniare, iar cele la care există o interdependență între χ_m și \overline{H} sunt materiale neliniare.

Interacțiunea dintre substanță și câmpul magnetic este dată de legea legăturii dintre inducția magnetică \overline{B} , intensitatea câmpului magnetic \overline{H} și magnetizația corpului \overline{M} :

$$\overline{B} = \mu_0 \overline{H} + \mu_0 \overline{M} \quad (5.3)$$

unde $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ [H/m] este *permeabilitatea magnetică a vidului*.

Pentru un material izotrop, liniar, fără magnetizație permanentă, în ipoteza neglijării pierderilor magnetice, relația (5.3) se poate pune sub forma:

$$\overline{B} = \mu_0 \overline{H} + \mu_0 \overline{M}_t = \mu_0 (1 + \chi_m) \overline{H} = \mu_0 \mu_r \overline{H} = \mu \overline{H}, \quad (5.4)$$

unde $\mu_r = 1 + \chi_m$ este *permeabilitatea relativă a materialului* și $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$ – cea *absolută*, ambele fiind caracteristici de material. În cazul materialelor magnetice reale, permeabilitatea relativă este o mărime complexă, care depinde și de pierderile de putere activă în material. Relația (5.4) caracterizează interacțiunea substanței cu câmpul magnetic în domeniul liniar.

Magnetizația temporară poate fi: diamagnetică sau paramagnetică.

Diamagnetismul apare datorită interacțiunii dintre câmpul magnetic aplicat și electronii atomici a căror mișcare orbitală este modificată datorită faptului că peste ea se suprapune o mișcare de precesie generată de câmpul magnetic aplicat. Precesia produce un câmp magnetic indus, de sens contrar celui inițial, pe care-l micșorează. Rezultă o susceptivitate magnetică negativă $\chi_m < 0$ (de ordinul $10^{-5} \dots 10^{-6}$) și deci $\mu_r < 1$.

Gazele rare, anumite metale (Ag, Au, Cu, Pb, Hg, Zn), cea mai mare parte a metaloizilor (Si, Ge) și un mare număr de compuși organici sunt materiale diamagnetice. Ele nu prezintă interes pentru aplicațiile tehnice implicând magnetizări.

Paramagnetismul este propriu materialelor ai căror atomi au momente magnetice elementare spontane necuplate între ele. În lipsa unui câmp magnetic exterior, acestea sunt orientate haotic și corpul apare neutru din punct de vedere magnetic.

La aplicarea unui câmp magnetic exterior, momentele magnetice elementare spontane se orientează în direcția câmpului aplicat, mărindu-l. Magnetizația este totuși foarte slabă pentru că efectul agitației termice care orientează aleatoriu momentele magnetice este preponderent. Susceptivitatea este pozitivă, dar foarte mică ($10^{-4} \dots 10^{-6}$) și $\mu_r > 1$ (dar, apropiat de 1). Sunt paramagnetice cea mai mare parte a gazelor (O) și anumite metale - în special cele alcaline (Na, K, Al, Cr, Pt, Mn, Ta, W).

La temperatură constantă, procesul de orientare depinde de intensitatea câmpului aplicat și magnetizația tinde spre saturație, deci materialele paramagnetice au caracter neliniar.

La câmp constant, susceptivitatea variază invers proporțional cu temperatura, conform *legii Curie – Weiss*:

$$\chi_m = \frac{C}{T}, \quad (5.5)$$

unde C este constanta Curie.

Ca și diamagneticele, materialele paramagnetice au $\mu_r \approx 1$ și nu prezintă deloc interes ca materiale magnetice, ambele categorii de materiale fiind cunoscute ca materiale nemagnetice.

Magnetizația permanentă poate fi: feromagnetică, antiferomagnetică și ferimagnetică.

Feromagnetismul este propriu materialelor magnetic polare la care momentele magnetice ale atomilor se orientează omoparalel pe domenii de magnetizare spontană (domenii Weiss). Această orientare se realizează sub efectul cuantic al interacțiunilor de schimb dintre spinii electronilor atomilor învecinați. Deoarece orientarea domeniilor, în lipsa unui câmp magnetic exterior este haotică, pe ansamblu, materialul nu prezintă magnetizație (dacă, în prealabil, a fost demagnetizat total) sau prezintă o magnetizație remanentă (după o magnetizare la saturație). Domeniile Weiss sunt despărțite între ele prin pereți de grosimi foarte mici ($10^{-7} \dots 10^{-4}$ m), denumiți pereți Bloch (fig. 5.1).

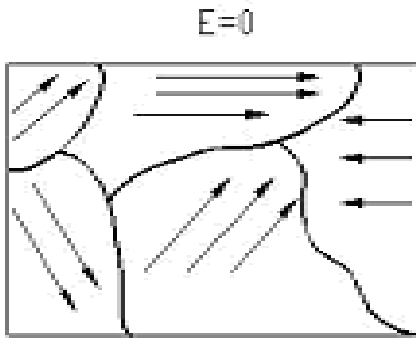


Fig. 5.1 Domenii Weiss de magnetizare spontană

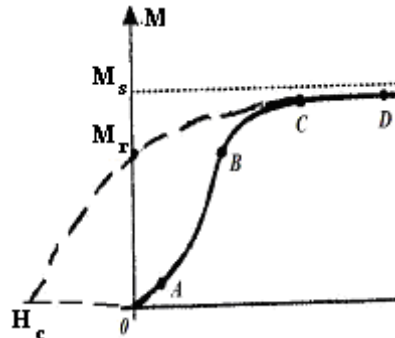


Fig. 5.2 Curba de magnetizare

Sub acțiunea unor câmpuri magnetice slabe se produce o deplasare a pereților Bloch, astfel încât domeniile care au orientarea magnetizației apropiată de cea a câmpului aplicat cresc în detrimentul celor cu o altă orientare. Deplasarea fiind mică, (porțiunea OA din curba de magnetizare – figura 5.2), la scăderea câmpului se revine din A în O pe aceeași curbă – deplasare reversibilă.

La valori mai mari ale câmpului magnetic, deplasările pereților Bloch duc la dispariția unora dintre ei, deci la o lărgire a domeniilor cu orientarea apropiată de direcția câmpului sau chiar la dispariția unor domenii (porțiunea AC). În punctul B există un singur domeniu cu o orientare a magnetizației diferită de cea a câmpului exterior, dar, totuși, apropiată. Din B în C se face orientarea momentelor elementare după direcția câmpului, lucru care, datorită anizotropiei magnetice, se face cu un consum mai mare de energie. Deplasările pe porțiunea AC sunt ireversibile, la scăderea câmpului magnetizația luând alte valori (porțiunea C – M_r - H_c), deci există un histerezis magnetic.

Pentru valori și mai mari ale câmpului magnetic (porțiunea CD) ultimele momente magnetice care se abat de la orientarea după direcția câmpului (datorită agitației termice) sunt orientate după direcția acestuia, creșterea magnetizației fiind foarte mică (materialul intră într-o zonă de saturație) și deplasarea este reversibilă.

Datorită existenței acestor domenii Weiss, materialele feromagnetice au o permeabilitate relativă foarte mare ($10^2 \dots 10^6$), dependentă de câmpul magnetic (au caracter neliniar), de temperatură, de solicitările mecanice etc.

Materialele care prezintă proprietăți feromagnetice sunt: Fe, Co, Ni, Gd și unele aliaje ale acestora.

Antiferomagnetismul și *ferimagnetismul* sunt proprii materialelor caracterizate prin existența în structura lor a două subrețele magnetice ale căror particule au momentele magnetice elementare spontane orientate

antiparalel, ca în figura 5.3. În funcție de egalitatea sau inegalitatea momentelor magnetice orientate antiparalel, materialul este antiferomagnetic sau ferimagnetic. La

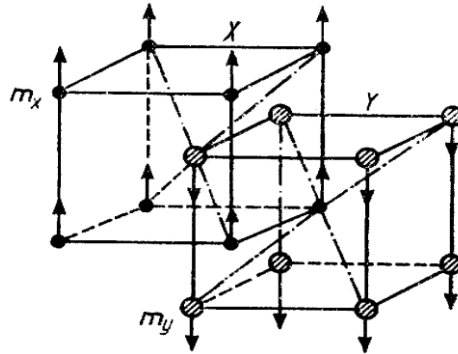


Fig. 5.3 Subrețele magnetice ale materialelor antiferomagnetic și ferimagnetic

cele antiferomagnetic μ_r este apropiat de 1, deoarece momentul magnetic rezultat ($\bar{m}_t = \bar{m}_x + \bar{m}_y$) este aproape nul, abaterea de la zero fiind datorată unei ușoare dezoarentări în structura antiparalelă, introdusă de creșterea temperaturii.

La o anumită temperatură, numită temperatură Neel T_N , ordinea antiparalelă dispare și materialul devine paramagnetic.

Materialele antiferomagnetic mai cunoscute sunt: Mn, MnO, NiO, CaO etc; ele sunt fără importanță pentru tehnică și intră în categoria materialelor nemagnetice.

În cazul materialelor ferimagnetic (ferite) momentul rezultat este diferit de zero ($\bar{m}_t \neq 0$). În cadrul fiecărei subrețele procesul de magnetizare este identic cu cel al materialelor feromagnetic, magnetizația rezultantă fiind diferența magnetizărilor celor două subrețele. Variația magnetizației cu temperatura este similară cu cea a feromagneticilor și anume, ea scade cu creșterea temperaturii până la o anumită valoare, numită temperatură Curie T_C , peste care, materialele devin paramagnetice datorită dispariției domeniilor Weiss. În continuare, scăderea magnetizației se face după legea Curie – Weiss (fig. 5.4).

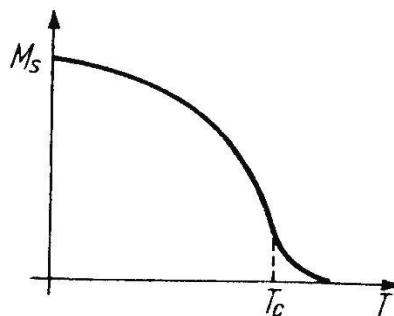


Fig. 5.4. Dependența de temperatură a magnetizației de saturație la materialele magnetice

Din punctul de vedere al conducției, feritele sunt, în general, semiconductoare sau izolante. Permeabilitatea relativă a lor având valori foarte mari (sute până la zeci de mii), feritele sunt materiale magnetice.

În majoritatea cazurilor, ele au formula $M^{2+} O^{2-} Fe^{3+} O^{2-}$, unde M este un metal bivalent (Ni, Zn, Mn, Cd, Mg, Ba, Sr, Pb etc) sau o combinație echivalentă cu un metal bivalent.

