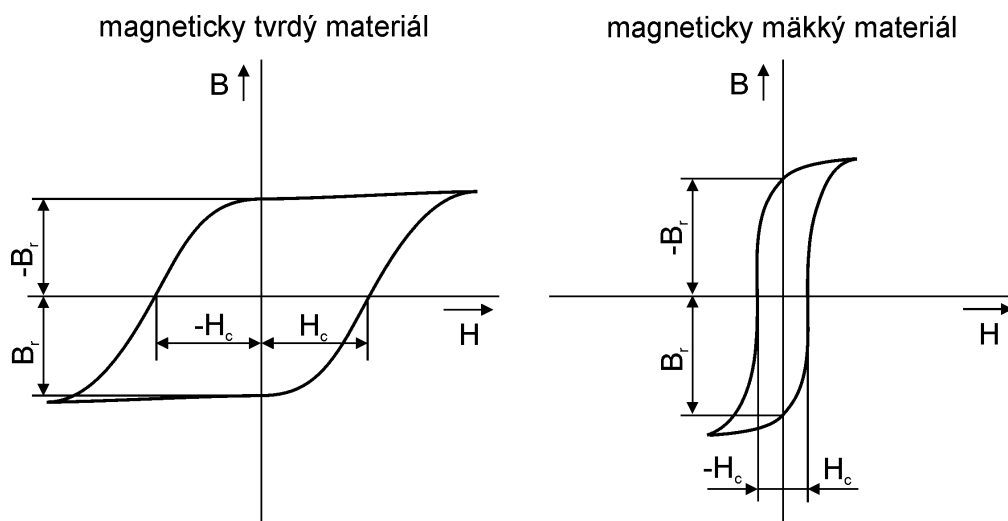


## 13 Magnetické materiály

### 13.1 Úvod

V technickej praxi sa uplatňujú najmä materiály, ktoré vykazujú feromagnetické vlastnosti. Tieto materiály sa vyskytujú v tuhom stave. Sú polykryštalické, monokryštalické (pri výrobe bublinových pamätí, v mikrovlnnej technike, pre jadrá čítacích hláv magnetických pamätí), amorfné (pre magnetické kovové sklá – magneticky mäkké materiály) látky a tiež magnetické kompozity, ktoré sa vyrábajú z magnetických práškov a plastov [32]. Hysterézne slučky magneticky tvrdého a magneticky mäkkého materiálu sú na obr. 13.1.



Obr. 13.1 Hysterézne slučky magneticky tvrdého a magneticky mäkkého materiálu

Podľa koercitívnej sily  $H_c$  sa magnetické materiály delia do dvoch veľkých skupín:

1. **Magneticky mäkké materiály**, ktorých  $H_c$  je menšie ako  $800 \text{ Am}^{-1}$  (určené pre prevádzku v striedavých magnetických poliach, prípadne v dynamických režimoch). Možno ich ľahko zmagnetovať aj odmagnetovať. Majú úzku hysteréznú slučku, malú koercivitu, vysokú hodnotu permeability, vysokú indukciu nasýtenia a malé merné straty. Patria tu technicky čisté železo, elektrotechnické plechy, zliatiny s veľkou permeabilitou (zliatiny železa a niklu – permalloy, čisté železo), zliatiny s konštantnou permeabilitou (perminvar), zliatiny s vysokou indukciou nasýtenia (kremíkové ocele, zliatiny železa a kobaltu), zliatiny so špeciálnymi vlastnosťami, magneticky mäkké ferity ( $\text{NiO} - \text{ZnO}$ ,  $\text{MnO} - \text{ZnO}$ ,  $(\text{Ni} - \text{Zn} - \text{M})\text{O} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ , kde M je jeden z prvkov Cu, Mg, Mn, Pb a iné).
2. **Magneticky tvrdé materiály**, pre ktoré  $H_c$  je väčšia ako  $1\,500 \text{ Am}^{-1}$  (určené pre prevádzku v statickom režime). Tieto materiály sa neľahko zmagnetujú (hlavne premagnetujú), majú širokú hysteréznú slučku a málo strmý priebeh krivky prvotného magnetovania, veľkú koercivitu, veľkú remanenciu a veľký maximálny súčin  $(BH)_m$ . Patria tu tvárne ocele a zliatiny, liate magnety, práškové kovové materiály, kysličníkové materiály (ferity).

Podľa typu chemickej väzby sa magnetické materiály delia na kovové a nekovové. Kovové sa rozdeľujú na práškové a kompaktné. Nekovové (ferity) sa rozdeľujú na jednoduché, v ktorých sa okrem  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  vyskytuje len jeden oxid kovového prvku, a zmesové, kde je oxidov viac.

Podľa použitia sa magnetické materiály delia na materiály pre magnety a elektromagnetickú väzbu: materiály magnetostrikčné, materiály pre pamäťové a spínacie obvody (materiály s pravouhlou hysteréznou slučkou), materiály pre teplotnú kompenzáciu magnetických obvodov a pod.

**Magnetické vlastnosti** sú dané výsledným magnetickým momentom atómov, ktorý môžeme považovať za magnetický dipól zložený z troch zložiek:

- momentu atómového jadra, veľmi malého vzhľadom k momentom elektrónov,
- dráhových momentov elektrónov vznikajúcich krúžením okolo jadra,
- spinových momentov elektrónov, tvoriacich prevažnú časť celkového momentu atómu.

Výsledný magnetický moment je daný vektorovým súčtom magnetických momentov jednotlivých elektrónov, pričom ich jednotlivé zložky môžu byť čiastočne alebo celkom kompenzované. Podľa tohto a tiež podľa magnetickej susceptibility  $\kappa$  látky delíme na:

- **diamagnetické** ( $\kappa < 0$ ) - dráhové i spinové momenty sú vykompenzované, výsledný magnetický moment atómu je nulový. Vložením do magnetického poľa sa obežné dráhy elektrónov deformujú, čím sa v látke indukuje magnetický moment oslabujúci vonkajšie magnetické pole, po ktorého zrušení tento zaniká. Magnetická susceptibilita  $\kappa$  je záporná a veľmi malá ( $-10^{-5}$ ), nezávislá od teploty a intenzity magnetického poľa. Patria sem inertné plyny, väčšina organických látok, H, Cu, Ag, Au, Be, Pb, Hg, C, Si, Ge, B,  $Al_2O_3$ .

