

## 1.1. Magnetické vlastnosti

Fyzikálnu podstatu *magnetizmu* podľa kvantovej teórie bližšie vysvetľuje predmet fyzika. Pre naše potreby vytvoríme zjednodušenú predstavu podstaty magnetizmu, pomocou ktorej môžeme pochopiť jednotlivé typy magnetizmu. Na začiatok si uvedieme základné pojmy. Hlavné materiálové charakteristiky magnetických materiálov sú:

- **Relatívna permeabilita**  $\mu_r$ , je závislá od intenzity magnetického poľa a od teploty a je definovaná vzťahom

$$\mu_r = \frac{B}{\mu_0 H}, \quad (1.1)$$

B – magnetická indukcia, H – intenzita magnetického poľa,  $\mu_0$  – permeabilita vákua

- **Magnetická susceptibilita**  $\chi_m$ , ktorá súvisí s relatívnou permeabilitou podľa vzťahu

$$\chi_m = \mu_r - 1, \quad (1.2)$$

- **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

$$B = \mu H, \quad (1.3)$$

- **Remanencia**  $B_r$ , t.j. magnetická indukcia pri nulovej intenzite magnetického poľa po predchádzajúcej magnetizácii do nasýtenia.

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

- **Magnetická susceptibilita**  $\chi_m$  (ale aj permeabilita  $\mu_r$ ) je fyzikálna veličina, ktorá opisuje správanie sa materiálu vo vonkajšom magnetickom poli.

Pri vysvetlení magnetických vlastností vychádzame z predpokladu, že okolo vodiča, ktorým tečie elektrický prúd, vzniká *elektromagnetické pole*. Každý elektrón pohybujúci sa v elektrónovom obale atómu, tvorí závit (vodič), ktorým tečie elektrický prúd. Magnetický moment, ktorý vznikne pohybom elektrónu v orbitále, nazývame *orbitálny („dráhový“) magnetický moment*  $M_l$ . Okrem tohto momentu vzniká ešte moment od rotácie elektrónu okolo vlastnej osi, ktorý sa nazýva *spinový magnetický moment*  $M_s$ . Magnetické vlastnosti materiálov (tuhých, kvapalných aj plyných) 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 pohybom 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 úplne kompenzované. Ak vložíme magneticky izotropnú látku do vonkajšieho magnetického poľa H, dôjde k modifikácii pohybu elektrónov v jednotlivých dráhach a látka indukuje magnetizáciu M. Indukovaná magnetizácia M je ovplyvnená intenzitou vonkajšieho magnetického poľa H a magnetickou susceptibilitou  $\chi_m$ . Podľa hodnoty magnetickej susceptibility môžeme materiály rozdeliť na:

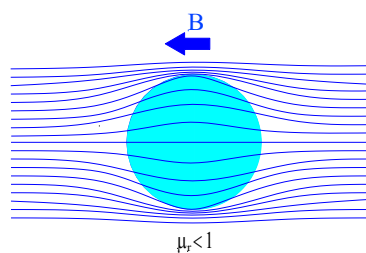
- diamagnetické ( $\chi_m < 0$ ),
- paramagnetické ( $0 < \chi_m < 1$ ),
- feromagnetické ( $\chi_m > 1$ ).

## 1.2. Diamagnetizmus

Diamagnetizmus ( $\chi_m < 0$ ,  $\mu_r < 1$ ), sa prejavuje v atónoch s párnym počtom elektrónov v orbitáloch s rovnakým kvantovým číslom  $l$ , to znamená, že spinový magnetizmus je úplne vykompenzovaný. Vložením takéhoto materiálu do magnetického poľa sa obežné dráhy elektrónov deformujú, čím sa v látke indukuje magnetický moment oslabujúci vonkajšie magnetické pole. Po zrušení vonkajšieho magnetického poľa tento efekt zaniká. Magnetická susceptibilita  $\chi_m$  je záporná a veľmi malá ( $-10^{-5}$ ), nezávislá od teploty a intenzity magnetického poľa. Medzi diamagnetické materiály patria inertné plyny, niektoré kovy (Cu, Ag, Au, Be, Pb, Hg, C, Si, Ge, B), nekovy (Si, P, S), keramické materiály ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) a väčšina organických látok (tab. 1.1).

Vložením diamagnetickej látky do vonkajšieho magnetického poľa dôjde v látke k zoslabeniu (vypudeniu) magnetického poľa a jeho obtekaniu okolo diamagnetickej látky (obr. 1.1). Výsledný magnetický moment je veľmi malý, orientovaný proti smeru aplikovaného magnetického poľa. Z toho vyplýva, že diamagnetické látky sú z magnetického poľa vytláčané.

Aj keď diamagnetizmus môžeme využiť pri štúdiu niektorých materiálov, nemá väčší význam. Treba však poznamenať, že diamagnetizmus sa vyskytuje vo všetkých látkach, t.j. diamagnetizmus spolupôsobí v paramagnetických aj feromagnetických látkach, ale jeho vplyv je minimálny a môžeme ho zanedbať. Zvláštnu skupinu diamagnetických materiálov tvoria supravodiče. V supravodivom stave sa správajú ako supradiamagnetiká a môžu sa využívať na magnetickú levitáciu.