5.2. Funcțiunile materialelor magnetice

Materialele fero- și ferimagnetice, prin proprietățile pe care le prezintă, pot fi utilizate în tehnică pentru îndeplinirea unor funcțiuni specifice. Acestea sunt:

- **1. Funcția de miez magnetic**, bazată pe fenomenul de magnetizare fero – sau ferimagnetică. Prin utilizarea unui material magnetic drept miez magnetic închis al unei bobine ideale (fără pierderi), de inductivitate în vid L_0 și cu fluxul de scăpări nul, reactanța la bornele bobinei devine $X_L = j\omega\mu_r L_0$. Deci, bobina cu miez magnetic este echivalentă unei bobine în vid cu inductivitatea de μ_r ori mai mare ($L = \mu_r L_0$).

Totodată, prin utilizarea miezului magnetic, crește inducția magnetică și densitatea de volum a energiei magnetice înmagazinate în circuitul magnetic considerat.

Materialele cu această funcțiune trebuie să îndeplinească următoarele condiții: să aibă permeabilitatea relativă cât mai mare, ciclul de histerezis cât mai îngust (pierderi magnetice cât mai mici), o inducție de cot B_{cot} cât mai mare (zona de cvasiliniaritate din curba de magnetizare cât mai largă – fig. 5.5,a), câmpul coercitiv H_c de valoare cât mai mică (fig. 5.5,b). Aceste condiții sunt îndeplinite de materialele magnetice moi care se utilizează în construcția circuitelor magnetice ale mașinilor și aparatelor electrice, ale bobinelor, ale transformatoarelor etc.

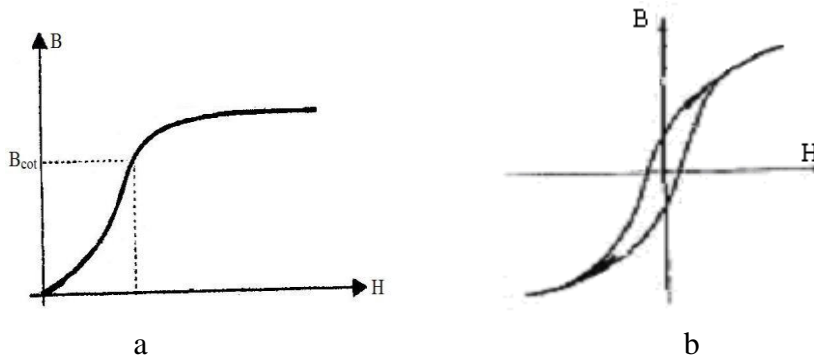


Fig. 5.5 Condiții pentru materialele cu funcția de miez magnetic

2. Funcția de generare a câmpului magnetostatic (de magnet permanent). Un circuit magnetic cu întrefier, al cărui miez magnetic a fost magnetizat până la saturație, reprezintă un magnet permanent, între polii căruia există un câmp magnetostatic.

Materialele care îndeplinesc această funcție trebuie să poată genera o energie magnetostatică cât mai mare, la un volum cât mai mic.

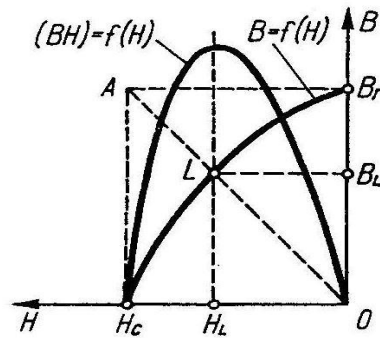


Fig. 5.6 Punctul optim de funcționare al magnetului permanent

Densitatea de energie a câmpului electrostatic (BH) este determinată de coordonatele punctului de funcționare al magnetului permanent (aflat în cadranul II al curbei de histerezis), coordonate ce depind – pentru punctul optim de funcționare - de inducția remanentă B_r și de câmpul coercitiv H_c – figura 5.6. Deci, materialele pentru magneții permanenți, cu diverse utilizări în tehnică, trebuie să aibă valori cât mai mari ale inducției remanente și, în special, ale câmpului coercitiv.

Aceste condiții le îndeplinesc materialele magnetice dure, care au un ciclu de histerezis lat.

3. Funcția de înregistrare magnetică a informației. Această funcție se bazează pe proprietatea unor materiale magnetice de a prezenta o dependență univocă a magnetizației remanente M_r de câmpul magnetic de excitație H_{ex} . Materialele ce îndeplinesc această funcție trebuie să aibă o zonă cât mai largă de dependență liniară $M_r = f(H_{ex})$ și în același timp un câmp coercitiv mare, care să împiedice efectul de ștergere al informației de către câmpurile magnetice perturbatoare. Deci, și acestea, sunt materiale magnetice dure.

4. Funcții neliniare și parametrice. Realizarea unor funcții de circuit neliniare și parametrice se bazează pe caracterul neliniar al dependenței $B = f(H)$, la materialele magnetice. Este important ca acest caracter să fie cât mai pregnant, ceea ce se întâlnește la materialele cu ciclu de histerezis dreptunghiular (CHD), utilizate la fabricarea miezurilor de comutație și memorie, a amplificatoarelor magnetice, releelor, bobinelor saturabile etc.

5. Funcția de ecran magnetic. Adesea, este necesară ecranarea unor dispozitive și elemente electronice pentru a fi protejate de acțiunea perturbatoare a câmpurilor electromagnetice exterioare. Grosimea ecranului se alege în funcție de adâncimea de pătrundere a câmpului perturbator:

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu_0 \mu_r \sigma}}, \quad (5.6)$$

unde f este frecvența câmpului magnetic; μ_r , σ - permeabilitatea relativă, respectiv conductivitatea electrică a materialului de ecranare.

Analizând relația (5.6) se poate concluziona că:

- la frecvențe înalte se poate realiza ușor ecranarea cu materiale de mare conductivitate, adâncimea de pătrundere având valori mici;
- la frecvențe joase, folosind aceleași materiale ar rezulta o adâncime de pătrundere mare, deci ar fi necesar un ecran masiv. Acest inconvenient este înlăturat prin utilizarea unor ecrane din materiale magnetice de mare permeabilitate care reduc adâncimea de pătrundere.

6. Funcția de traductor piezomagnetic. Sub influența stării de magnetizație la materialele piezomagnetice se modifică dimensiunile materialului (efect piezomagnetic invers) sau sub influența tensiunilor mecanice se modifică starea de magnetizare (efect piezomagnetic direct). În aplicațiile tehnice, este utilizat în special efectul piezomagnetic invers care transformă o energie electromagnetică într-una mecanică (traductoare piezomagnetice inverse: generatoare sonore și ultrasonore).

7. Funcția de traductor piromagnetic. Traductoarele piromagnetice, utilizate pentru măsurarea temperaturii, își bazează funcționarea pe variația cu temperatura, la câmp constant, a permeabilității relative a materialelor magnetice, variație mai accentuată în apropierea temperaturii Curie. Pe același efect se bazează și utilizarea lor ca elemente termocompensatoare în circuite cu magneți permanenți.

5.3. Proprietățile materialelor magnetice

Datorită deosebitei importanțe tehnice a materialelor fero- și ferimagnetice prezintă interes cunoașterea unor proprietăți esențiale ale lor ca: anizotropia magnetică, magnetostricțiunea, variația magnetizației cu intensitatea câmpului magnetic aplicat etc.

5.3.1. Anizotropia magnetică

Anizotropia magnetică este acea însușire a materialelor magnetice de a se magnetiza mai ușor (cu un consum mai mic de energie) dacă direcția câmpului aplicat este după anumite direcții preferențiale, numite *direcții de ușoară magnetizare*.

În cazul în care anizotropia magnetică își are originea în structura intimă a materialului, există anizotropie magnetocristalină, iar în cazul în care este produsă de factori externi – se înregistrează anizotropie indusă.

Anizotropia magnetocristalină. Materialele magnetice au o structură cristalină, sistemul de cristalizare depinzând de tipul materialului: cubic cu volum centrat – la fier, cubic cu fețe centrate – la nichel, hexagonal compact – la cobalt. În figura 5.7 sunt prezentate și direcțiile de magnetizare ușoară (mu), medie (mm) și grea (mg), precum și curbele de magnetizare la aplicarea câmpului după fiecare din direcțiile menționate.

În cazul fierului (fig. 5.7,a), direcțiile de magnetizare ușoară sunt paralele cu laturile cubului elementar, cele de magnetizare medie sunt după diagonalele fețelor cubului și cele de magnetizare grea sunt după diagonala principală a cubului. La nichel (fig. 5.7,b), direcția de magnetizare ușoară este după diagonala mare a cubului și cea de magnetizare grea după direcția laturii lui. În cazul cobaltului (fig. 5.7,c), direcțiile de magnetizare ușoară sunt paralele cu axa prisme hexagonale iar cele de magnetizare grea sunt perpendiculare pe aceasta.

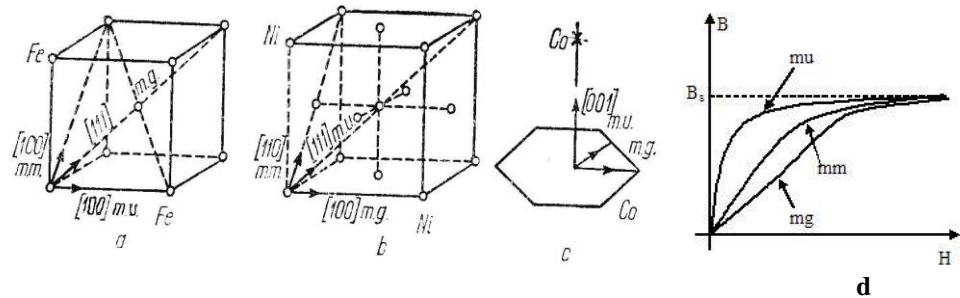


Fig. 5.7. Direcțiile de magnetizare ușoară (m.u.), medie (m.m.) și grea (m.g.) pentru: a – fier; b – nichel; c – cobalt și d – curbele de magnetizare

Existența anizotropiei magnetocristaline se reflectă asupra formei ciclului de histerezis și asupra valorii permeabilității relative. În cazul materialelor cu anizotropie puternică ciclul de histerezis are o formă aproape dreptunghiulară pentru câmp aplicat după o direcție de m.u. și devine înclinat pentru direcții diferite de aceasta (permeabilitatea scade cu cât înclinarea ciclului crește).

Anizotropia indusă se poate realiza prin mai multe procedee tehnologice:

- *laminarea la rece*, când se induce o anizotropie uni- sau biaxială pe direcția laminării, utilizată la producerea tolelor texturate din aliaje ale fierului (Fe – Si, Fe – Co, Fe – Ni). În timpul laminării, cuburile elementare își orientează muchiile paralel cu direcția laminării obținându-se o *structură Goss* (fig. 5.8,a), sau o *structură „în cuburi”* (fig.5.8,b). În primul caz există o singură direcție de ușoară magnetizare, care este cea a laminării, în cel de

al doilea caz sunt două direcții de ușoară magnetizare, perpendiculare una pe alta.