- **paramagnetické** ( $\kappa > 0$ ) - spinové momenty sú vykompenzované, výsledný magnetický moment je daný nevykompenzovanými dráhovými momentmi elektrónov, ktoré sú neusporiadané kým látka nie je v magnetickom poli, takže sa navonok javia ako nemagnetické. Pôsobením vonkajšieho magnetického poľa sa magnetické momenty orientujú do jeho smeru a zosilňujú ho. Ich magnetická susceptibilita je vždy kladná ( $10^{-5}$  -  $10^{-2}$ ) a nezávisí od intenzity pôsobiaceho magnetického poľa. Relatívna permeabilita  $\mu_r > 1$ . Patrí sem kyslík, niektoré oxidy, Al, Cu, Na, Mg, Ta, Pt, W.

- **feromagnetické** ( $\kappa \gg 0$ ) - dráhové momenty sú takmer všetky vykompenzované, výsledný magnetický moment je daný spinovými momentmi elektrónov. Dochádza ku paralelnej orientácii magnetických momentov atómov v určitých oblastiach nazývaných feromagnetické domény, v rámci ktorých je látka zmagnetizovaná do nasýtenia bez účinku vonkajšieho magnetického poľa vzájomným pôsobením atómov medzi sebou, účinným len do kritickej (Curieho) feromagnetkej teploty, ktorej prekročením sa látka stáva paramagnetikom. Feromagnetikum sa ľahko zmagnetizuje už v slabom magnetickom poli, pričom po jeho zrušení ostáva magnetizácia zachovaná.  $\mu_r$  i  $\kappa$  sú vysoké ( $10^6$ ), silne závislé od teploty a intenzity magnetického poľa. Patria sem Fe, Co, Ni a mnohé ich zliatiny.

- **antiferomagnetické** ( $\kappa > 0$ ) - s antiparalelne orientovanými spinovými momentmi vplyvom výmenných síl, susceptibilitou rádovo ako u paramagnetík, klesajúcou s teplotou. Pri Curieho teplote dochádza k porušeniu antiparalelnej orientácie spinov. Patria sem oxidy, sulfidy, chloridy mangánu, chrómu, železa, kobaltu a niklu.

- **ferimagnetické** ( $\kappa \gg 0$ ) - sú zvláštnym prípadom antiferomagnetík, antiparalelné susedné magnetické momenty však nie sú rovnaké, nevykompenzujú sa - prejavujú rozdielový magnetický moment. Patria sem ferity - zlúčeniny  $Fe_2O_3$  s oxidmi niektorých dvojmocných kovov (Mg, Zn, Cu, Fe, Mn).

## 13.2 Základné pojmy

Hlavné **materiálové charakteristiky** magnetických materiálov sú:

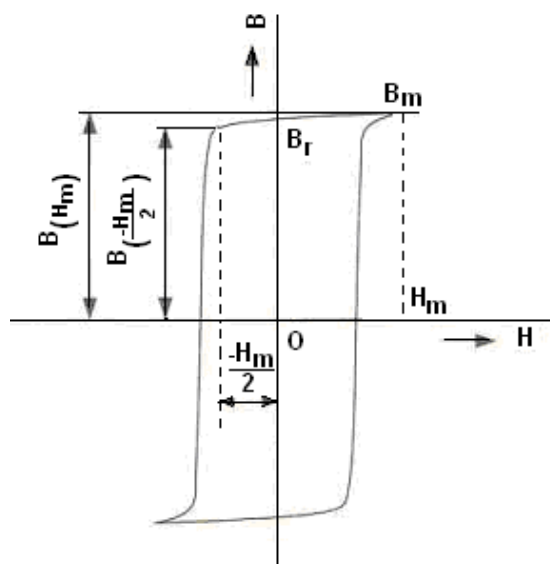
- Relatívna permeabilita**  $\mu_r$ , ktorá je definovaná vzťahom  $\mu_r = \frac{B}{\mu_0 H}$  je závislá od intenzity magnetického poľa a od teploty.
- Magnetická susceptibilita**  $\kappa$ , ktorá súvisí s relatívnou permeabilitou vzťahom:  $\kappa = \mu_r - 1$
- Curieho teplota**  $T_c$ , pri ktorej zaniká feromagnetický (ferimagnetický) stav a magnetické materiály prechádzajú do paramagnetického stavu.
- Indukcia nasýtenia**  $B_s$  (magnetická indukcia) charakterizujúca magnetické nasýtenie  $B = \mu H$ .
- Remanencia**  $B_r$ , t.j. magnetická indukcia pri nulovej intenzite magnetického poľa po predchádzajúcej magnetizácii do nasýtenia.

- f) **Koercivita  $H_c$** , t.j. intenzita magnetického poľa, ktorá je potrebná, aby po predchádzajúcej magnetizácii do nasýtenia poklesla magnetická indukcia na nulovú hodnotu.

Ďalšie pojmy:

- **Straty v magnetických materiáloch:** vznikajú pri procese premagnetovania magnetických materiálov v striedavom poli. Sú sprevádzané oteplením a vyjadrujú sa stratovým číslom, mernými stratami alebo stratovým činiteľom  $\text{tg}\delta$ . Pre zníženie strát je potrebné vybrať materiál s úzkou hysteréznou slučkou, t.j. s veľmi malou koercivitou, resp. so zvýšenou rezistivitou. Celkové straty sa delia na: hysterézne (magnetizačné) straty, straty vírivými prúdmi a straty zvyškové.
- **Maximálny súčin  $(BH)_m$ :** charakteristická veličina pre hodnotenie magneticky tvrdých materiálov, určuje sa graficky z tvaru hysteréznej slučky, udáva sa v Jouloch na kubický meter ( $\text{Jm}^{-3}$ ).
- **Činiteľ pravouhlosti  $R$ :** vyjadruje vydutie hysteréznej slučky v druhom kvadrante. Udáva pomer magnetickej indukcie  $B$  pri intenzite magnetického poľa  $-H_m/2$  k maximálnej magnetickej indukčii  $B_m$  na danej hysteréznej slučke, definovanej intenzitou magnetického poľa  $H_m$ . Činiteľ pravouhlosti je podľa obr. 13.2. vyjadrený vzťahom:

$$R = \frac{B(-H_m/2)}{B(H_m)} \quad (13.1)$$



Obr. 13.2 Hysterézna slučka - pravouhlý typ

U materiálov pre magnetické pamäte s pravouhlou hysteréznou slučkou sa blíži činiteľ pravouhlosti k hodnote 1.