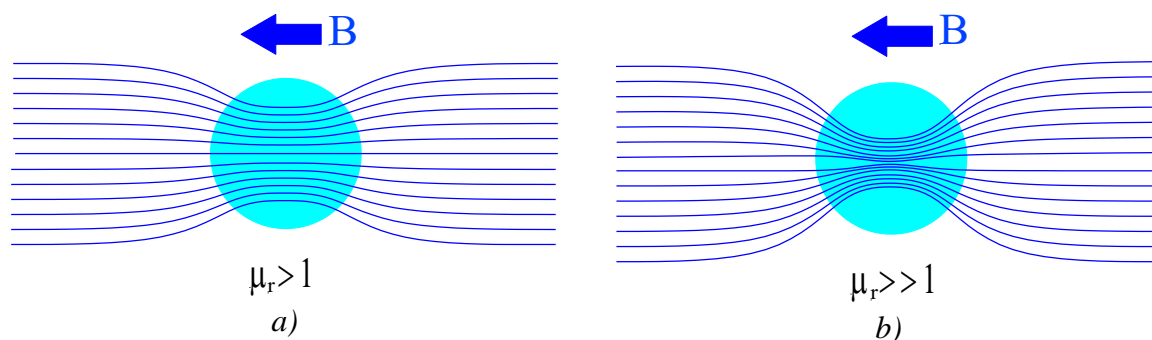


Obr. 1.1 Vplyv diamagnetika na magnetickú indukciu (vo vnútri diamagnetika sa  $B$  zoslabuje)

## 1.3. Paramagnetizmus

Paramagnetizmus ( $0 < \chi_m < 1$ ,  $\mu_r > 1$ ) – sa prejavuje v látkach, ktorých spinové momenty v atóme sú vykompenzované, výsledný magnetický moment je daný nevykompenzovanými dráhovými momentmi elektrónov, ktoré sú neusporiadané pokiaľ 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 (obr. 1.2). 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, Ba, Ca, Pt, Na, Mg,

U, Tc, Dy, Pt, W. Anomáliou paramagnetických vlastností sa vyznačujú alkalické kovy (Li, Na, K), pretože ich paramagnetizmus nezávisí od teploty.



Obr. 1.2 Vplyv paramagnetickej a feromagnetickej látky na magnetickú indukciu B

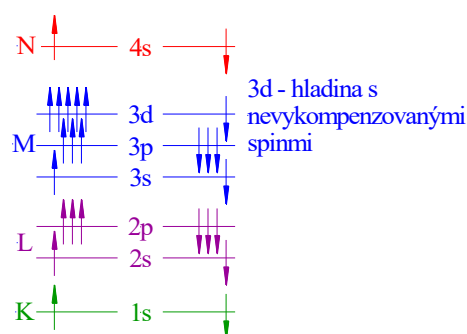
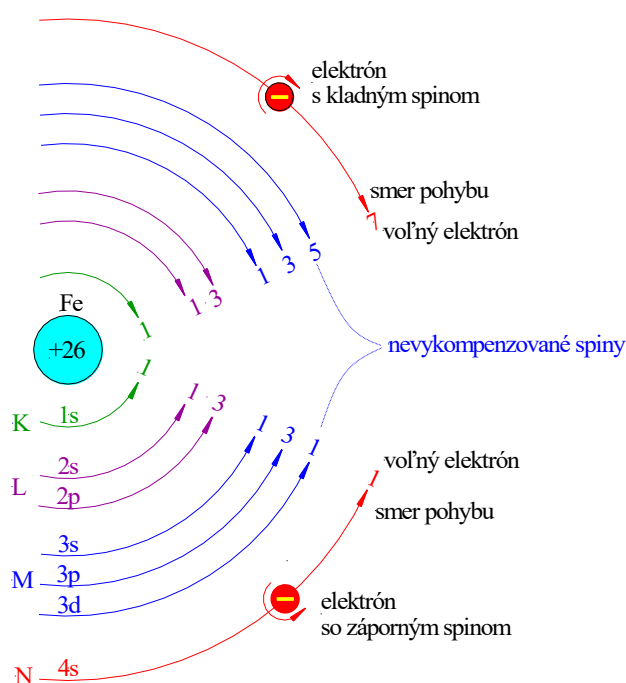
- a) Vo vnútri paramagnetickej látky sa B mierne zosilňuje, b) Vo vnútri feromagnetickej látky sa B intenzívne zosilňuje

Tab. 1.1 Magnetická susceptibilita niektorých diamagnetických a paramagnetických látok

Diamagnetiká		Paramagnetiká	
Látka	$\chi$ [ $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ ]	Látka	$\chi$ [ $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ ]
Antimón	$-10,2 \cdot 10^9$	Cín biely	$0,33 \cdot 10^9$
Argón	$-6,03 \cdot 10^9$	Draslík	$6,66 \cdot 10^9$
Arzén	$-0,9 \cdot 10^9$	Dysprózium	$7\,720 \cdot 10^9$
Berílium	$-12,6 \cdot 10^9$	Európium	$2\,740 \cdot 10^9$
Bizmut	$-16,3 \cdot 10^9$	Gadolínium	$28450 \cdot 10^9$
Bór	$-7,8 \cdot 10^9$	Chlorid kobaltnatý	$1222 \cdot 10^9$
Bróm	$-5,8 \cdot 10^9$	Chlorid nikelnatý	$785 \cdot 10^9$
Cín sivý	$-3,9 \cdot 10^9$	Chlorid železnatý	$1460 \cdot 10^9$
Diamant	$-6,2 \cdot 10^9$	Lítium	$45,6 \cdot 10^9$
Fosfor biely	$-10,8 \cdot 10^9$	Mangán	$122 \cdot 10^9$
Gálium	$-3,9 \cdot 10^9$	Molybdén	$10,9 \cdot 10^9$
Germánium	$-1,33 \cdot 10^9$	Neodým	$492 \cdot 10^9$
Grafit	$-270 \cdot 10^9$	Nikel	$28,9 \cdot 10^9$
Chlór	$-7,41 \cdot 10^9$	Paládium	$66,2 \cdot 10^9$
Kremík	$-1,38 \cdot 10^9$	Platina	$12,3 \cdot 10^9$
Meď	$-1,08 \cdot 10^9$	Samárium	$106 \cdot 10^9$
Olovo	$-1,38 \cdot 10^9$	Síran železnatý	$844 \cdot 10^9$
Ortuť	$-2,14 \cdot 10^9$	Sodík	$8,53 \cdot 10^9$
Striebro	$-2,39 \cdot 10^9$	Titán	$42,2 \cdot 10^9$
Telúr	$-3,9 \cdot 10^9$	Vanád	$73 \cdot 10^9$
Vodík	$-24,96 \cdot 10^9$	Vápnik	$13,8 \cdot 10^9$
Zinok	$-2,2 \cdot 10^9$	Wolfrám	$3,77 \cdot 10^9$
Zlato	$-1,76 \cdot 10^9$	Zirkónium	$16,7 \cdot 10^9$