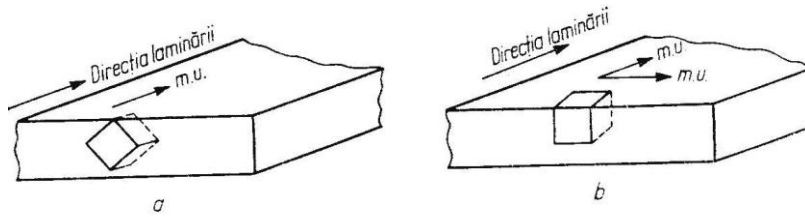


Fig. 5.8. Structuri de materiale feromagnetice: a - Goss; b - structură în cuburi

- *tratamentul termic* în prezența unui câmp magnetic exterior (care orientează momentele magnetice elementare spontane după direcția sa, aceasta reprezentând și direcția de ușoară magnetizare), urmat de o răcire lentă în prezența câmpului. Acest procedeu se utilizează la fabricarea unor materiale cu ciclu de histerezis dreptunghiular, a feritelor cu structură hexagonală etc.

- *răcirea materialului* la o temperatură superioară temperaturii Curie, în prezența unui câmp magnetic, obținându-se o anizotropie uniaxială paralelă sau perpendiculară pe direcția câmpului aplicat. La trecerea prin temperatura Curie, câmpul magnetic produce schimbări în structura cristalină, prin creșterea domeniilor Weiss a căror magnetizație au direcția câmpului exterior, în raport cu celelalte. Anizotropia este puternic influențată de viteza de răcire a materialului.

5.3.2 Magnetostricțiunea

Fenomenul prin care se produc schimbări ale dimensiunilor unui material solid magnetic sub acțiunea unui câmp magnetic exterior (prin variația magnetizației din interior), se numește magnetostricțiune.

Ea poate fi de trei tipuri:

- longitudinală, când se modifică dimensiunea după direcția magnetizației;
- transversală, când se modifică dimensiunea perpendiculară pe direcția magnetizației;
- de volum, când se produc vibrații ale volumului materialului ca urmare a combinației dintre efectul longitudinal și cel transversal.

Sub acțiunea unor tensiuni mecanice aplicate (lungire sau comprimare) se produce o modificare a magnetizației, fenomen ce poartă

denumirea de efect piezomagnetice direct. Lungirea provoacă o creștere a magnetizației atunci când constanta magnetostrictivă este pozitivă sau o scădere a acesteia când constanta este negativă.

Constanta de magnetostricțiune este definită cu relația:

$$\lambda = \frac{\Delta l}{l}, \quad (5.7)$$

unde Δl este variația lungimii inițiale - l .

5.3.3 Curba de magnetizare. Permeabilități

Magnetizarea corpurilor fero- și ferimagnetice este procesul de aliniere a momentelor magnetice elementare după direcția câmpului magnetic aplicat. Ea se realizează, într-o primă etapă, prin creșterea domeniilor Weiss, a căror orientare este mai apropiată de direcția câmpului magnetic exterior, creștere ce echivalează cu deplasarea pereților Bloch. Din cauza defectelor de rețea, a impurităților și a anizotropiei magnetice, energia cedată peretelui Bloch pentru a se deplasa variază aleatoriu de-a lungul materialului, prezentând maxime și minime. La anularea câmpului, peretele Bloch tinde să revină în poziția inițială, de echilibru stabil. Dacă magnetizarea inițială a fost mică, energia proprie a peretelui permite revenirea lui la starea inițială, fenomenul de magnetizare fiind reversibil. La o magnetizare mai puternică, peretele Bloch nu mai revine în poziția inițială deoarece energia lui proprie este insuficientă pentru a escalada maximele de energie întâlnite și deplasarea lui fiind ireversibilă, materialul rămâne cu o magnetizație remanentă la anularea câmpului exterior.

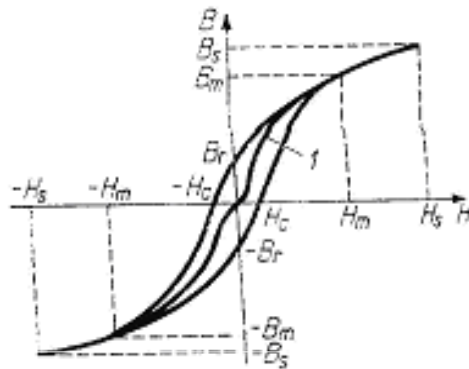


Fig. 5.9 Variația $B = f(H)$ la materialele magnetice

Din punct de vedere macroscopic, materialele magnetice se caracterizează prin curbele de magnetizare $B = f(H)$, caracteristici care au o formă asemănătoare cu dependența $M = f(H)$.

La magnetizarea în curent continuu, crescând câmpul magnetic de la zero la valoarea maximă H se parcurge curba de primă magnetizare (curba 1 din figura 5.9). Scăzând curentul, deci câmpul aplicat, se parcurge o curbă descendentă, care

însă, nu se suprapune peste curba 1. La anularea câmpului, materialul nu se demagnetizează total ci rămâne cu o inducție remanentă B_r . Pentru demagnetizare, se inversează sensul curentului și se crește, crescând deci câmpul magnetic în sens negativ, până la anularea inducției în material, care se obține pentru valoarea H_c (câmp magnetic coercitiv). Prin variația ciclică a câmpului, în sens pozitiv și negativ, se obține ciclul de histerezis din figura 5.9.

În câmpuri magnetice variabile se obțin curbe de histerezis, determinate de dependența neliniară și neunivocă dintre inducție și câmp. Principalele mărimi caracteristice ale curbelor de magnetizare sunt: inducția și câmpul maxim (B_m, H_m), inducția și câmpul de saturație (B_s, H_s), inducția remanentă (B_r) și câmpul coercitiv (H_c).

Caracterizarea materialului magnetic în jurul unei anumite stări definite printr-o pereche de valori B_0, H_0 (coordonatele punctului P de pe curba de magnetizare), se face prin următoarele permeabilități magnetice relative (fig. 5.10):

- permeabilitatea relativă statică (absolută):

$$\mu_{rst} = \frac{B_0}{\mu_0 H_0} \quad (5.8)$$

Această permeabilitate relativă variază cu H, atingând un maxim și tinzând apoi spre 1 când $H \rightarrow \infty$ (fig. 5.11).

- permeabilitatea relativă diferențială:

$$\mu_{rdif} = \lim_{\Delta H > 0} \left(\frac{\Delta B}{\mu_0 \Delta H} \right) = \left. \frac{\partial B}{\mu_0 \partial H} \right|_{T=ct} \quad (5.9)$$

se obține pentru deplasarea pe curbă în sensul direct și este proporțională cu panta curbei de magnetizare față de axa absciselor.

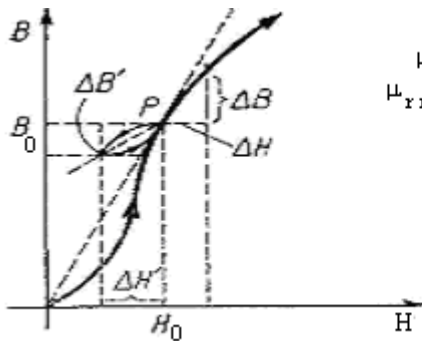


Fig. 5.10. Definierea permeabilităților relative.

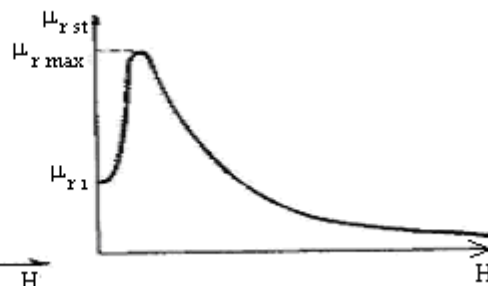


Fig. 5.11. Variația permeabilității relative diferențiale cu intensitatea câmpului

magnetic.

- permeabilitatea relativă reversibilă:

$$\mu_{rev} = \lim_{\Delta H' \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta B'}{\mu_0 \Delta H'} \right)_{\text{ciclureversibil}} \quad (5.10)$$

Ea este proporțională cu panta ciclului de histerezis reversibil minor al cărui vârf se află în punctul de coordonate B_0, H_0 și de regulă, $\mu_{r.rev} < \mu_{r.dif.}$ fiind maximă la $H = 0$, când se confundă cu permeabilitatea relativă inițială.

- permeabilitatea relativă inițială:

$$\mu_{ri} = \lim_{\Delta H \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta B}{\mu_0 \Delta H} \right)_{\text{la } H_0=0, B_0=0} \quad (5.11)$$

- permeabilitatea relativă dinamică

$$\mu_{rdin} = \frac{\Delta B}{\mu_0 \Delta H} \quad (5.12)$$

se definește în regimul netaționar și este proporțională cu panta medie a ciclului de histerezis descris, în jurul punctului caracteristic stării considerate. Datorită vâscozității magnetice, determinată de faptul că în regim netaționar variațiile inducției nu pot urmări instantaneu variațiile câmpului, permeabilitatea dinamică are valori mai mici decât cele din regim staționar, care scad cu creșterea frecvenței.

- permeabilitatea relativă permanentă :

$$\mu_{rper} = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{\Delta B}{\Delta H} \quad (5.13)$$

Ea este proporțională cu panta unui ciclu de histerezis a cărui bază se află pe curba de demagnetizare a unui magnet permanent (porțiunea din cadranul II a ciclului de histerezis – fig. 5.12). Prezintă importanță în cazul magneților permanenți supuși unei magnetizări suplimentare.

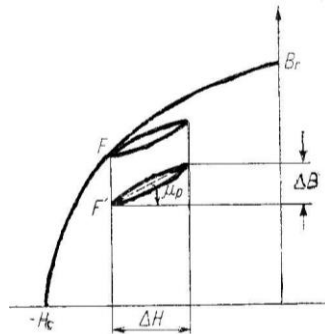


Fig. 5.12. Definierea permeabilității permanente

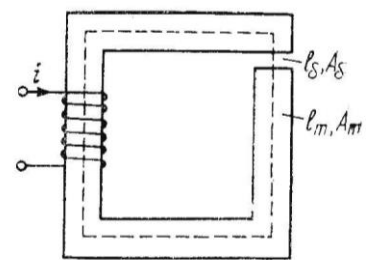


Fig. 5.13. Miez magnetic cu întrefier

- permeabilitatea relativă efectivă caracterizează circuitele magnetice realizate dintr-o bobină în care se află un miez magnetic cu întrefier (fig. 5.13). Ea se definește cu relația:

$$\mu_{r.ef.} = \frac{\mu_r}{1 + \mu_r \sigma}, \quad (5.14)$$

unde μ_r este permeabilitatea relativă a materialului magnetic și σ este factorul de demagnetizare, dependent de caracteristicile întrefierului l_δ și A_δ :

$$\sigma = \frac{l_\delta}{l} \cdot \frac{A_m}{A_\delta} \quad (5.15)$$

Dacă $\sigma \cdot \mu_r \gg 1$, ceea ce se obține prin creșterea întrefierului, $\mu_{ref} = 1/\sigma$, deci inductivitatea bobinei ($L = \mu_{ref} L_0$) devine independentă de natura materialului magnetic. Nu se justifică deci utilizarea unui material magnetic cu proprietăți bune în cazul miezurilor magnetice cu întrefier mare.