- **Anizotropia magnetických vlastností.** Závislosť od smeru sa obyčajne charakterizuje magnetizačnou prácou, resp. konštantou magnetizačnej anizotropie. V niektorom smere je magnetovanie materiálu jednoduchšie ako v inom smere.
- **Magnetická textúra:** Vzniká u magnetických materiálov po mechanickom namáhaní (valcovaní alebo ťahaní). Určitá časť kryštálov sa orientuje rovnobežne do smeru plastickej deformácie.
- **Magnetostrikcia:** Zmena geometrických rozmerov telesa z magnetického materiálu po jeho vložení do magnetického poľa. Môže byť pozdĺžna, priečna alebo objemová, v špeciálnych prípadoch vo forme skrútenia materiálu. Vyjadruje sa koeficientom magnetostrikcie. Využíva sa v generátoroch, detektoroch ultrazvukových vln, v meničoch mechanickej energie na elektrickú, na meranie hĺbky vodných nádrží, na vyhľadávanie porúch v materiáloch, v biológii, poľnohospodárstve a pod.

- **Pamäťové prvky z tenkých magnetických materiálov:** Využívajú sa najmä v magnetických pamätiach. Prvky z tenkých magnetických vrstiev majú v porovnaní s klasickými feritovými pamäťami niekoľko výhod: kratší čas premagnetovania, malý objem umožňujúci veľký pokrok v miniaturizácii, širší teplotný interval použitia, lepšiu odolnosť voči mechanickým a vlhkostným vplyvom, možnosť automatizácie.

### 13.3 Magnetické pole

Magnetické pole môže byť spôsobené napr. prúdom tečúcim vo vinutí toroidu. Ak vinutím (vo vákuu bez jadra), so strednou dĺžkou siločiar  $k$  a s počtom závitov  $N$  tečie prúd  $I$ , potom vo vnútri toroidu vzniká magnetické pole o intenzite  $H$ :

$$H = \frac{NI}{k} \quad (13.2)$$

s magnetickou indukciou  $B_0$

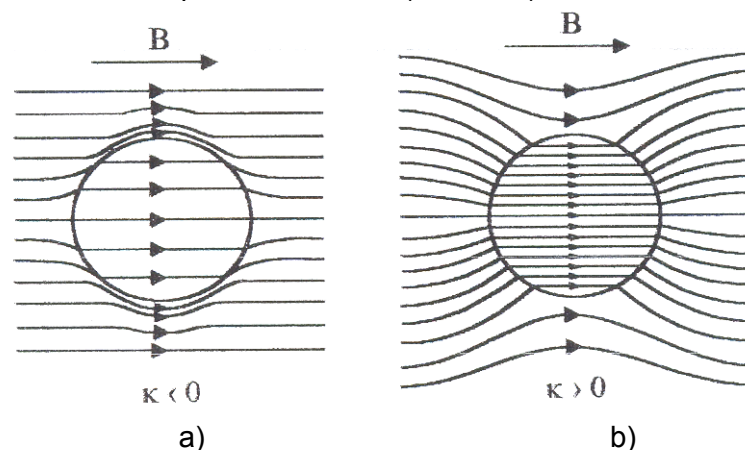
$$B_0 = \mu_0 H = \frac{\mu_0 NI}{k} \quad (13.3)$$

kde  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Hm}^{-1}$  je permeabilita vákuua,  
 $B_0$  (T) je magnetická indukcia,  
 $H$  ( $\text{Am}^{-1}$ ) je intenzita magnetického poľa.

Ak do vnútorného priestoru toroidu umiestnime magnetickú látku, potom magnetická indukcia v jadre vzrastie na hodnotu  $B$ :

$$B = B_0 + B_i = \frac{\mu_0 NI}{k} + \frac{\mu_0 NI'}{k} \quad (13.4)$$

Podľa tohto modelu obiehajú vo vnútri látky (v atómoch a molekulách) mikroprúdy. Ak je látka mimo magnetického poľa, sú orientované chaoticky. Ak na látku pôsobí magnetické pole, mikroprúdy tečúce po uzavretých dráhach atomárnych rozmerov sa snažia natočiť do zhodného smeru ako prúdu v závitoch (obr. 13.3).



Obr. 13.3 Vplyv diamagnetík a paramagnetík na magnetickú indukciu  $B$ :  
 a) vo vnútri diamagnetík sa  $B$  zoslabuje, b) v paramagnetikách sa  $B$  zosilňuje

V objeme magnetického materiálu sa prúdy od jednotlivých slučiek kompenzujú, na povrchu nie. Takto mikroprúdy vyvolajú povrchové prúdy. Ak tieto mikroprúdy nahradíme jedným prúdom tečúcim v rovnakom počte závitov po povrchu toroidu, potom magnetická indukcia  $B_i$  je spôsobená fiktívnou veličinou, povrchových prúdom  $I'$ .

Pohyb nabitých častíc po uzavretých dráhach spôsobuje vznik elementárnych magnetických momentov  $m_i$  ( $\text{Am}^2$ ). Vzrast magnetickej indukcie v jadre cievky môžeme vyjadriť pomocou povrchového prúdu  $I'$  alebo pomocou magnetickej polarizácie  $J$  (kde  $B_i = J$ ).

Magnetická polarizácia  $J$  (T) je definovaná ako objemová hustota magnetických momentov  $m_i$  v jednotke objemu. Vyjadruje súvislosť medzi magnetickým momentom častíc a makroskopicky merateľnými veličinami magnetického poľa:

$$J = \lim_{V \rightarrow 0} \frac{\sum_{i=1}^N m_i}{V} \quad (13.5)$$

Magnetické vlastnosti izolovaných atómov sú dané výhradne charakterom ich elektrónového obalu. Elektricky nabité častice atómov (elektróny a protóny) sa pohybujú v uzavretých prúdových slučkách, ktoré sú zdrojom magnetických momentov. Pre základný kvantový stav elektrónu v jednkvantovej dráhe je dráhový magnetický moment elektrónu vzťahovaný k stredu jadra, daný vzťahom:

$$m_B = \mu_0 \frac{h}{4\pi} \frac{e}{m_e} \quad (13.6)$$

kde  $m_B$  sa nazýva **Bohrov magnetón** a jeho hodnota je  $9,27 \cdot 10^{-24} \text{ Am}^2$ .

Bohrov magnetón je najmenšou kvantovou jednotkou magnetického momentu. Ďalším príspevkom k magnetickému momentu atómu je **spinový magnetický moment**  $m_s$ , vyvolaný rotáciou elektrónov okolo ich osí. Podľa smeru rotácie hovoríme o príspevkov s opačným znamienkom, pričom absolútna hodnota spinového momentu je veľmi blízka Bohrovmu magnetónu  $\pm m_B$ .