## 1.4. Feromagnetizmus

Feromagnetizmus ( $\chi_m > 1$ ,  $\mu_r \gg 1$ ) - je odvodený z latinského slova *ferrum* (železo). Železo je najrozšírenejší feromagnetický materiál. Na obr. 1.3 je znázornené obsadenie jednotlivých sfér elektrónmi v atónoch železa. Na schéme vidieť, že vo sfére K sú dva elektróny - jeden s kladným a druhý sa záporným spinom. Podobne aj vo sfére L je rovnaký počet (1 + 3) elektrónov s kladným a záporným spinom. V oboch týchto sférach sú spinové magnetické momenty vykompenzované. Iná situácia je však vo sfére M, kde je spolu 9 elektrónov s kladným spinom (1 + 3 + 5) a 5 elektrónov so záporným spinom (1 + 3 + 1). Na dráhe 3d je 5 elektrónov s kladným spinovým momentom a len jeden so záporným spinovým momentom. V poslednej sfére (N) sú spinové momenty opäť vykompenzované. Na obr. 1.4 sú šípkami znázornené spinové momenty v pásmovej schéme atómu železa. Vidieť, že sféra M, na ktorej je znázornená hladina 3d, jedna z vnútorných sfér (obr.1.4). Z toho vyplýva, že atóm feromagnetickkej látky má nevykompenzované spiny na niektorej z vnútorných sfér, a z toho dôvodu sa prejavuje ako magnetický (bez pôsobenia vonkajších vplyvov). Podobná situácia je aj v paramagnetických látkach, ale ich magnetické momenty sú smerované chaoticky. Naproti tomu feromagnetické látky sú charakteristické magnetickými doménami (magnetickými oblasťami). Uvedené podmienky sú splnené v prechodných kovoch a vo vzácnych zeminách, ale zo všetkých kovov dlhej periódy sú feromagnetické pri teplotách miestnosti len železo, kobalt, nikel a čiastočne aj gadolínium.



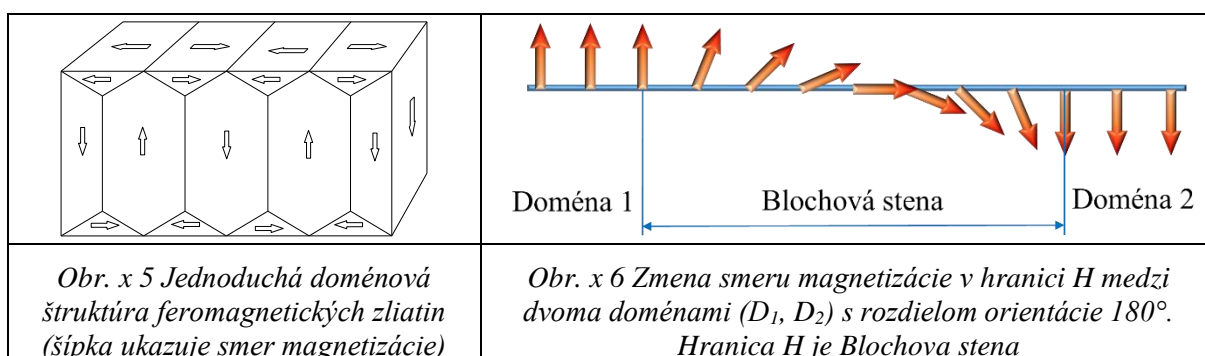
Obr. 1.3 Model atómu železa - obsadenie sfér a hladín elektrónmi s rôznymi spinmi

Obr. 1.4 Obsadenie energetických hladín elektrónmi s rôznymi spinmi

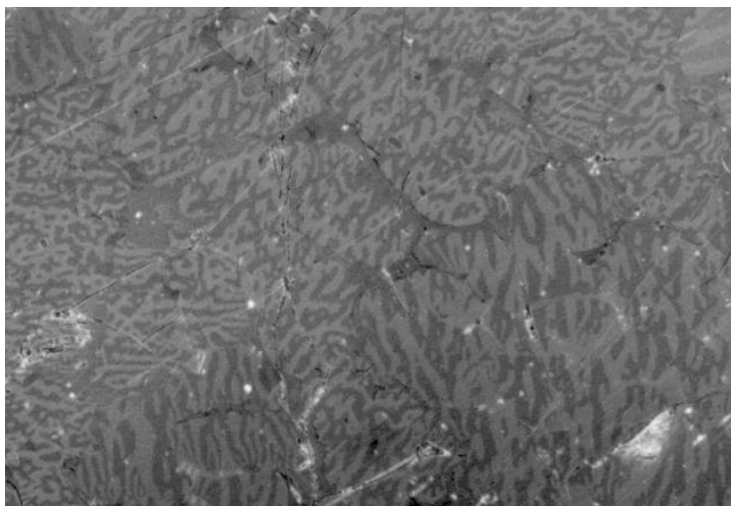
Feromagnetické látky majú polykryštalickú štruktúru. Pri kryštalizácii pôsobia výmenné sily, ktoré spôsobujú, že jednotlivé atómy sa usporiadajú tak, že ich magnetické momenty v určitej oblasti majú rovnaký smer aj zmysel - sú orientované paralelne. Tieto oblasti

nazývame magnetické domény. Každá doména je oblasťou materiálu, v ktorej sú spiny elektrónov súhlasné a tak je táto oblasť v zmagnetizovanom stave. V rôznych doménach je smer magnetizácie rôzny, nastáva vzájomné rušenie účinku jednotlivých domén tak, že látka ako celok sa javí ako nemagnetická (obr. 1.5). Kvantová fyzika vysvetľuje podstatu feromagnetizmu súbežnou orientáciou spinových momentov.