5.3.4 Pierderi în materialele magnetice

În materialele magnetice, supuse acțiunii unor câmpuri magnetice constante sau variabile, se dezvoltă căldură, deci apar pierderi de putere activă datorită fenomenelor fizice ce se produc în ele.

Principalele categorii de pierderi magnetice sunt: *pierderi prin curenți turbionari*, *pierderi prin histerezis*, *pierderi prin magnetizare și pierderi prin rezonanță magnetică*.

5.3.4.1 Permeabilitatea relativă complexă

Într-un material fero- sau ferimagnetic real, introdus într-un câmp electromagnetic exterior variabil, datorită fenomenelor de magnetizare și a pierderilor de putere activă, inducția magnetică urmărește cu un anumit defazaj temporar variațiile câmpului magnetic aplicat. În acest caz, interacțiunea dintre câmp și substanță poate fi caracterizată în medii liniare prin introducerea noțiunii de *permeabilitate complexă*:

$$\underline{\mu}_r = \mu_r' - j\mu_r'' = \frac{\underline{B}}{\mu_0 \underline{H}} \quad (5.16)$$

mărime care caracterizează materialul atât din punctul de vedere al magnetizării, cât și din punctul de vedere al pierderilor de putere activă.

Pentru a vedea semnificația părții reale μ'_r și imaginare μ''_r a permeabilității relative complexe se consideră o bobină ideală, cu inductivitatea L_0 în vid, în care se introduce un miez magnetic închis, fluxul de dispersie fiind considerat nul. În regim sinusoidal, impedanța la bornele bobinei va fi:

$$\underline{Z} = j\omega\mu_r L_0 = j\omega(\mu'_r - j\mu''_r)L_0 = \mu''_r\omega L_0 + j\omega\mu'_r L_0. \quad (5.17)$$

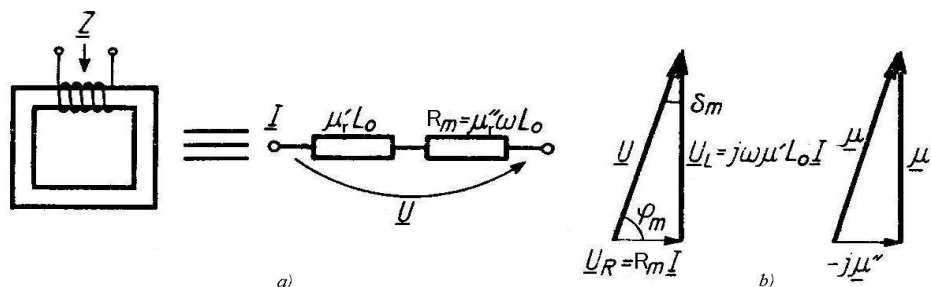


Fig. 5.14 Bobină cu miez magnetic: a - schema echivalentă; b - diagrama fazorială

Deci, o bobină reală este echivalentă cu o schemă serie formată dintr-o bobină fără pierderi, de inductivitate $L_m = \mu'_r L_0$ și o rezistență de pierderi $R_m = \mu''_r \omega L_0$ (fig. 5.14). Rezultă că μ'_r este permeabilitatea propriu-zisă a materialului, caracterizând starea de magnetizație a acestuia, iar μ''_r caracterizează pierderile de putere activă din material. Unghiul δ_m (complementul unghiului de defazaj φ) se numește *unghi de pierderi*. Tangenta unghiului de pierderi $\text{tg}\delta_m$ este o mărime de material, cunoscută și sub denumirea de *factor de pierderi* și se definește cu relația:

$$\text{tg}\delta_m = \frac{P_a}{P_r} = \frac{U_R I}{U_L I} = \frac{R_m I^2}{\omega L_m I^2} = \frac{\mu''_r \omega L_0}{\mu'_r \omega L_0} = \frac{\mu''_r}{\mu'_r} \quad (5.18)$$

Inversul tangentei unghiului de pierderi se numește *factor de calitate* a materialului magnetic:

$$Q_m = \frac{1}{\text{tg}\delta_m} = \frac{\mu'_r}{\mu''_r}, \quad (5.19)$$

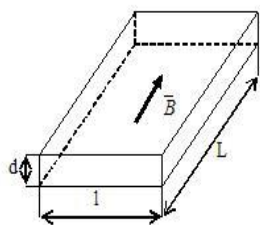
și este - la materialele magnetice - mai des utilizat decât cel de pierderi.

5.3.4.2. Categoriile de pierderi magnetice

Așa cum s-a arătat, pierderile de putere activă se pot clasifica în patru categorii:

A. Pierderi prin curenți turbionari. Aceste pierderi se datorează curenților electrici (numiți turbionari) care sunt generați de tensiunile electromotoare induse în orice mediu cu rezistivitate finită, plasat într-un câmp magnetic variabil în timp, în conformitate cu legea inducției electromagnetice.

Într-o toală, a cărei grosime d este mai mică decât adâncimea de



pătrundere δ a câmpului magnetic alternativ longitudinal (de frecvență f și inducție maximă B_{\max}), în regim armonic de joasă frecvență, care să determine o adâncime de pătrundere mai mare decât grosimea tolei, în ipoteza că celelalte dimensiuni ale tolei sunt mult mai mari decât grosimea ei (fig. 5.15), pierderile specifice pe unitatea de masă se pot calcula cu relația:

Fig. 5.15 Schemă de calcul a curenților turbionari într-o toală

$$p_T = \frac{\pi^2}{6\rho\gamma} d^2 f^2 B_{\max}^2 \quad [W/kg] \quad (5.20)$$

unde ρ este rezistivitatea tolei, în $[\Omega \cdot m]$ și γ - densitatea de volum a masei tolei, în $[kg/m^3]$.

Curenții turbionari induși sunt astfel dirijați încât prin câmpul ce-l produc se opun câmpului aplicat, micșorându-l treptat spre mijlocul tolei. În acest mod secțiunea efectivă a materialului și partea reală a permeabilității relative μ_r' scad. Totodată, din cauza pierderilor de putere activă, se modifică și μ_r'' .

Componentele permeabilității complexe variază și cu frecvența, modul de variație fiind redat în figura 5.16.

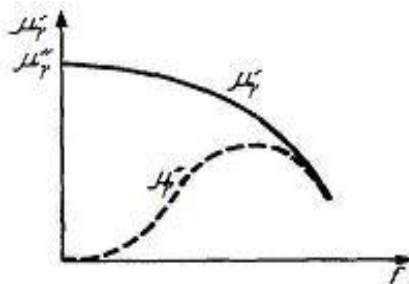


Fig. 5.16 Variația componentelor permeabilității complexe cu frecvența

De regulă, materialele magnetice cu pierderi semnificate prin curenți turbionari, se utilizează până la frecvențe la care μ_r' este suficient de mare și pierderile sunt mici. Factorul de pierderi calculat în domeniul frecvențelor joase [26] are expresia:

$$\operatorname{tg} \delta_m = \frac{\mu_r''}{\mu_r'} = \mu_{rrev} \frac{d^2 \pi \mu_0 \sigma}{6} \quad (5.21)$$

Din relațiile (5.20) și (5.21) rezultă și modalitățile de reducere a

pierderilor prin curenți turbionari:

- micșorarea grosimii d a tolei;

- creșterea rezistivității ρ (scăderea conductivității electrice σ) a metalului (prin utilizarea unor aliaje cu rezistivitate mărită și a materialelor feromagnetice).

B. Pierderi prin histerezis. Pierderile prin histerezis sunt proporționale cu energia cheltuită de câmpul magnetic exterior pentru realizarea unui ciclu de histerezis w_H , energie care, la rândul ei, este proporțională cu aria ciclului de histerezis (conform *teoremei lui Warburg*):

$$w_H = \oint_{\text{ciclu}} HdB = abS_H \quad [J/m^3], \quad (5.22)$$

unde: S_H este aria planimetrată a ciclului de histerezis, în $[m^2]$; a - scara abscisei ciclului, în $[A/m^2]$; b - scara ordonatei ciclului, în $[T/m]$.

Pierderile specifice pe unitatea de masă prin histerezis, vor fi:

$$p_H = \frac{w_H}{\gamma} f \quad [W/kg]. \quad (5.23)$$

Relația experimentală a lui *Steinmetz* permite o aproximare corectă din punct de vedere tehnic a acestor pierderi, înlăturând dificultatea de determinare a ariei ciclului de histerezis. Expresia ei este:

$$w_H = \eta B_{\max}^n, \quad (5.24)$$

unde η este constanta lui Steinmetz și $1,6 < n < 2$ este coeficientul lui Steinmetz, ambele fiind constante de material determinate pe cale experimentală pentru fiecare tip de material magnetic.

Aceste pierderi sunt influențate de compoziția chimică a materialului, de procesul de elaborare, de tratamentele termice, solicitările și prelucrările mecanice etc.

Componentele permeabilității relative complexe variază liniar cu intensitatea câmpului magnetic maxim și nu depind de frecvență.

Pentru reducerea pierderilor prin histerezis se realizează materiale (aliaje) cu ciclu de histerezis îngust și cu conținut mic de impurități (câmp coercitiv cât mai mic).

C. Pierderi prin magnetizare. Datorită vâscozității magnetice, între inducția magnetică și intensitatea câmpului magnetic există – în regim armonic – un defazaj temporar, ceea ce face ca permeabilitatea relativă să aibă un caracter complex.

Rezultatele calculului privind componentele permeabilității complexe sunt analoge, din punct de vedere formal, cu cele din cazul materialelor cu polarizare de orientare. La frecvențe joase, inducția poate urmări ușor câmpul, defazajul temporar este mic și μ_r' va fi mare iar μ_r'' mic (pierderi neglijabile). Cu creșterea frecvenței, inducția urmărește mai greu variația

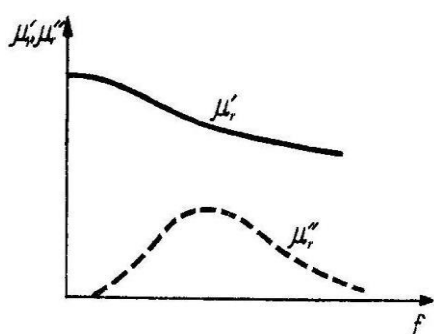


Fig. 5.17 Dependența de frecvență a componentelor permeabilității complexe

câmpului astfel că μ_r' descrește, tinzând către o valoare staționară în domeniul frecvențelor înalte. Defazajul temporar dintre inducție și câmp (deci și μ_r'') atinge un maxim în domeniul frecvențelor intermediare; la frecvențe foarte ridicate inducția nu mai poate urmări variațiile foarte rapide ale câmpului și pierderile active scad (μ_r'' scade și el). Dependența de frecvență a componentelor permeabilității complexe este redată în figura 5. 17.