Kladne nabité jadro vykazuje vlastný spinový magnetický moment. Jeho veľkosť sa pohybuje v tisícinach Bohrovho magnetónu a jeho vplyv na magnetický moment atómu z hľadiska aplikácií materiálov v elektrotechnike je zanedbateľný. Jednotlivé magnetické momenty vznikajúce v atóme (dráhový, spinový a jadrový) svoje účinky vektorovo skladajú.

Atómy a prípadné ióny s vykompenzovanými momentmi majú dovolené stavy na orbitách obsadené dvojicami elektrónov s opačnými spinmi, a tak ich výsledný moment je nulový a patria do skupiny diamagnetík. Typickým príkladom sú vzácne plyny, ktoré vďaka úplne obsadeným orbitálom majú celkom vykompenzované spinové a dráhové momenty. Atómy s nevykompenzovanými momentmi môžu, ale nemusia mať celkový magnetický moment kladný. Ak je súčet všetkých diel čích momentov, teda aj záporného príspevku zmeny dráhového momentu vo vonkajšom poli záporný, potom ide o diamagnetické atómy. Ak je tento súčet kladný, potom hovoríme o paramagnetických atómoch. Osobitné postavenie majú atómy s neúplne obsadenými vnútornými orbitálmi 3d, 4d, 4f, 5d. Príkladom sú atómy Mn alebo Fe s piatimi, prípadne šiestimi elektrónmi na orbite 3d. Podľa Hundovho pravidla sa elektróny na týchto neúplne obsadených orbitách orientujú tak, aby výsledný spinový moment bol maximálny a atómy sú silne paramagnetické.

V teórii elektromagnetického poľa je zavedený parameter **absolútna magnetická susceptibilita**  $\kappa$ , definovaná vzťahom:

$$\kappa = \frac{1}{\mu_0} \frac{J}{H} \quad (13.7)$$

$\kappa$  umožňuje vyjadriť vplyv magnetika na magnetickú indukciu  $B$ . Magnetická indukcia po vložení magnetika do toroidu vzrastá o  $B_i$  a  $\kappa_i$ . Tento prírastok umožňuje vyjadriť pomocou vzťahu:

$$B_i = \kappa_r H \quad (13.8)$$

V praxi sa najčastejšie používa relatívna susceptibilita  $\kappa_r$ . Je daná podielom absolútnej magnetickej susceptibility a permeability vákua  $\mu_0$  ( $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Hm}^{-1}$ ).  $\kappa_r$  je bezrozmerná veličina, záporná pre látky diamagnetické a kladné pre paramagnetiká, pre ktorú platí:

$$\kappa_r = \mu_r - 1 \quad (13.9)$$

Po zavedení  $\kappa_r$  pre vektor magnetickej polarizácie  $J$  platí:

$$\bar{J} = \mu_0 \kappa_r \bar{H} \quad (13.10)$$

kde  $\mu_0$  je permeabilita vákua,  
 $\mu_r$  je relatívna permeabilita daná vzťahom:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (13.11)$$

pričom

$$B = \mu H = \mu_0 H + J \quad (13.12)$$

Okrem magnetickej polarizácie  $J$  sa používa aj pojem magnetizácia  $M$  s rozmerom ( $\text{Am}^{-1}$ ), ktorej význam je zrejmý zo vzťahu:

$$B = \mu H = \mu_0 (H + M) \quad (13.13)$$

Veličiny  $\bar{J}, \bar{B}, \bar{H}, \bar{M}$  sú vektory v izotropných prostrediach vždy vzájomne rovnobežné. V anizotropných prostrediach je magnetická susceptibilita  $\kappa$  tenzorom druhého rádu.

### 13.4 Magnetizačné charakteristiky

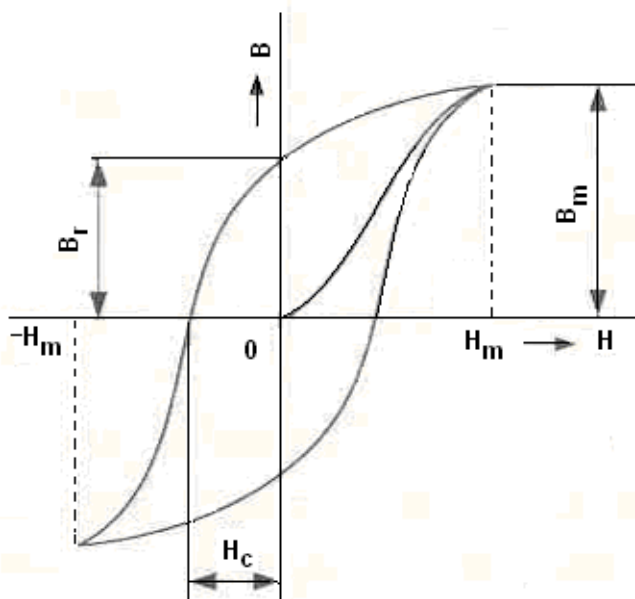
Pri konkrétnych aplikáciách feromagnetík (feromagnetík) je veľmi dôležité poznať ich magnetické vlastnosti za rôznych prevádzkových podmienok. Keďže závislosť magnetickej indukcie  $B$  od intenzity magnetickeho poľa  $H$  v týchto materiáloch nie je lineárna, ich vlastnosti sa vyjadrujú hlavne magnetizačnými krivkami. **Magnetizačné krivky** sú závislosti magnetickej indukcie  $B$  (alebo od magnetickej polarizácie  $J$ ) od intenzity magnetickeho poľa  $H$ . Magnetizačné krivky sa získavajú meraním za definovaných podmienok (tvar vzorky, časový priebeh magnetizujúceho poľa atď.), najčastejšie sa vyjadrujú graficky v podobe krivky prvotnej magnetizácie, resp. komutačnej krivky a hysteréznej slučky. S uvedenými krivkami súvisia charakteristické veličiny ako napr. koercivita  $H_c$ , indukcia nasýtenia  $B_s$ , remanentná indukcia  $B_r$ , permeabilita, atď.

Javom *magnetická hysterézia* sa označuje zaostávanie zmien magnetizácie, príp. magnetickej indukcie za zmenami intenzity magnetickeho poľa.

**Krivka prvotnej magnetizácie** je charakteristika feromagnetika pri jeho stacionárnom magnetovaní z odsmagnetovaného stavu ( $H = 0, B = 0$ ) až do nasýtenia. Hysterézia je prejavom nevratnosti magnetizačných procesov v látke.