Ak pôsobí vonkajšie magnetické pole, magnetická energia domén orientovaných v smere magnetického poľa sa zníži a energia domén orientovaných proti smeru tohoto poľa sa zvýši. Výhodne orientované domény rastú na úkor ostatných domén migráciou hraníc, nazývaných **Blochove steny**. V týchto medzi-doménových stenách sa smer spinových magnetických momentov postupne mení, a Blochovu stenu musíme chápať ako priestorový a nie plošný útvar (obr. 1.6).



Pri intenzívnych vonkajších magnetických poliach, nepriaznivo orientované domény preskočia do výhodnejších orientácií. Všeobecným výsledkom toho je, že množstvo domén, orientovaných do jedného smeru vzrastá na úkor ostatnej časti materiálu a tak sa vzorka javí ako celok magnetická. Domény sú odlišné od zŕn polykryštalického kovu. Vo všeobecnosti platí, že jedno zrno, (resp. monokryštal) obsahuje niekoľko domén z čoho vyplýva, že materiál má tzv. doménovú štruktúru (obr. 1.7).



*Obr. x 7 Reálne usporiadanie magnetických domén v magneticky tvrdom materiáli (svetelný mikroskop, polarizované svetlo)*

V magnetickej doméne je látka zmagnetizovaná do nasýtenia bez účinku vonkajšieho magnetického poľa vzájomným pôsobením atómov medzi sebou, účinným len do kritickej (Curieho) feromagnetической teploty. Nad Curieho teplotou sa látka stáva paramagneticá.

Kryštály v prirodzenom stave majú tiež svoju doménovú štruktúru. Predstavme si dva tyčové magnety. Ak ich položíme na seba tak, že severný pól je proti južnému, oba magnety sa navzájom priťahujú. To znamená, že magnetická energia je nižšia, keď majú toto usporiadanie, v ktorom nie sú voľné póly, t.j. v ktorom každý pól je priťahovaný k pólu opačného znamienka.

Podobne je to aj v zmagnetizovanom kryštáli. Výsledkom toho je, že sa v nedeformovaných kryštáloch bežne vytvorí doménová štruktúra s veľkou pravidelnosťou, podobne ako je na obr. 1.7. Šírka domén závisí od magnetických vlastností materiálu a jej typická hodnota v zliatine Fe-Si (4 % Si) je asi 0,1 mm. Spodná hranica veľkosti domén je daná povrchovou energiou Blochových stien. Táto energia je kladná a ak sú domény dostatočne malé a potom celková povrchová energia materiálu rastie.

Experimentálne bolo pozorované, že úplnú magnetizáciu môžeme dosiahnuť menším magnetickým poľom v určitých kryštalografických smeroch ako v iných. Spontánna magnetizácia vo vnútri domén sa objavuje práve pozdĺž týchto smerov, t.j. smerov ľahkej magnetizácie. Tento jav je dôsledok magnetickej anizotropie. Smery ľahkej magnetizácie v železe sú  $\langle 100 \rangle$ , v nikle  $\langle 111 \rangle$  a v kobalte  $\langle 0001 \rangle$ .

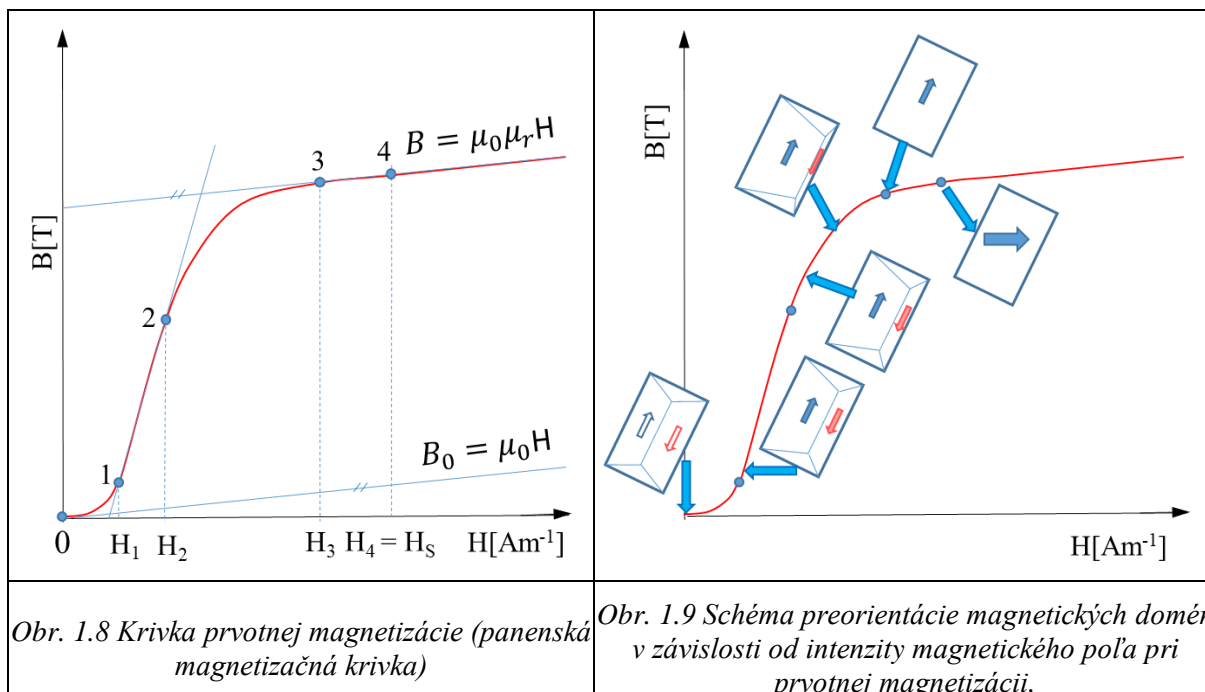
Z protikladných vplyvov výmennej energie a stáčania smeru magnetizácie v Blochových stenách vzniká rovnovážna hrúbka hranice domény a v železe je to približne 300 atómových vzdialeností. Povrchová energia hranice s rozdielom v orientácii  $180^\circ$ , rovnobežne s rovinami  $\{100\}$  v železe je asi  $1,8 \cdot 10^{-3} \text{ Jm}^{-2}$ .