D. Pierderi prin rezonanță magnetică. La introducerea unui material magnetic într-un câmp magnetic continuu \bar{H}_0 , momentele magnetice elementare capătă o mișcare de precesie în jurul unei axe paralele cu direcția lui \bar{H}_0 (fig. 5.18). Precesia se desfășoară cu pulsația Larmor $\omega = \gamma H_0$ (γ fiind coeficientul girometric al materialului) și este amortizată datorită interacțiunilor cu rețeaua cristalină a materialului.

Dacă însă, se stabilește un câmp magnetic alternativ \bar{H}_a , perpendicular pe \bar{H}_0 a cărui pulsație este egală cu pulsația Larmor, acesta anulează amortizarea, întreținând mișcarea de precesie pe seama unui consum suplimentar de energie din parte lui. Acest fenomen se numește rezonanță magnetică iar energia furnizată de câmpul alternativ, transformată în căldură, constituie pierderile de putere prin rezonanță magnetică.

Desigur, pierderile sunt maxime la frecvența de rezonanță (Larmor), variațiile lui μ_r' , μ_r'' cu frecvența fiind ilustrate în figura 5.19.

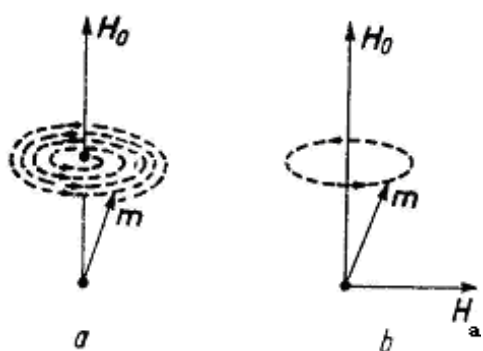


Fig. 5.18. Mișcarea de precesie a momentului magnetic m_p în jurul direcției câmpului magnetic continuu: a - mișcare amortizată; b - mișcare neamortizată.

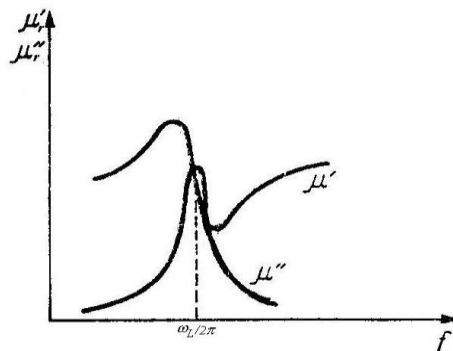


Fig. 5.19 Dependența de frecvență a permeabilității complexe în cazul materialelor cu pierderi prin rezonanță magnetică

Câmpul \bar{H}_0 poate fi și de natură internă, determinat de anizotropia magnetocristalină, deci un câmp alternativ extern poate provoca rezonanța magnetică. Frecvența Larmor fiind de ordinul sutelor de MHz, pierderile active produse prin acest fenomen se iau în considerare doar la materialele care funcționează în domeniul respectiv de frecvență (la ferite).

E. Pierderi totale în materialele magnetice. Pierderile magnetice totale dintr-un material reprezintă suma celor patru categorii de pierderi, ponderea lor fiind diferită în funcție de natura materialului (fero- sau ferimagnetic), domeniul de frecvență, grosimea tolelor și punctul de funcționare de pe curba de magnetizare.

În cazul materialelor feromagnetice (care pot funcționa numai în domeniul frecvențelor joase deoarece, având rezistivitate mică, la frecvențe mai mari, cresc foarte mult pierderile prin curenți turbionari) sunt preponderente pierderile prin curenți turbionari p_{ct} și cele prin histerezis p_H . Calculul analitic al sumei celor două pierderi fiind dificil și rezultatele fiind aproximative, de regulă se dă caracteristica experimentală $p_{ct} + p_H = f(B)$, la frecvență constantă (fig. 5.20), sau, cel puțin, valorile pierderilor la 1 T (p_1) și la 1,5 T ($p_{1.5}$). Se poate da și variația lui p_t în funcție de frecvență la câmp constant (fig. 5.21).

La materialele ferimagnetice, în funcție de domeniul de frecvență în care sunt utilizate, pierderile totale sunt suma primelor trei categorii de pierderi sau a tuturor celor patru categorii. La aceste materiale se dau curbele experimentale de variație a lui μ_r' , μ_r'' și a factorului relativ de pierdere $\text{tg } \delta_m/\mu_i$ cu frecvența (fig. 5.22).

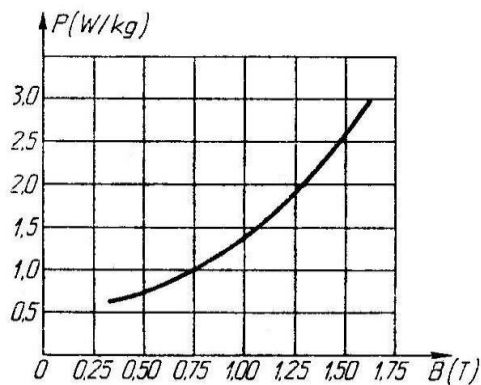


Fig. 5.20 Variația pierderilor specifice totale funcție de inducție la 50 Hz, pentru tablă (de 0,35 mm) laminată la cald.

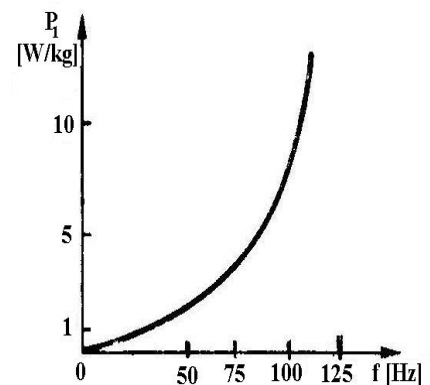


Fig. 5.21 Variația pierderilor specifice totale funcție de frecvență, la 1[T], pentru tablă (de 0,35 mm) laminată la cald.

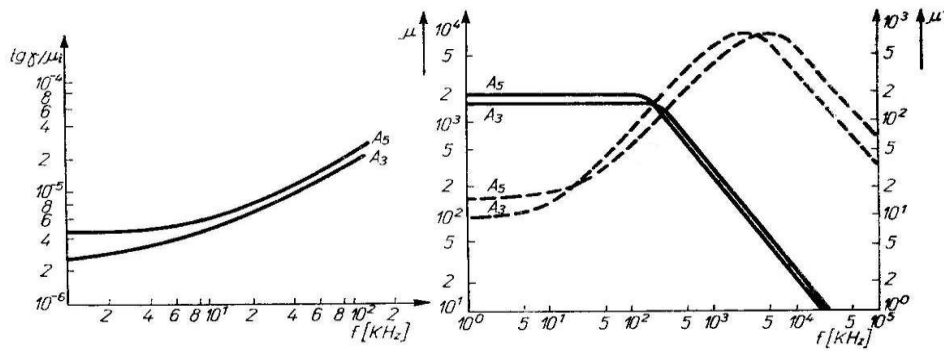


Fig. 5.22. Variația lui $\operatorname{tg} \delta_m/\mu_i$ și μ_r' , μ_r'' cu frecvența pentru Elferit A_3 și A_5

5.4 Influența diversilor factori asupra proprietăților magnetice

Principalii factori care influențează caracteristicile magnetice ale materialelor sunt: temperatura, impuritățile, frecvența, sollicitările mecanice, tratamentele termice, câmpurile exterioare și radiațiile.

5.4.1 Influența temperaturii

Mișcarea de agitație termică a particulelor, intensificată prin creșterea temperaturii, îngreunează orientarea momentelor magnetice spontane ale domeniilor Weiss în direcția câmpului exterior și, în consecință, magnetizația scade cu creșterea temperaturii (fig. 5.4) până la temperatura Curie T_C (care este o constantă de material); la depășirea acestei temperaturi, domeniile de magnetizare spontană dispar și materialul devine paramagnetic, magnetizația scăzând în continuare hiperbolic cu temperatura (conform legii Curie – Weiss).

Temperaturile Curie ale principalelor elemente feromagnetice sunt: Fe 770°C, Ni 362°C, Co 1127°C, Gd 17°C.

Permeabilitățile relative variază neliniar atât cu temperatura, cât și cu câmpul, motiv pentru care este dificilă definirea unui coeficient general de temperatură al permeabilității. De regulă, se definește *coeficientul de temperatură al permeabilității inițiale*, care are o valoare, aproximativ, constantă în domeniul 0 ... 70°C:

$$\alpha_{\mu_{ri}} = \frac{1}{\mu_{ri}} \cdot \frac{d\mu_{ri}}{dT} \quad [K^{-1}] \quad (5.25)$$

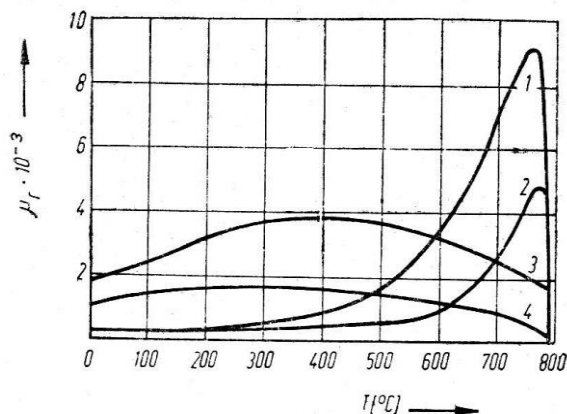


Fig. 5.23 Variația permeabilității fierului cu temperatura

În cazul materialelor magnetice moi, apare o variație neliniară a permeabilității magnetice cu temperatura (fig. 5.23) și o reducere a inducției de saturație iar la cele dure creșterea temperaturii determină o scădere a energiei magnetice înmagazinate și a inducției remanente.

5.4. 2 Influența impurităților

Impuritățile influențează în mod esențial proprietățile materialelor magnetice, aceasta fiind benefică sau dăunătoare, în funcție de tipul materialului magnetic (dur sau moale).

O serie de elemente sau substanțe - cum sunt carburile metalelor, metalele neferomagnetice etc. - deformează rețeaua cristalină, producând tensiuni mecanice interne, care duc atât la îngreunarea deplasării pereților Bloch, (în special la revenirea lor în poziția inițială) și ca urmare, crește atât inducția remanentă cât și câmpul coercitiv, efect favorabil în cazul materialelor pentru magneți permanenți.

Alte impurități ca: Ni, Co, Cr, Mo în fier, duc la creșterea permeabilității magnetice (Ni), scăderea câmpului coercitiv (Cr, Mo), mărirea inducției de saturație (Co), efecte favorabile materialelor magnetice moi utilizate în construcția miezurilor magnetice.