**Hysterézná slučka** je magnetizačná charakteristika feromagnetika pri cyklickom (periodickom) premagnetovaní pri zvyšovaní intenzity magnetickeho poľa v jednotlivých **cykloch**. Až po dosiahnutí hodnoty intenzity poľa  $+ H_m$  sa bude feromagnetikum

premagnetovávať cyklickou zmenou poľa z  $+H_m$  do  $-H_m$  a naopak, pričom zmena indukcie zodpovedá hodnotám, ktoré ležia na hysteréznej slučke a nie na primárnej krivke. Vrcholy hysteréznych slučiek pre rôzne maximálne hodnoty  $H_m$  (resp.  $B_m$ ) ležia na komutačnej krivke, ktorá, až na nízke hodnoty intenzity poľa, je totožná s krivkou prvotnej magnetizácie.



Obr. 13.4 Obecný tvar hysteréznej slučky

Hodnota magnetickej indukcie, ktorá zostane vo feromagnetiku po znížení intenzity magnetického poľa na nulu je **remanentná indukcia**  $B_r$ . Možno ju zrušiť opačne orientovaným poľom s hodnotou rovnajúcou sa **intenzite koercitívneho poľa**  $H_c$ . Vo feromagnetiku sa môže odmerať nekonečne veľa tzv. súmerných hysteréznych slučiek, ale iba jedna je limitná (maximálna) hysterézná slučka). Vtedy sa maximálna indukcia rovná nasýtenej magnetickej indukci  $B_m = B_s$  a  $H_m = H_s$ . Na limitnej hysteréznej slučke sa určí limitná  $B_r$ , ktorá sa nazýva **remanentivita**, a podobne na tejto hysteréznej slučke sa určí aj limitná hodnota  $H_c$ , tzv. koercivita. Hodnoty  $H_c$ ,  $B_r$  a  $B_s$  na limitnej hysteréznej slučke sú uvádzané ako orientačné parametre pre použitie magnetických materiálov. Okrem magnetizačných kriviek sa charakterizujú vlastnosti feromagnetík závislosťami magnetizačnej permeability alebo magnetickej susceptibility od intenzity magnetického poľa.

**Magnetická permeabilita**  $\mu$  ( $\text{Hm}^{-1}$ ) je parameter, ktorý charakterizuje schopnosť látky zmeniť svoju magneticкую indukciu vplyvom intenzity magnetického poľa. Magnetická permeabilita vo feromagnetikách je zložitou funkciou  $H$  (podobne ako susceptibilita). Je závislá od fyzikálnych vlastností materiálu a súvisí i s geometriou vzorky.

Veľmi dôležitými charakteristikami z hľadiska magnetických vlastností sú závislosti magnetickej susceptibility od teploty. V magnetickom poli sa magnetické momenty paramagnetických atómov natáčajú do smeru vonkajšieho poľa. Proti usmerňujúcemu vplyvu magnetického poľa pôsobí dezorientujúci vplyv tepelného pohybu atómov mriežky. Vplyv teploty na magnetizáciu paramagnetík vyjadruje Curieho zákon, pre ktorý platí:

$$\kappa_r = \frac{C}{T} \quad (13.14)$$

Teplotnú závislosť u feromagnetík vyjadruje Curieho - Weissov zákon

$$\kappa_r = \frac{C}{T - T_c} \quad (13.15)$$

kde  $C$  je Curieho konštanta a  $T_c$  Curieho teplota.

Vzťah platí pre feromagnetiká len nad teplotou  $T_c$ , kedy spontánna magnetizácia zanikne a látka sa stáva paramagnetickou.

Vyššie uvádzané parametre sú iba časťou rozsiahleho množstva veličín, ktorými sa charakterizujú vlastnosti magnetických materiálov. Všetky magnetické vlastnosti závisia od chemického zloženia a od teploty, no nie všetky závisia od iných vonkajších podmienok, akými sú smer a intenzita magnetického poľa, mechanické namáhanie, štruktúra a pod. Podľa toho sa magnetické vlastnosti delia na primárne a sekundárne. Medzi **primárne vlastnosti** patria: nasýtená magnetická polarizácia  $J_s$  a Curieho teplota  $T_c$ . Uvedené vlastnosti nie sú závislé od štruktúry a od intenzity  $H$ , ale závisia iba od teploty a chemického zloženia. **Sekundárne magnetické vlastnosti** sú štruktúrne senzitivne. Môžu sa klasifikovať aj ako statické a ako dynamické, podľa toho, či vykazujú frekvenčnú závislosť zmien poľa: magnetická indukcia, permeabilita (susceptibilita), koercivita, magnetizačné krivky sú štruktúrne citlivé, avšak závisia aj od mechanického namáhania a pod.

### 13.5 Teória diamagnetizmu a paramagnetizmu

Magnetické vlastnosti materiálov sú ovplyvnené nielen vlastnosťami jednotlivých atómov, ale i valenčnými elektrónmi, ktoré v rôznej forme zabezpečujú medziatomárnu väzbu s poľom kryštálovej mriežky.

V kovalentnej väzbe môžu elektróny prispievať tak paramagnetickým ako diamagnetickým javom. Atomárny vodík je napr. paramagnetický, molekulový je v dôsledku vykompenzovaných spinov valenčných elektrónov diamagnetický a naopak, kyslík je paramagnetický. Obdobne zlúčeniny s iónovou väzbou môžu byť paramagnetické i diamagnetické v závislosti od veľkosti príspevkov kationov a aniónov k celkovému momentu molekuly zlúčeniny.

Tuhé látky sú paramagnetické vtedy, ak atómy alebo ióny nemajú celkom zaplnené vnútorné orbity, ako napr. zlúčeniny s iónovou väzbou vzácnych zemín s neúplným stavom 4f alebo kovy s neúplným 3d stavom, ako napr. Ti, V, Cr. Príkladom sú paramagnetické alkalické kovy sodík, draslík alebo hliník a horčík. Veľkosť magnetickej susceptibility paramagnetík sa pohybuje medzi  $10^{-4}$  až  $10^{-5}$ .

Medzi diamagnetiká sa radia tuhé látky tvorené atómami s malým alebo nulovým paramagnetickým príspevkom valenčných či vodivostných elektrónov. Patria sem kryštály alkalických halogenidov (NaCl, KBr), organické látky, kovy Au, Ag, Cu a supravodiče. Susceptibilita diamagnetík je záporná a až na niektoré špeciálne prípady je v absolútnej hodnote väčšinou menšia ako  $10^{-5}$ . Susceptibility niektorých paramagnetík a diamagnetík sú v tab. 13.1.