Pri konkrétnych aplikáciách feromagnetík je veľmi dôležité poznať ich magneticke vlastnosti pri rôznych prevádzkových podmienkach. Vzhľadom na to, že závislosť magnetickej indukcie B od intenzity magnetického poľa H v týchto materiáloch nie je lineárna, ich vlastnosti sa vyjadrujú hlavne magnetizačnými krivkami.

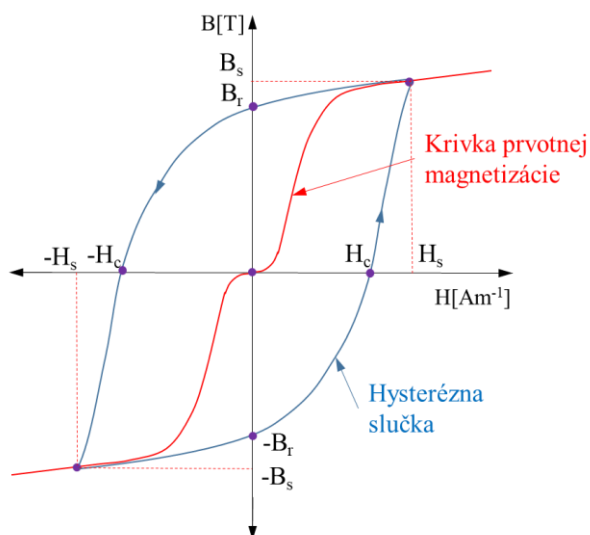
**Magnetizačná krivka** je závislosť magnetickej indukcie B (alebo magnetickej polarizácie J) od intenzity magnetického poľa H (obr. 1.8). Magnetizačné krivky sa získavajú meraním pri definovaných podmienkach (tvar vzorky, teplota, časový priebeh magnetizujúceho poľa, a pod.), najčastejšie sa vyjadrujú 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. Magnetizačnú krivku môžeme rozdeliť na päť základných častí (obr. 1.8). Prvá od 0 po 1 je vratná, lineárne nezávislá oblasť. Pri týchto intenzitách sa magneticke domény natáčajú v smere ľahkej magnetizácie, ale po odstránení magnetického poľa sa vrátia do pôvodnej polohy. Druhá oblasť od 1 po 2 má lineárny priebeh. V tejto oblasti sa magneticke domény postupne orientujú v smere ľahkej magnetizácie, ktorej vektor je najbližší k smeru magnetického poľa. Táto zmena je už nevratná a väčšina domén zostáva v novej orientácii. V oblasti od bodu 2 do bodu 3 sa do smeru ľahkej orientácie preorientávajú aj domény s výrazne rozdielnou orientáciou. Táto zmena je tiež nevratná. V oblasti od bodu 3 do bodu 4

nastáva spontánna magnetizácia a všetky domény sa preorientujú do smeru pôsobiaceho magnetického poľa. V tomto okamžiku nastáva stav magnetického nasýtenia pri intenzite  $H_s$ . V poslednej oblasti od bodu 4 sa magnetická indukcia mení nepatrne a lineárne a je daná súčinom relatívnej permeability  $\mu_r$ , permeability vákua  $\mu_0$  a magnetického poľa  $H$  podľa vzťahu 1.1. Tieto zmeny sú znázornené na obr. 1. 9. Túto závislosť nazývame „*krivka prvotnej magnetizácie*“ a charakterizuje feromagnetiká pri stacionárnom magnetovaní z odmagnetovaného stavu ( $H = 0, B = 0$ ) až do nasýtenia.

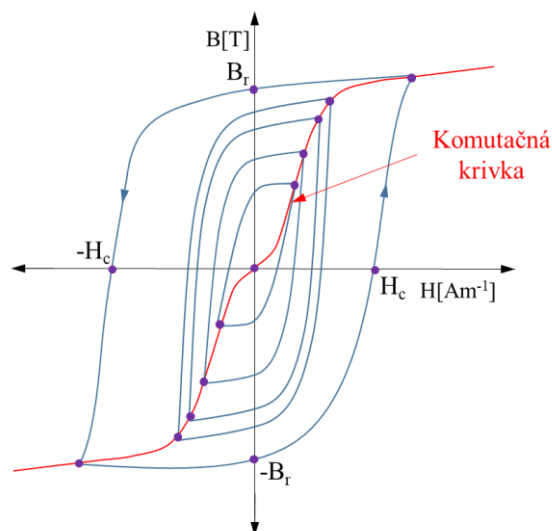
$$B = \mu_r \mu_0 H, \quad (1.1)$$



**Magnetická hysterézia** predstavuje zaostávanie zmien magnetizácie, príp. magnetickej indukcie za zmenami intenzity magnetického poľa. Pri cyklickom (periodickom) premagnetovaní feromagnetika zmenou intenzity magnetického poľa v jednotlivých cykloch priebeh magnetovania a odmagnetovania bude mať tvar **hysteréznej slučky**, ktorá predstavuje magnetizačnú charakteristiku feromagnetika (obr. 1.10). Hysteréznú slučku získame zmenou magnetického poľa z  $+H_m$  do  $-H_m$  a naopak, pričom zmena indukcie zodpovedá hodnotám, ktoré ležia na hysteréznej slučke a nie na krivke prvotnej magnetizácie. Vrcholy hysteréznych slučiek pre rôzne maximálne hodnoty  $H_m$  ležia na komutačnej krivke, ktorá je až na nízkej hodnote intenzity poľa, totožná s krivkou prvotnej magnetizácie. (Obr. 1.11).