Siliciul în aliaj cu fierul mărește rezistivitatea electrică a materialului, ducând la scăderea pierderilor prin curenți turbionari.

5.4.3 Influența frecvenței

Influența frecvenței asupra permeabilității relative inițiale μ_{ri} a materialelor magnetice se manifestă numai peste o frecvență critică:

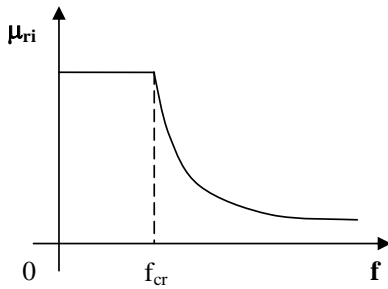


Fig. 5.24 Variația permeabilității relative inițiale funcție de frecvență

$$f_{cr} \approx \frac{4}{\pi\mu_0\mu_{ri}\sigma d^2}, \quad (5.26)$$

unde σ este conductivitatea electrică a tolei iar d este grosimea ei.

Până la f_{cr} permeabilitatea inițială este practic constantă. Cu creșterea frecvenței, atât datorită „vâscozității magnetice”, cât și din cauza pierderilor de putere activă, permeabilitatea inițială scade (curbele de histerezis sunt tot mai înclinate. Peste

această frecvență, permeabilitatea inițială scade proporțional cu $1/\sqrt{f}$ (fig. 5.24).

5.4.4 Influența altor factori

Sub acțiunea *forțelor mecanice* aplicate corpurilor, în ele apar tensiuni interne care frânează deplasarea pereților Bloch și duc la scăderea permeabilității și a inducției magnetice. Și *solicitățile dinamice*, șocurile și vibrațiile produc o reducere a proprietăților magnetice ale materialelor (în special ale celor magnetic dure). *Tratamentele termice* se realizează pentru înlăturarea efectelor negative (diminuarea caracteristicilor magnetice) ale operațiilor tehnologice de ștanțare, tăiere, îndoire, găurire etc. la care sunt supuse materialele magnetice. În urma acestor tratamente se elimină tensiunile interne din corp, se reface structura cristalină, permeabilitatea și inducția cresc, iar câmpul coercitiv, rezistivitatea și pierderile prin histerezis scad.

Câmpurile magnetice exterioare determină o reducere a magnetizației corpurilor, în special a magneților permanenți.

Radiațiile nu modifică proprietățile magnetice, dar magneții supuși unor astfel de solicitări pot deveni radioactivi.

5.5 Prezentarea materialelor magnetice

5.5.1 Clasificarea materialelor magnetice

Materialele magnetice pot fi clasificate după forma ciclului de histerezis (moi și dure), după funcția pe care o îndeplinesc (materiale pentru

miezuri magnetice, pentru magneți permanenți, pentru funcții neliniare și parametrice, pentru înregistrarea magnetică a informației, pentru traductoare piezo- sau piromagnetice etc) și după coeficientul de înclinare a ciclului de histerezis.

Materialele magnetic moi se demagnetizează la încetarea acțiunii câmpului magnetic exterior, fiind caracterizate prin ciclu de histerezis îngust, inducție de saturatie și permeabilitate magnetică mari și, în general, câmp coercitiv mic.

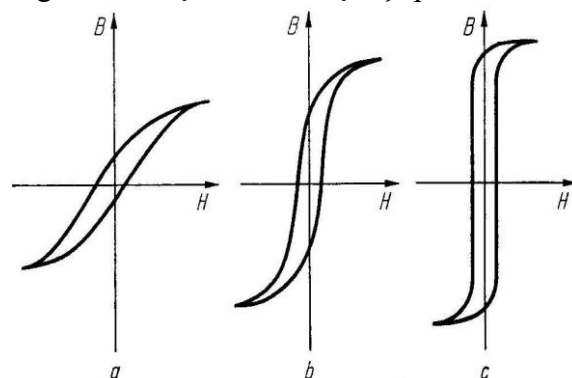


Fig. 5.25 Cicluri de histerezis ale materialelor magnetic moi cu: a - $k < 0,5$; b - $0,5 < k < 0,8$; c - $k > 0,8$

Utilizările acestor materiale sunt legate de caracteristicile ciclului de histerezis definite prin coeficientul lui de înclinare: $k = B_r / B_m$. Cele cu ciclul de histerezis înclinat ($k < 0,5$ – fig. 5.25,a) au permeabilitatea magnetică mică și constantă în raport cu câmpul, fiind utilizate la confecționarea miezurilor bobinelor de inductivitate constantă. Materialele cu $0,5 < k < 0,8$ (fig. 5.25,b) au permeabilitatea magnetică mare și se utilizează la fabricarea miezurilor mașinilor și aparatelor electrice, a transformatoarelor, a electromagneților etc. Materialele cu $k > 0,8$ (fig. 5.25,c) au ciclul de histerezis dreptunghiular și, de aceea, sunt utilizate pentru fabricarea miezurilor de comutație și memorie.

Materialele magnetic dure rămân magnetizate după încetarea acțiunii câmpului magnetic exterior și se caracterizează prin ciclu de histerezis lat, inducție remanentă și câmp coercitiv mare.

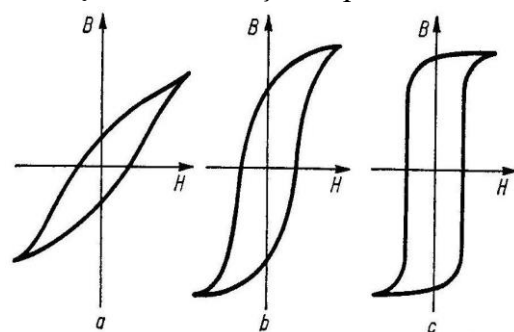


Fig. 5.26 Cicluri de histerezis ale materialelor magnetic dure cu: a - $k < 0,4$; b și c - $k > 0,4$

Utilizările acestor materiale sunt, de asemenea, legate de coeficientul de înclinare al ciclului de histerezis. Materialele care au $k < 0,4$ (fig. 5.26,a) se utilizează pentru înregistrarea magnetică a informației; cele cu $k > 0,4$ (fig. 5.26,b și 5.26,c) se utilizează la fabricarea magneților permanenți.

Trebuie remarcat că denumirea de material magnetic dur sau moale se referă îndeosebi la caracteristicile magnetice și nu la duritatea fizică a materialului. Unele aliaje utilizate în construcția magneților permanenți au o duritate mai mică decât o serie de fonte și oțeluri utilizate ca materiale magnetic moi.

5.5.2 Materiale magnetic moi pentru miezuri magnetice

Principalele categorii de materiale utilizate pentru realizarea miezurilor magnetice sunt: materialele feromagnetice moi (fierul, oțeluri, fonte, aliaje ale fierului), feritele și materialele magnetodielectrice.

5.5.2.1 Materiale feromagnetice moi

Fierul. În funcție de gradul de puritate se disting trei sorturi de fier moale (pur, extrapur și tehnic pur).

Fierul pur (puritate 99,9 ... 99,98%) și cel extrapur (99,99%) se obțin în condiții și prin procese tehnologice speciale și - fiind foarte scumpe - sunt utilizate numai în cazuri speciale. *Fierul tehnic pur* (99,5 ... 99,9%) este cunoscut sub diferite denumiri: *Armco, suedez, moale, magnetic* etc. Diferitele sorturi de fier moale sunt utilizate în special în curent continuu, în construcția pieselor polare, la juguri pentru electromagneți, miezuri pentru bobine, relee, la ecrane magnetice, armături de difuzoare cu magneți permanenți, aparate de măsură etc.

Fierul electrolitic este constituit din particule alungite, atinge un grad mare de puritate și se utilizează mai ales la fabricarea aliajelor Alni și Alnico. *Fierul carbonil* este constituit din particule sferice și se utilizează la confecționarea miezurilor magnetice ce funcționează la frecvențe ridicate, a magneților sinterizați etc.

Oțelurile și fontele au caracteristici magnetice slabe (în special H_c mare) dar sunt ieftine și cu caracteristici mecanice bune și sunt utilizate acolo unde sunt solicitări mecanice deosebite.

Aliajele fier – siliciu sunt materialele cele mai folosite, în domeniul frecvențelor joase, deoarece au caracteristici magnetice bune și preț de cost redus.

Siliciul are rolul de a mări rezistivitatea aliajului, de scădere a câmpului coercitiv și de diminuare a fenomenului de îmbătrânire a materialului. Datorită creșterii fragilității aliajului odată cu creșterea

procentului de siliciu, acesta se limitează la 4,5% la aliajele laminate la cald și la 3,3 % la cele laminate la rece. De asemenea, siliciul reduce inducția de saturație.

Circuitele magnetice se realizează, în general, din table laminate, din care se obțin, prin ștanțare, tole de forma și dimensiunile dorite.

Aliajele Fe – Si laminate la cald conțin între 0,5 și 4,5% Si, au grosimi între 0,35 și 0,5 mm și pot fi considerate ca materiale izotrope (anizotropia este foarte redusă). Tablele slab aliate (până la 1% Si) au inducția la saturație mare iar cele supraaliate (peste 4% Si) au pierderi specifice reduse.

Pentru reducerea pierderilor prin curenți turbionari, tolele se izolează cu hârtie (de grosimi între 0,013 și 0,3 mm), prin oxidare superficială (pentru inducții care nu depășesc 1,4 T, după care oxidul, datorită încălzirii, devine semiconductor), prin fosfatare (când se obține o peliculă de mare rezistivitate și grosime mică) sau prin lăcuire (cu lacuri pe bază de rășini sintetice). La utilizarea lacurilor pe bază de rășini epoxidice, se obțin miezuri compacte care nu mai necesită piese de strângere. Caracteristicile tolelor laminate la cald, de producție indigenă, sunt prezentate în anexa A 4.

Aliajele Fe – Si laminate la rece au grosimi între 0,03 și 0,5 mm, cele de grosimi mai mici putând fi utilizate pentru miezurile bobinelor care lucrează până în domeniul kHz-ilor.

Prin laminare la rece materialul capătă o anizotropie indusă (fig. 5.7) care determină proprietăți magnetice superioare (inducția de saturație peste 2T) pe direcția laminării la cea cu structură Goss sau pe aceasta și pe direcțiile perpendiculare pe ea, la tabla cu „structură în cuburi”. Anizotropia este influențată negativ prin prelucrări mecanice și prin îndoirea tablei, motiv pentru care, după prelucrarea tolelor, ele trebuie supuse unui tratament termic de recoacere care să le restabilească proprietățile magnetice inițiale. Izolarea tolelor se face cu oxizi ceramici (carlit), prin fosfatare sau cu lacuri pe bază de rășini sintetice. Straturile izolante fiind foarte netede și subțiri, miezurile confecționate din table laminate la rece sunt caracterizate prin valori mari ale factorului de umplere (0,96 ... 0,97).