Tabuľka 13.1 Susceptibility niektorých paramagnetík a diamagnetík

Paramagnetiká			Diamagnetiká		
Materiál	stav	$\kappa_m \cdot 10^6$	Materiál	stav	$\kappa_m \cdot 10^6$
paládium	kryštalický	690	vodík	plynný	-2
platina	kryštalický	270	voda	kvapalný	-9
hliník	kryštalický	22	meď	kryštalický	-8
oxid vápenatý	kryštalický	5 800	bizmut	kryštalický	-160
kyslík	kvapalný	3 620	grafit	kryštalický	$-10^3$
kyslík	plynný	2	supravodiče	kryštalický	$-10^6$

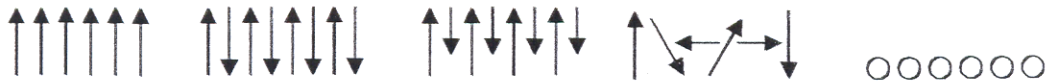
### 13.6 Spontánnny magnetizmus

Niektoré látky vykazujú nenulovú magnetizáciu i bez prítomnosti vonkajšieho magnetického poľa. Táto magnetizácia je daná spontánnym usporiadaním magnetických momentov jednotlivých atómov vo vnútri malých oblastí kryštálu, nazývaného domény. Vznik usporiadania si môžeme priblížiť predpokladom existencie interakcií, ktoré sú dané



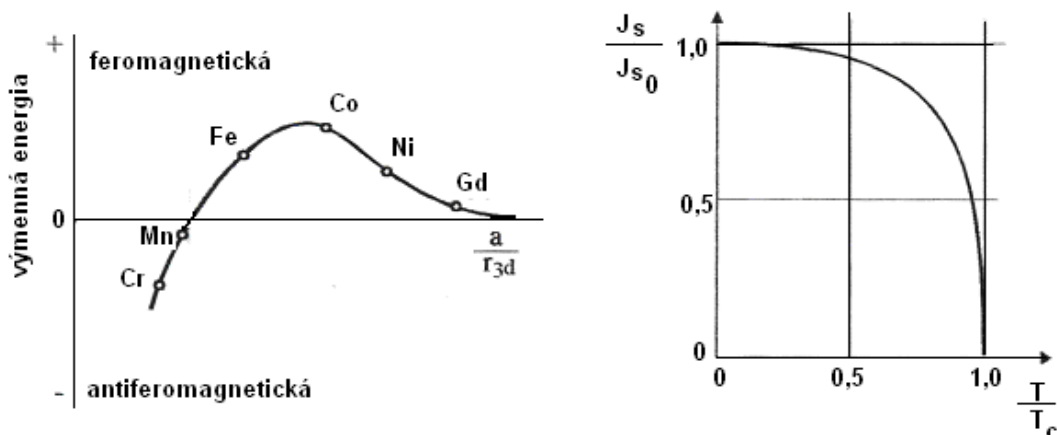
výmennými silami kvantovo-mechanického charakteru. Podstatou vzniku tejto interakcie je existencia neúplne obsadených orbitálov (napr. 3d u prechodových kovov) a vhodná štruktúra, ktorá umožňuje interakciu spinov elektrónov na týchto orbitáloch.

Proti orientujúcemu vplyvu výmenného poľa pôsobí tepelný pohyb a pri dostatočne vysokých teplotách, vyšších ako Curieho teplota  $T_c$ , spontánna magnetizácia zaniká, domény sa rozpadajú a látka prechádza do paramagnetického stavu. Príklady najvýznamnejších typov usporiadania magnetických momentov atómov v porovnaní s usporiadaním v diamagnetiku a paramagnetiku sú na obr. 13.5. Šípky znázorňujú veľkosť a smer momentu, kružnice atómy bez momentu.



Obr. 13.5 Usporiadanie magnetických momentov látok v doménach (feromagnetiká, antiferomagnetiká, ferimagnetiká) a v látkach bez magnetických momentov (paramagnetiká pri  $H = 0$ , diamagnetiká)

Zjednodušený pohľad na vznik paralelného a antiparalelného usporiadania podal Slater [32]. Podľa autora je závislosť energie výmennej interakcie od pomeru konštanty  $a$  a polomeru  $r_{3d}$  orbitu 3d vyjadrená závislosťou na obr. 13.6. Po hodnotu  $A$  pomeru  $a/r_{3d}$  je výmenná energia záporná a usporiadanie je antiferomagnetické. Antiferomagnetický stav Cr bol zistený pod  $39,5^\circ\text{C}$ , Mn je antiferomagnetický pri teplote menšej ako 100 K. O vzniku feromagnetického usporiadania teda rozhoduje existencia veľkého vlastného magnetického momentu a vhodná vzdialenosť atómov v mriežke.



Obr. 13.6 Závislosť výmennej energie od pomeru  $a/r_{3d}$  a závislosť podielu sýtnych magnetických polarizácií pri teplotách  $T$  a  $T_0 = 0$  K od pomeru teplôt  $T/T_c$  pre feromagnetiká

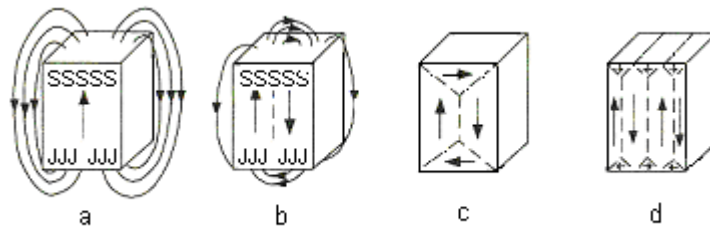
Charakteristickou črtou feromagnetického (ferimagnetického) stavu je možnosť paralelného (antiparalelného) usporiadania magnetických momentov všetkých atómov a teda i vznik nasýtenej hodnoty magnetickej polarizácie  $J_s$  a indukcie  $B_s$ . Veľkosti nasýtených hodnôt  $J_s$  a  $B_s$  sú dané: veľkosťou elementárnych magnetických momentov a ich počtom v objemovej jednotke, paralelným či antiparalelným usporiadaním a teplotou.

Maximálna hodnota spontánnej magnetickej polarizácie je pri teplote 0 K. S rastúcou teplotou sa zväčšuje dezorientujúci vplyv tepelného pohybu a sýtna magnetická polarizácia  $J_s$  klesá. Na predchádzajúcom obrázku je zobrazená závislosť podielu sýtnych magnetických polarizácií pri teplotách  $T$  a  $T_0 = 0$  K, ku pomeru teplôt  $T/T_c$  pre feromagnetiká.

Z najpoužívanejších feromagnetických kovov Fe, Ni, Co má najväčší  $J_s$  železo, najvyššiu Curieho teplotu kobalt. Príčinou nižšej hodnoty sýtnej magnetickej polarizácie feritov v porovnaní s feromagnetikami je antiparalelné usporiadanie magnetických momentov feritov.