Obr. 1.10 Hysterézná slučka ktorá vznikne pri zmene orientácie magnetického poľa



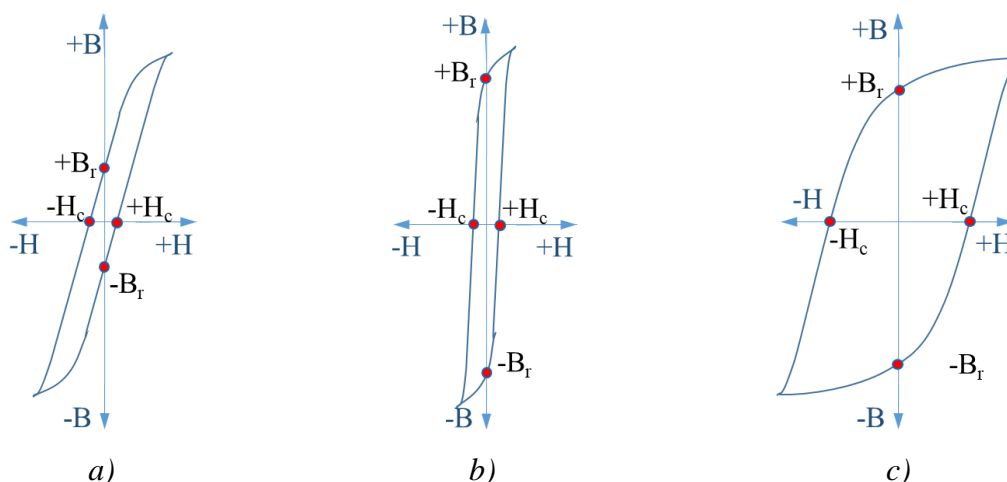
Obr. 1.11 Hysterézná slučka pri postupnej zmene amplitúdy magnetického poľa

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 indukcii  $B_m = B_s$  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.

**Koercitívna sila  $H_c$**  predstavuje pole intenzity  $H_c$ , ktoré vyvolá odstránenie tzv. remanentného (zvyškového) magnetizmu. Hlavné zdroje koercitivity v magnete podľa Néela sú lokálne magnetické polia, ktoré sa tvoria na nemagnetických inklúziách (nečistotách, vtrúseninách), alebo na dutých miestach v kove. Na povrchu týchto objektov sa tvoria voľné magnetické póly. S ich vznikom je spojená aj magnetická energia. Ak sa inklúzie nachádzajú v Blochovej stene, tieto póly sa môžu eliminovať a magnetická energia sa zníži, pretože sa môže vytvoriť doménová štruktúra typu, uvedeného na obr. 1.5. Medzi "magnetickými dutinami" a Blochovými stenami existuje teda príťažlivá sila. Potom Blochove steny majú sklon prichytávať sa na tieto magnetické dutiny. Keď sú Blochove steny blokované a nemôžu sa ľahko pohybovať, materiál ako celok sa ťažko magnetizuje. Ak však je takýto materiál zmagnetizovaný, rovnako ťažko sa dá odmagnetizovať a z toho dôvodu je dobrým trvalým (permanentným) magnetom. V prípade, že Blochove steny nemajú pri pohybe prekážky, t.j. sú pohyblivé, materiál po magnetizácii sa dá ľahko odmagnetizovať a takéto materiály sú magneticky mäkké. Z toho vyplýva, že feromagnetické materiály môžeme klasifikovať ako *magneticky mäkké* (pre budené magnety), alebo *magneticky tvrdé* (pre permanentné magnety),



a charakterizuje ich plocha hysteréznej slučky (obr. 12). Magneticky mäkké materiály majú úzku hysteréznú slučku (má malú plochu), t.j. na premagnetovanie je potrebná nízka hodnota  $H_c$  (obr. 1.12 a, b). Naopak, magneticky tvrdé materiály majú plochu hysteréznej slučky veľkú (obr.1.12 c), t.j. na premagnetovanie je potrebná vysoká hodnota  $H_c$ .



Obr. 1.12 Charakteristické tvary hysteréznych slučiek. a), b) – magneticky mäkké materiály, c) – magneticky tvrdé materiály.

Pri hľadaní magneticky mäkkých materiálov bolo zistené, že prvky, ktoré tvoria intersticiálne tuhé roztoky so železom, najvýraznejšie rozširujú hysteréznú slučku. Z toho dôvodu sa tieto nečistoty odstraňujú z magneticky mäkkých materiálov (napr. z transformátorovej ocele) tavením vo vákuu, alebo žíhaním vo vodíku. Proces je však nákladný, a z toho dôvodu sa používajú zliatiny železa a kremíka, prípadne železa a niklu (kremík aj nikel znižujú množstvo uhlíka v roztoku). Pri výrobe zliatin železa s kremíkom sa sleduje hlavne veľkosť zrna, rozdiel orientácie medzi jednotlivými zrnami a prítomnosť nemagnetických vtrúsenín. Koercitívna sila rastie s klesajúcim rozmerom zrna a klesá so zväčšovaním množstva zrn orientovaných do smeru ľahkej magnetizácie. Tieto vlastnosti sa získavajú valcovaním a kritickým žíhaním.

Pri vývoji magneticky tvrdých materiálov je treba pomocou legovania a tepelného spracovania získať štruktúru s jemne rozptýlenými časticami (precipitátmi) inej fázy. Tieto precipitáty vyvolávajú vznik deformácií mriežky a blokujú pohyb Blochových stien.

Zmena charakteru a usporiadania štruktúry má výrazný vplyv na magnetické vlastnosti. Proti usporiadaniu momentov pôsobí tepelný pohyb atómov. Z toho dôvodu sa nad určitou teplotou, ktorú nazývame **Curieova teplota** ( $T_c$ ), feromagnetizmus zmení na paramagnetizmus ( $T_{cFe} = 768$  °C,  $T_{cNi} = 365$  °C). Tento proces sa dá vysvetliť na základe termodynamických úvah. Prídavná entropia spojená s neusporiadaním spinov elektrónov robí neusporiadaný (paramagnetický) stav termodynamicky stabilnejší pri vyšších teplotách.