Aliajele fier - siliciu - aluminiu (alsifer) cu un conținut de 5,5% Al, 7,5% Si și 87% Fe, au coeficientul de variație al rezistivității cu temperatura negativ și proprietăți magnetice foarte bune (comparabile cu ale permalloyului). Se prelucrează numai prin sinterizare și este utilizat la confecționarea torurilor pentru bobinele de pupinizare și la ecrane magnetice.

Aliajul Fe – Al cu 16% Al și 84% Fe are caracteristici magnetice remarcabile ($\mu_{\text{rmax}} = 10^5$, $H_c \leq 2$ A/m, $B_s = 0,8$ T și $\rho = 1,44$ $\mu\Omega\text{m}$), poate fi forjat și laminat și se poate cositori. La un conținut de 13% Al, aliajul are un pronunțat caracter magnetostrictiv. Se utilizează în construcția transformatoarelor de impuls de medie frecvență, a magnetofonelor etc.

Aliaje Fe – Ni (de tip permalloy) au proprietăți puternic dependente de proporția substanțelor din compoziție și de tratamentul termic la care au fost supuse. În funcție de conținutul de nichel, aliajele Fe-Ni pot fi, cu conținut de nichel în:

- bogat (65 ... 85% Ni);
- mediu (45 ... 50% Ni);
- mic (35 ... 36% Ni).

Aliajele cu conținut mare de nichel au permeabilitatea foarte mare (valoarea maximă se obține pentru 78,5% Ni), câmp coercitiv și pierderi prin histerezis reduse dar și inducția la saturație și raportul $k = B_r / B_s$ sunt, relativ, mici ($B_s \cong 1\text{T}$). Sunt maleabile, ductile și pot fi laminate până la dimensiuni foarte reduse, ceea ce le face apte de a fi utilizate în înaltă frecvență. Sunt cunoscute sub diferite denumiri comerciale: permalloy, superpermalloy, Mu – metal, Mo – permalloy etc. Dacă se elimină impuritățile nefavorabile (O, C) se obțin aliaje cu constante de magnetostricțiune și anizotropie nule. Prin adaos de Mo și Cr (până la 5%) și siliciu (până la 3%) se crește rezistivitatea și permeabilitatea magnetică. Aliajele din această grupă sunt utilizate pentru miezuri de transformatoare cu proprietăți deosebite, transformatoare de impulsuri, ecrane magnetice etc.

Aliajele cu conținut mediu de nichel au inducția de saturație mai mare dar permeabilitatea mai mică și câmpul coercitiv mai mare. Aceste aliaje sau cele cu un adaos de (8 ... 10) % Cu, supuse unor laminări succesive combinate cu tratament termic, primesc o anizotropie indusă în direcția laminării, care le determină o curbă de magnetizare, relativ, puțin înclinată și o permeabilitate, relativ, constantă cu variația câmpului magnetic aplicat. Aceste materiale, denumite *izoperm*, se utilizează pentru miezurile bobinelor de inductivitate constantă în raport cu câmpul, până la intensități ale acestuia de (100 ... 200) A / m.

Aliajele cu conținut mic de nichel au permeabilitatea magnetică mică în comparație cu cele din prima grupă dar rezistivitatea este mare și pierderile prin curenți turbionari mici.

Aliajele Fe – Co sunt aliaje cu 35 ... 50% Co și au cele mai mari valori ale inducției de saturație mare (până la 2,5 T). Cu creșterea conținutului de cobalt crește, însă, fragilitatea și duritatea aliajului.

Permendurul (cu 50% Co) este dur și casant - practic, neprelucrabil (nu se poate prelucra decât prin rectificare). Prin adaos de 2% V aliajul devine laminabil până la dimensiuni reduse, păstrându-și proprietățile magnetice. Poartă diferite denumiri comerciale (Permendur, Vacoflux, Hyperm etc) și se utilizează în construcția miezurilor pentru electromagneți, a membranelor telefonice, a amplificatoarelor magnetice etc.

Aliajele Fe – Co – Ni (numite perminvar) au, în urma unor tratamente speciale (o cristalizare incompletă, laminare la rece, reduceri de secțiune etc.), valori constante ale permeabilității magnetice cu câmpul până la valori de mii de A / m, fiind superioare izopermului atât din punctul de vedere al valorii permeabilității cât și din cel al păstrării ei constante, în limite mai largi de variație a câmpului. Se utilizează la fabricarea transformatoarelor de curent cu eroare constantă, a aparatelor acustice, a bobinelor Pupin etc.

5.5.2.2 Ferite magnetic moi

Proprietăți ale feritelor. Feritele sunt compuși ai oxidului de fier și ai oxizilor altor metale bivalente, având formula generală $M^{2+}Fe_2^{3+}O_4^{2-}$. Fiind amestecuri de oxizi, rezistivitatea lor este cu mult mai mare decât a feromagneticeilor ($\rho = 10 \dots 10^8 \Omega \cdot m$), fiind, deci, materiale semiconductoare sau chiar izolante și au pierderi prin curenți turbionari mici. Prezintă o stabilitate mare a caracteristicilor magnetice (permeabilitatea se menține constantă până la câteva sute de MHz), influențate sensibil, însă, de prezența câmpurilor de curent continuu când permeabilitatea scade mult.

Datorită existenței domeniilor Weiss de magnetizare spontană, feritele au proprietăți asemănătoare feromagneticeilor: sunt neliniare, prezintă ciclu de histerezis magnetic, $\mu_r \gg 1$, magnetizația lor scade cu temperatura. Spre deosebire de aceștia însă, au valori mici ale inducției de saturație ($B_s < 0,6 \text{ T}$), ale temperaturii Curie ($T_c = 60 \dots 450^0 \text{ C}$) și ale permeabilității magnetice inițiale ($\mu_{ri} \leq 15000$).

În funcție de compoziția chimică și tratamentele aplicate se obțin ferite cu proprietăți ce diferă foarte mult, și anume: cu permeabilitate magnetică mare, cu constante de anizotropie și magnetostricțiune foarte mici sau foarte mari, cu ciclu de histerezis dreptunghiular etc.

Feritele sunt dure și casante, neputându-se prelucra mecanic decât prin rectificare. De aceea ele se fabrică sub formă de miezuri masive prin sinterizare. Caracteristica magnetică principală a acestor miezuri o

reprezintă factorul de inductanță A_L (exprimat în nH/sp²) – de fapt o permeanță specifică a miezului.

Ferite magnetic moi pentru miezuri. Domeniul de utilizare al feritelor moi este cel al frecvențelor înalte și foarte înalte, fiind folosite la confecționarea miezurilor de bobine, antene, transformatoare de impuls, amplificatoare magnetice etc.

Cele mai reprezentative tipuri sunt:

Feritele mangan-zinc (denumiri industriale: Oxifer, Ferroxcube, Siferrit, Formalite, CIA, CIB, CIC etc) au, $\rho = 0,3 \dots 1 \Omega \cdot m$, $B_s = 0,25 \dots 0,5 \text{ T}$, $H_c = 8 \dots 24 \text{ A/m}$, $\mu_{ri} \leq 6000$ și $T_C = 120 \dots 180^\circ\text{C}$ (relativ mare comparativ cu celelalte tipuri de ferite). Se utilizează la confecționarea miezurilor transformatoarelor de impulsuri, a filtrelor etc, ce funcționează până la frecvențe sub 1 MHz (sute de kilohertzi)

Feritele nichel-zinc (Niferit, Ferroxcube B, Fernilite, etc) au temperatură Curie scăzută ($60 \dots 80^\circ\text{C}$) și coeficientul de variație al permeabilității cu temperatura mare.

Proprietățile magnetice sunt dependente de conținutul de zinc. Cele cu conținut mare de zinc au permeabilitatea relativă maximă ridicată (aproape 15000), dar câmp coercitiv redus ($6,4 \dots 160 \text{ A/m}$), inducție de saturație mică (sub 0,4 T) și temperatură Curie scăzută ($60 \dots 80^\circ\text{C}$). Cu scăderea procentului de zinc, unele proprietăți se înrăutățesc ($\mu_{r \text{ max}}$ scade foarte mult și H_c crește), iar altele se îmbunătățesc (B_s , ρ și T_C cresc). Având rezistivitate mare și frecvență de rezonanță magnetică ridicată, feritele Ni-Zn cu conținut redus de Zn se utilizează la fabricarea miezurilor magnetice ale transformatoarelor și bobinelor ce funcționează până în domeniul zecilor de MHz. Feritele cu conținut mare de Zn pot avea ciclul de histerezis dreptunghiular, indus prin tratament termic, iar cele cu adaos de cobalt au ciclul de histerezis tipic materialelor perminvar și o temperatură Curie ridicată (se utilizează la miezuri cu comportare liniară până în domeniul MHz-ilor).

Feritele de litiu și litiu-zinc au o $\mu_{ri} < 100$, rezistivitate mare și pierderi mici până în domeniul sutelor de MHz, fiind utilizate la fabricarea miezurilor bobinelor cu factor bun de calitate care funcționează la zeci de MHz.

Feritele magneziu-zinc și mangan-magneziu au rezistivități foarte mari ($10^6 \dots 10^7 \Omega \cdot m$, permeabilitatea și inducția de saturație reduse și frecvența de rezonanță magnetică foarte mare (în domeniul GHz). Se utilizează (în special ferita Mn-Mg) în domeniul frecvențelor foarte înalte (10 GHz).

Feritele cu structură hexagonală sunt ferite mixte, pe bază de Ba, cunoscute sub denumirea de *ferite tip feroxplana*. Au rezistivitate mare (până la $10^8 \Omega \cdot m$), permeabilitate relativă scăzută dar frecvența de rezonanță magnetică ridicată, și sunt utilizate în ultraînaltă frecvență. Prin sinterizare în câmp magnetic capătă o anizotropie magnetică care le îmbunătățește proprietățile magnetice pe direcția preferențială.

5.5.2.3. Materialele magnetodielectrice

Magnetodielectricii sunt constituiți din granule de materiale fero- sau ferimagnetice (alsifer, permalloy, fier carbonil, magnetită etc) înglobate într-un liant dielectric (rășini sintetice, sticlă lichidă, cauciuc etc). Datorită dimensiunilor reduse ale granulelor magnetice și rezistivității ridicate a dielectricului, pierderile prin curenți turbionari sunt foarte mici, magnetodielectricii utilizându-se îndeosebi în domeniul frecvențelor înalte.

Înglobarea materialului magnetic în liant duce la scăderea proprietăților lui magnetice, acestea depinzând de tipul și de procentul volumic al dielectricului utilizat. *Magnetodielectricii feroplastici* (cu șelac, poliesteri, bachelite etc.) sunt materiale casante, cu H_c mic, și μ_r mare (zeci, sute) și se utilizează în construcția miezurilor de bobine și transformatoare. *Magnetodielectricii feroelastici* (pe bază de cauciucuri, PVC, PE etc) au elasticitate mare și permeabilitate mică (unități, zeci) și se utilizează în construcția ecranelor magnetice, ca absorbanți de microunde etc. În prezent magnetodielectricii sunt tot mai puțin utilizați, fiind înlocuiți cu ferite.