## 14.7 Magnetovanie feromagnetik a ferimagnetik

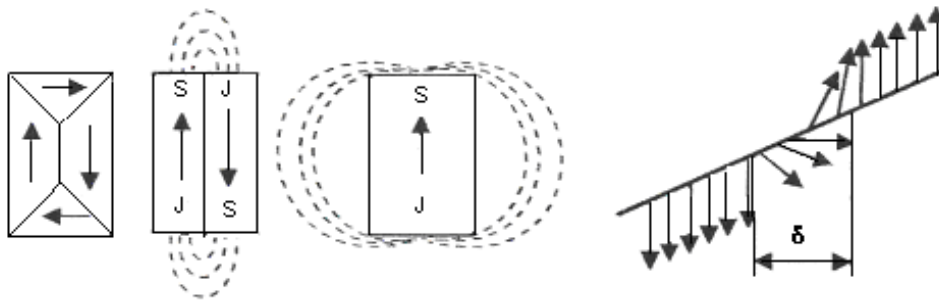
Feromagnetické **domény** sú priestorové útvary, ktoré sa zoskupujú do väčších celkov podľa určitého pravidla, nie náhodne. Obr. 13.7 predstavuje vznik doménovej štruktúry vo feromagnetickom kryštáli v tvare kvádra, ktorý je tvorený jedinou doménou, je celý spontánne zmagetovaný do jedného smeru. Energeticky výhodnejšie je usporiadanie na obr. 13.7 b). Zmenšenie magnetickej indukcie môže kryštál dosiahnuť, ak bude mať doménovú štruktúru na prakticky nulovej hodnote magnetostatickej energie (obr. 13.7 c). V tomto prípade sú vektory spontánnej magnetizácie usporiadané tak, že možno hovoriť o uzavretom magnetickom toku. Z energetického hľadiska sa javí ako najvýhodnejšie usporiadanie domén podľa obr. 13.7 d). vyznačuje sa prakticky úplným potlačením magnetostatickej energie.



Obr. 13.7 Vznik doménovej štruktúry

Žiadne dve susedné domény sa nedotýkajú bezprostredne, ale sú oddelené priestorom nazývaným Blochova stena. V týchto medzi doménových stenách sa smer spinových magnetických momentov postupne mení, a preto je nutné chápať ich ako útvary priestorové, nie plošné.

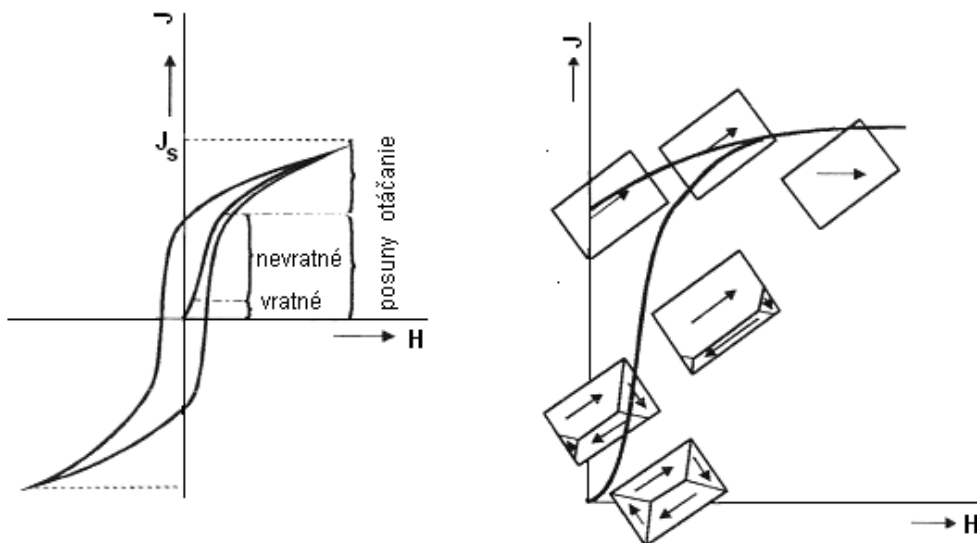
Stav nasýtenia sa nedosahuje samovoľne. Dosahuje sa až vo vonkajšom magnetickom poli. Tento fakt vysvetľujeme existenciou domén, malých objemov látky s usmernenými magnetickými momentmi (pre železo sa udáva objem  $10^{-3} \text{ cm}^3$ ). Vznik domén je spojený so snahou magnetickej látky znížiť vlastnú magnetickú energiu. Doménová štruktúra vedie k uzavretiu magnetických siločiar vo vnútri materiálu. Najjednoduchšia predstava o vzniku a o orientácii domén je na obr. 13.8.



Obr. 13.8 Magnetické domény a Blochova  $\pi$  stena

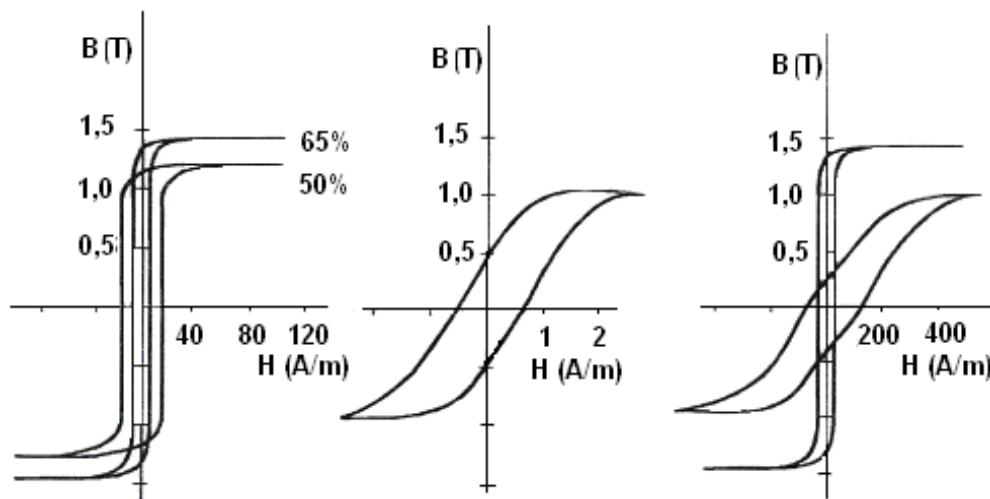
Orientácia magnetických momentov v susedných doménach sa od seba líši o  $90^\circ$  alebo o  $180^\circ$  a domény sú od seba oddelené oblasťami nazývanými Blochove steny, v ktorých magnetické momenty jednotlivých atómov postupne menia svoju orientáciu. Hrúbka steny je daná snahou zmenšiť energiu v nej skrytú. Pri magnetovaní vychádzame z predstavy o doménovej štruktúre usporiadanej tak, že výsledná magnetizácia je nulová. Vonkajšie magnetické pole je príčinou dvoch základných dejov: pohybu doménových stien a natáčania vektorov spontánnej magnetizácie domén. Pohyb stien zväčšuje domény súhlasne orientované s vonkajším poľom. Z uvedených mechanizmov sa uskutočňuje vždy ten, ktorý je energeticky menej náročný. Zväčša sa v slabých poliach pohybujú steny

a v silnejších dochádza k natáčaniu. Tento proces znázorňuje **krivka prvotnej magnetizácie** (obr. 13.9)