Aj keď môžeme Curieovu teplotu  $T_c$  určiť relatívne presne, spontánna magnetizácia nemizne pri tejto teplote okamžite. Okrem toho aj niektoré vlastnosti sa nemenia skokom, ale v určitom teplotnom intervale, ktorý nazývame *Curieovou teplotnou oblasťou*. Náhly pokles

spontánnej magnetizácie znamená, že zaniklo feromagnetické usporiadanie na krátku vzdialenosť a s rastúcou teplotou sa postupne ruší.

Medzi magneticky mäkké materiály patria zliatiny FeSi - kremíkové ocele, ktoré sú v elektrotechnike najčastejšie používané. Môžu mať izotropnú aj anizotropnú štruktúru a používajú sa napríklad pre jadrá transformátorov, nízkofrekvenčných tlmiviek, pre elektrické stroje netočivé aj točivé a pre rôzne prístroje.

Magneticky mäkká zliatina NiFe sa podľa obsahu niklu vyznačuje:

- a) Zliatiny s obsahom Ni 75 až 80 %, sa vyznačujú najvyššími hodnotami počiatocnej a maximálnej permitivity, malou koercitívou a malými hysteréznymi stratami;
- b) zliatina s prímiesami Cu, Cr, Mo, Mn sa nazýva permalloy;
- c) Zliatiny s obsahom Ni 50 %, sa vyznačujú najväčšou indukciou zo všetkých zliatin.
- d) Liatiny s obsahom Ni 36 %, s názvom invar má najmenší teplotný súčiniteľ dĺžkovej rozťažnosti;
- e) Zliatiny s obsahom Ni 30 %, majú nízku Curieho teplotu;
- f) Zátavové magneticky mäkké zliatiny FeNi, sa používajú sa na výrobu kontaktov, ktoré sa zataľujú do olovnateho skla, prípadne pre jazýčkové kontakty.

Magneticky tvrdé kovy a zliatiny sa vyznačujú širokou hysteréznou slučkou a obyčajne sú aj mechanicky tvrdé. Sem patrí:

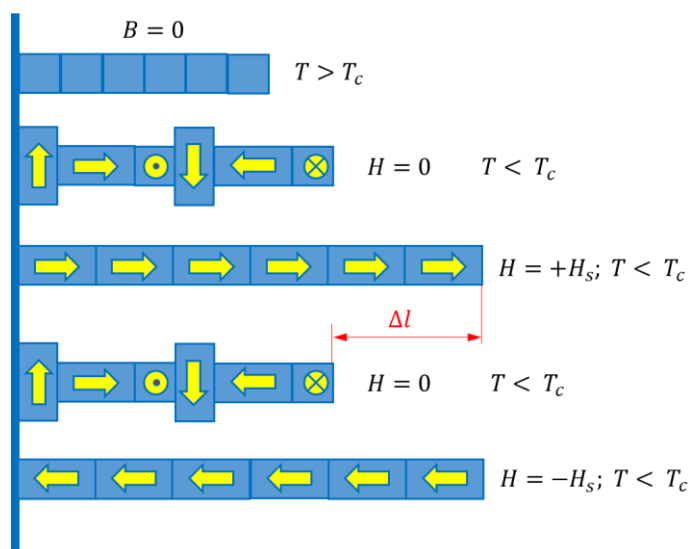
- a) zliatina AlNiCo;
- b) zliatiny FeCrCo, MnAlC, CuNiFe;
- c) zliatiny SmCo a NdFeB, ktoré sa používajú pre miniatúrne motorčeky, prenosky, slúchadlá, mikrofóny, krokové motorčeky analógové hodinky a rôzne snímače a detektory.

## 1.5. Magnetostrikcia

Veľmi zaujímavý efekt má magnetické pole na tvar a objem v niektorých materiáloch. Tento jav sa nazýva magnetostrikcia. Zmeny sú vyvolané usmerňovaním orientácie jednotlivých domén. Z definovaného počiatocného rozloženia magnetizácie do nasýtenia ( $H_s$ ) sa mení orientácia jednotlivých domén, a to v určitom kryštalografickom smere a tým sa mení aj rozmer. Magnetostrikcia je vratná zmena medzi mechanickou a magnetickou formou energie. Schopnosť premeny množstva energie z jednej formy na druhú umožňuje využitie magnetostrikčných materiálov (MsM) v aktuátoroch a senzoch.

Na obr. 1.13 je schematicky znázornený **Jouleov jav**. Ide o expanziu pozitívnym magnetickým poľom, alebo kontrakciu negatívnym magnetickým poľom feromagnetického materiálu vo vzťahu k pozdĺžnemu magnetickému poľu. Pri absencii magnetického poľa sa tvar vzorky vráti do svojich pôvodných rozmerov. Tento jav je hlavne používaný v magnetostrikčných aktuátoroch. MsM jav sa vyskytuje v niektorých zliatinách železa, niklu a kobaltu, z ktorých sa vyrábajú magnetostrikčné meniče, používané v rôznych technických aplikáciách (reproduktory, snímače, aktuátory, akumulátory energie a pod.). Magnetostrikčný jav sa síce vyskytuje vo všetkých feromagnetických materiáloch, ale jeho účinok je potlačený

úpravou chemického zloženia a štruktúrou. Napriek tomu sa môže prejavit' zvukovým efektom (bzučanie transformátorov, motorov, indukčných cievok a pod.).



Obr. 1.13 Schéma spontánnej deformácie magnetostrikčného materiálu zmenou intenzity magnetického poľa

Ďalší rozšírený jav vzťahujúci sa k magnetostrikcii je **Villariho jav**. Tento efekt je založený na pôsobení mechanického napätia na materiál, čím sa zmení hustota magnetického toku, ktorá prúdi cez materiál a výsledkom je vytvorenie magnetického poľa. Zmena hustoty toku môže byť zaznamenaná snímacou cievkou. Získané elektrické napätie je priamo úmerné aplikovanému mechanickému napätiu. Villariho efekt je reverzibilný a používa sa v senzorových aplikáciách. Magnetostrikčný jav je aplikovateľný iba v oblasti elastických deformácií, t.j. v intervale, kde platí Hookov zákon.