5.5.3. Materiale magnetice moi cu ciclu de histerezis dreptunghiular (CHD)

Materialele care prezintă ciclu de histerezis dreptunghiular sunt atât fero- cât și ferimagnetice. Cele feromagnetice sunt utilizate sub formă de filme sau plăci subțiri din aliaje ale fierului (permalloy, perminvar, permendur) care au fost supuse unui tratament termic în câmp magnetic. Deși au H_c mic și B_s mare, prezentând pierderi relativ mari prin curenți turbionari – fapt ce duce la creșterea timpului de comutație – ele au utilizare limitată în circuitele de memorie și comutație, preferate fiind feritele.

Feritele nichel-zinc cu conținut mare de Zn sau cele cu adaos de cobalt capătă CHD prin tratament termomagnetic. Alte ferite (ferita Mn-

Mg, Cd-Mn, Cu-Mn) prezintă un CHD spontan și sunt mai mult utilizate în construcția miezurilor de comutație și memorie, a releelor etc.

5.5.4. Materiale magnetice moi cu proprietăți speciale

Materialele termocompensatoare sunt caracterizate prin temperatură Curie scăzută (sub 100°C), inducție de saturație mică (0,2 ... 0,3 T) și coeficient de variație a permeabilității cu temperatura negativ și mare. Cum fluxul unui magnet permanent crește cu scăderea temperaturii iar permeabilitatea materialului termocompensator crește, se poate păstra constanța fluxului într-un anumit interval de temperatură prin șuntarea magnetului cu o bandă din acest material. Cele mai cunoscute materiale termocompensatoare sunt: Calmalloy (Ni-Cu), Thermalloy (Fe-Ni), Compensator (Fe-Ni-Cr).

Materialele piezomagnetice sunt caracterizate prin valori mari (în modul) al constantei de magnetostricțiune (definită cu relația 5.7). Principalele materiale piezomagnetice sunt: Ni ($\lambda < 0$), Co ($\lambda = 0$), aliajele Ni-Fe, Ni-Co, Co-Fe, Fe-Pt ($\lambda = 18 \cdot 10^{-5}$), aliaj fier – erbiu (EbFe_2) precum și feritele de cobalt sau feritele de nichel-zinc cu adaos de cobalt. Se utilizează, în special, în construcția generatoarelor sonore și ultrasonore cu diferite aplicații: controlul nedistructiv, curățarea apei, accelerarea reacțiilor chimice, distrugerea de bacterii, sudarea metalelor etc.

5.5.5 Materiale magnetic dure

Materialele magnetic dure pot îndeplini funcțiile de generare de câmp magnetostatic (sau funcția de magnet permanent) și de înregistrare magnetică a informației.

5.5.5.1 Materiale pentru magneți permanenți

Pentru materialele magnetic dure utilizate la confecționarea magneților permanenți prezintă o deosebită importanță curbele de demagnetizare și cele ale produsului (BH) în funcție de H sau de B – figura 5.6. Eficacitatea unui astfel de magnet se apreciază prin valoarea energiei degajate în întrefier, energie care este direct proporțională cu (BH) și cu volumul lui. Deci magnetul permanent trebuie să funcționeze la o asemenea

inducție încât produsul să fie maxim pentru ca energia necesară din întrefier să fie furnizată cu un consum minim de material. Acest punct de funcționare al magnetului permanent este cel optim și se determină intersectând diagonala OA a dreptunghiului OB_rAH_c cu curba de demagnetizare (fig. 5.6), coordonatele sale (B_L, H_L) verificând relația: $H_L / B_L = H_c / B_r$. Rezultă că valoarea maximă a produsului $(BH)_{\max}$, numit indice de calitate, este cu atât mai mare, cu cât B_r și H_c sunt mai mari și cu cât ciclul de histerezis se apropie mai mult de unul dreptunghiular. O astfel de curbă se poate obține prin procedee tehnologice ce duc la deformarea rețelei cristaline, fapt ce generează o mișcare ireversibilă a pereților Bloch după o magnetizare. Principalele materiale magnetic dure pentru magneti permanenți pot fi grupate în următoarele categorii: oțeluri martensitice și aliate, aliaje cu durificare prin dispersie de fază, aliaje plastice și ferite magnetic dure.

Oțeluri martensitice și aliate. La oțelurile cu structură martensitică, aceasta se obține printr-o răcire bruscă (călire) a oțelului (cu peste 0,26% C) aflat la o temperatură ridicată (900°C), când cementita (carbura de fier – Fe_2C) rămâne în material și formează cu fierul α o soluție suprasaturată. Excesul de cementită produce tensiuni interne care deformează rețeaua cristalină și care cresc câmpul coercitiv ($H_c = 4 \text{ kA} / \text{m}$). Indicele de calitate este însă mai redus și oțelurile martensitice sunt sensibile la șocuri, vibrații și variații de temperatură. Cele aliate cu Cr, W, Mo, Co au caracteristici magnetice mai bune, caracterul de material magnetic dur fiind dat de carburile elementelor de aliere ce apar în urma călirii și care deformează rețeaua cristalină. Oțelurile aliate au câmp coercitiv mai mare (H_c până la $20 \text{ kA} / \text{m}$) și indice de calitate mai bun ($(BH)_{\max} \leq 7,4 \text{ kJ/m}^3$).

Aliajele cu durificare prin dispersie de fază sunt materiale ieftine și cu proprietăți magnetice remarcabile: $H_c = 20 \dots 90 \text{ kA/m}$, $B_r = 0,6 \dots 1,15 \text{ T}$ și $(BH)_{\max} = 6 \dots 40 \text{ kJ/m}^3$. Aceste proprietăți deosebite se obțin printr-un tratament de durificare prin dispersie de fază. În stare topită, aceste aliaje formează o soluție omogenă care, la o răcire lentă, are tendința de separare de fază, ducând la un amestec eterogen (neomogen) de cristale diferite. Pentru a evita acest fenomen se face o răcire bruscă a aliajului (de la $1100 \dots 1300^{\circ}\text{C}$), obținându-se o soluție solidă omogenă, care deformează rețeaua cristalină de bază. Pentru reducerea tensiunilor interne prea mari se efectuează apoi o recoacere la o temperatură inferioară celei la care s-ar produce separarea fazelor, urmată de o răcire lentă.

Tipul reprezentativ al acestor aliaje de turnare, sunt aliajele Alni (Al-Ni), și Alnico (Al-Ni-Co), care au indice de calitate superior oțelurilor. Dacă răcirea se face în câmp magnetic, apare o anizotropie indusă care duce

la creșterea indicelui de calitate. Aceste aliaje sunt dure și se prelucrează greu. Magneți de forme mai complicate, fără defecte de turnare, se obțin din pulberile acestor aliaje, fie prin sinterizare, fie sub formă de magnetodielectrics.

Aliajele plastice suportă deformări plastice pronunțate (forjare, laminare) până la dimensiuni mici, fără o modificare semnificativă a proprietăților lor magnetice. Sunt foarte scumpe și se utilizează doar în situații speciale când aliajele Alni sau Alnico nu pot fi folosite. Cele mai cunoscute aliaje plastice sunt: aliaje de Cu-Ni-Fe (Cunife), Cu-Ni-Co (Cunico), Fe-Ni-Cr, aliaje cu conținut mare de cobalt etc.

Aliajele Cunife sunt cele mai maleabile și ductile și rezistă foarte bine la șocuri și vibrații.

Aliajul Fe-Ni-Cr este mai ieftin, se poate lamina sau trefila până la 0,05 mm și are ciclul de histerezis dreptunghiular ($k > 0,9$).

Aliajele cu conținut mare de cobalt (Vicalloy, Koerflex) au proprietăți magnetice foarte bune dar sunt foarte scumpe.

Aliajele plastice sunt utilizate în construcția memoriilor magnetice, a dispozitivelor de înregistrare și comandă, în telecomunicații etc.

Feritele magnetic dure au structură spinelică (ferita de cobalt) sau hexagonală (feritele de bariu, stronțiu, plumb). Feritele prezintă avantajul unui preț de cost scăzut, rezistivitate ridicată și un câmp coercitiv mare (până la 800 kA/m), dar inducția remanentă este mică (0,2...0,4 T) și stabilitatea termică redusă. Prin presarea feritei în câmp magnetic, anizotropia indusă în direcția câmpului mărește inducția remanentă, deci și indicele de calitate.

Alte materiale magnetic dure utilizate la fabricarea magneților permanenți sunt: *pământurile rare, oxizii de crom, aliajele Ag-Mn-Al, Bi-Al, Mn-Al* etc.

5.5.5.2 Materiale pentru înregistrarea magnetică a informației

Pentru înregistrarea magnetică a informației se utilizează dependența cvasiliniară (într-un anumit domeniu) dintre inducția remanentă a materialului magnetic și câmpul magnetic de excitație (câmpul exterior, purtător al informației). Materialele magnetice ce pot îndeplini această funcție trebuie să aibă o inducție remanentă cât mai mare, o zonă de dependență liniară între B_r și câmpul exterior cât mai largă și un câmp coercitiv cât mai mare (pentru a împiedica efectul de ștergere a informației).

Materialul magnetic, sub formă de granule de aproximativ $0,5 \dots 1 \mu\text{m}$, se amestecă cu un liant dielectric (acetil-celuloză, rășini epoxidice) și se depune sub forma unui strat de grosime de $20 \mu\text{m}$ fie pe o bandă din acetat de celuloză, PVC sau poliester, fie pe un disc sau tambur din aluminiu sau poliester. Dimensiunile granulelor și uniformitatea stratului depus influențează în mod hotărâtor raportul semnal / zgomot, deci calitatea înregistrării informației.

Drept material magnetic, se utilizează pulberile de Fe_2O_3 , CrO_2 , aliaje de Fe–Co–Ni, sau pulberea de ferită de cobalt. Oxidul de fier (Fe_2O_3) are, în stare de pulbere, următoarele caracteristici magnetice: $H_c = 24 \text{ kA/m}$ și $B_r = 0,11 \text{ T}$. Pulberea de CrO_2 are caracteristici mai bune ($H_c = 39 \text{ kA/m}$ și $B_r = 0,16 \text{ T}$) și permite o înregistrare de calitate superioară, o densitate mai mare de înregistrare a informației și nu necesită anularea magnetizării reziduale a benzii, prin câmp de înaltă frecvență, înainte de înregistrare. Cele mai bune proprietăți magnetice le are coprecipitatul sub formă de oxalat de Co, Fe, Ni, denumit Cobaloy, și anume: $H_c = 50 \dots 110 \text{ kA/m}$ și $B_r = 0,2 \text{ T}$.