Obr. 13.9 Krivka prvotnej magnetizácie s maximálnou hysteréznou slučkou a so znázornenými zmenami doménovej štruktúry

V praxi sa používa hysterézná slučka v súradniciach  $B - H$ . Jej plocha je úmerná energetickým stratám v  $1 \text{ m}^3$  magnetika počas jedného obehu slučky. Tvary a veľkosti hysteréznych slučiek sa od seba líšia a to na základe chemického zloženia a štruktúry. Existujú rozdielne vplyvy, ktoré deformujú tvar hysteréznych slučiek: teplota, tlak, frekvencia, vzduchová medzera, premagnetovanie a pod. Slučky na obr. 13.10. znázorňujú rôzne tvary pre rozdielne aplikácie.



Obr. 13.10 Hysterézne slučky textúrovaných zliatin (65 % a 50 % textúry), magnetických materiálov typu izoperm a permivar

### 13.8 Magneticky mäkké kovy a zliatiny

Vyznačujú sa úzkou hysteréznou slučkou, veľkou hodnotou maximálnej magnetickej indukcie a malou koercitívitou.

Patria tu:

- ocele - odporúčené pre relé, meracie prístroje, elektromagnetické spojky a pod.
- zliatiny FeCo - vyznačujú sa maximálnou magnetickou indukciou, pripravuje sa aj s orientovanou štruktúrou. Zliatina má veľkú magnetostrikciu.
- kremíkové ocele - sú najrozšírenejšie v elektrotechnike, môžu izotropnú aj anizotropnú štruktúru a používajú sa napríklad pre jadrá transformátorov, pre jadrá nízkofrekvenčných tlmiviek, pre elektrické stroje netočivé a točivé, pre prístroje, pre výrobu transformátorového plechu.
- magneticky mäkká zliatina NiFe sa podľa obsahu niklu vyznačuje:
  - a) 75 - 80 % Ni - najväčšími hodnotami počiatkovej a maximálnej permitivity, malou koercitívou a malými hysteréznymi stratami, zliatina s prímiesami Cu, Cr, Mo, Mn sa nazýva *permalloye*.
  - b) 50 % Ni - najväčšou indukciou zo všetkých zliatin.
  - c) 36 % Ni - zliatina s názvom *invar* má najmenší teplotný súčiniteľ dĺžkovej rozťažnosti.
  - d) 30 % Ni - má nízku Curieho teplotu.
  - e) zátavové magneticky mäkké zliatiny FeNi, ktoré sa používajú sa pre výrobu kontaktov, ktoré sa zatavujú do olovnatého skla.
  - f) zátavové magneticky polotvrde zliatiny, ktoré sa používajú sa pre jazýčkové kontakty.

### 13.9 Magneticky tvrdé kovy a zliatiny

Vyznačujú sa širokou hysteréznou slučkou, zvyčajne sú mechanicky tvrdé. Patria tu: zliatina AlNiCo, zliatina FeCrCo, MnAlC, CuNiFe, SmCo, NdFeB. Používajú sa pre miniatúrne motorčeky, prenosky, slúchadlá, mikrofóny, krokové motorčeky analógových hodiniek.

### 13.10 Ferity

Vyznačujú sa kombináciou magnetických vlastností a veľkého elektrického odporu. Vstupnými materiálmi pri ich výrobe sú oxidy  $Fe_2O_3$ , MnO, NiO a ich výroba odpovedá keramickým technológiám, kedy sa postupne namiešajú namleté práškové suroviny, ktoré sa lisujú a vypaľujú. Používané sú pre jadrá vysokofrekvenčných cievok a transformátorov, pre výrobu keramických magnetov, na prenášanie veľkých výkonov u impulzných riadených zdrojov, u zvraciacich transformátorov a pod.

*Patria tu magneticky mäkké ferity na báze Mn-Zn a Mg-Mn-Zn, ktoré sa využívajú najmä v telekomunikačnej technike, ktorá požaduje materiály s najväčšou permeabilitiu, malým stratovým činiteľom, malým stratovým činiteľom, malými hysteréznymi stratami a zaručovanou rezistivitou (jadrá vychýľovacích cievok farebných obrazoviek, anténne tyče a pod.).*

*Magneticky tvrdé ferity sú oxidické materiály odpovedajúce chemickému zloženiu  $MeO \cdot 6Fe_2O_3$ , kde Me predstavuje bárium alebo stroncium. Vyrábajú sa keramickou technológiou a môžu byť izotropné alebo anizotropné. Používajú sa pre veľmi výkonné motory, pre toroidné magnety pre reproduktory.*

Medzi ferity so špeciálnymi vlastnosťami patria mikrovlnné ferity s granátovou štruktúrou, ferity s pravouhlou hysteréznou slučkou (feritové pamäte, miniatúrne toroidné jadrá, jadrové magnetické pamäte, ktoré sú však dnes nahrádzané polovodičovými pamäťovými súčiastkami s vyššou hustotou pamäte), magnetostrikčné ferity (pre rezonátory a detektory ultrazvukových vln) a hutné ferity (pre záznamové a čítacie hlavy)

### **13.11 Magnetické granáty**

Magnetické granáty sú monokryštalické ferimagnetické látky s obsahom vzácnych zemín a galidu železa. Základným typom je yttritoželezitý (YIG) a galitoyttritoželezitý granát (GaYIG). Používajú sa v mikrovlnnej technike.

### **13.12 Magnetické kompozity**

Magnetické kompozity sú tvorené feromagnetickou alebo ferimagnetickou látkou s nosným médiom (roztoky prírodných alebo syntetických živíc) a používajú sa pre magnetické zámky, magnetické gumené tesnenia, pre membrány reproduktorov, magnety pre korekciu farieb farebných obrazoviek, magnetické spínače, magnetické laky a lepidlá, magneticky aktívne vrstvy magnetických pásov a pod.