Medzi najznámejšie magnetostrikčné materiály patrí zliatina FeCo, ktorá sa vyznačuje maximálnou magnetickou indukciou a vysokou magnetostrikciou. Pripravuje sa s orientovanou štruktúrou.

## 1.6. Antiferomagnetizmus

Antiferomagnetizmus sa prejavuje v látkach, ktoré majú antiparalelne orientované spinové momenty vplyvom výmenných síl. Susceptibilitu majú rádovo podobnú ako paramagnetiká. Do tejto skupiny látok patria oxidy a chloridy prechodných prvkov a počet materiálov s touto vlastnosťou neustále rastie. Z kovových zliatin sem patria napr. niektoré zliatiny Cr, Mn<sub>α</sub>, ale aj niektoré zliatiny Cu.

Niektoré vlastnosti antiferomagnetizmu sú v mnohom podobné feromagnetizmu a môžeme ich zhrnúť nasledujúcim spôsobom:

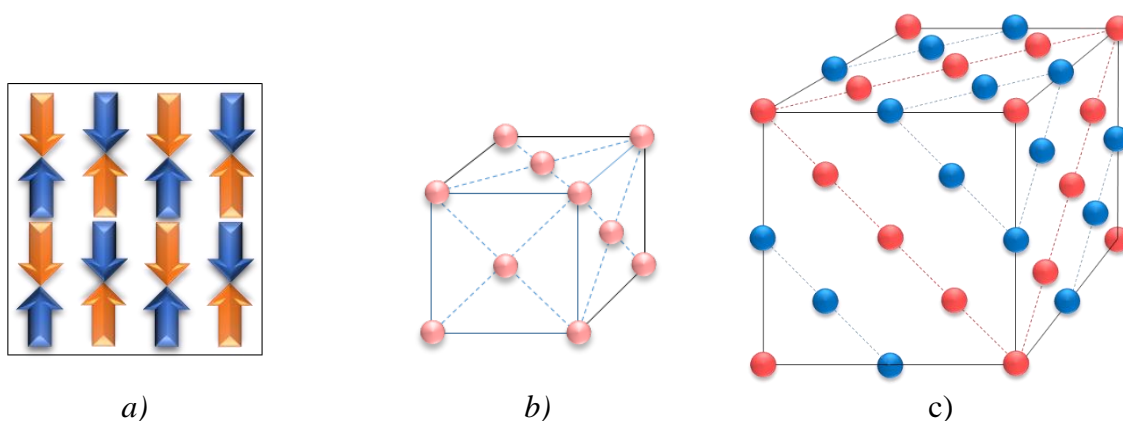
- Smery magnetizácie sú usporiadané paralelne alebo antiparalelne vzhľadom ku kryštalografickým osiam, t.j. v MnI a CoO sú momenty iónov Mn<sup>2+</sup> a Co<sup>2+</sup> vyrovnané pozdĺž hrany kocky elementárnej bunky. Spoločné smery sa nazývajú smery antiferomagnetizmu;

- b) Stupeň antiferomagnetického usporiadania na dlhú vzdialenosť progresívne klesá s rastúcou teplotou a je nulový pri kritickej teplote  $T_N$ , známej ako *Néelova teplota*, čo je antiferomagnetický ekvivalent Curieovej teploty;
- c) Antiferomagnetická doména je oblasť, v ktorej je jediný spoločný smer antiferomagnetizmu a ktorý je pravdepodobne ovplyvňovaný poruchami a deformáciami v mriežke. Výsledný magnetický moment domény je rovný nule na rozdiel od domény vo feromagnetickej látke. Najtypickejšou vlastnosťou antiferomagnetických látok je maximum na krivke závislosti susceptibility  $\chi$  od teploty (obr. 1.15).

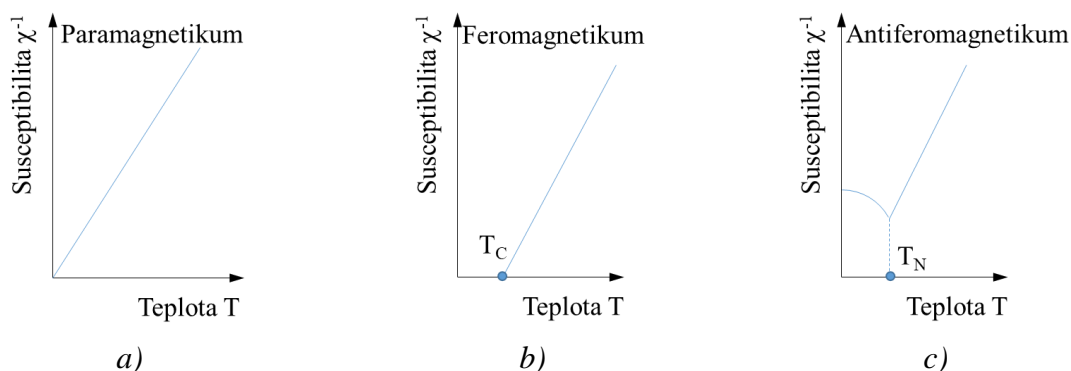
Pri vzraste teploty od 0 K sa znižuje interakcia vedúca k antiparalelnému usporiadaniu spinov, a pri teplote  $T_N$  sú všetky spiny voľné. Nad touto teplotou je materiál paramagnetický tak, že susceptibilita klesá s rastúcou teplotou podľa Curieovho-Weisssovoho zákona

$$\chi = k/T; \quad (1.4)$$

Kde  $k$  je konštanta a  $T$  je teplota v stupňoch K.



Obr. x 14 Usporiadanie magnetických domén v antiferomagnetickom materiáli. a) antiparalelné usporiadanie domén, b) kryštálová mriežka, c) magnetická podmriežka



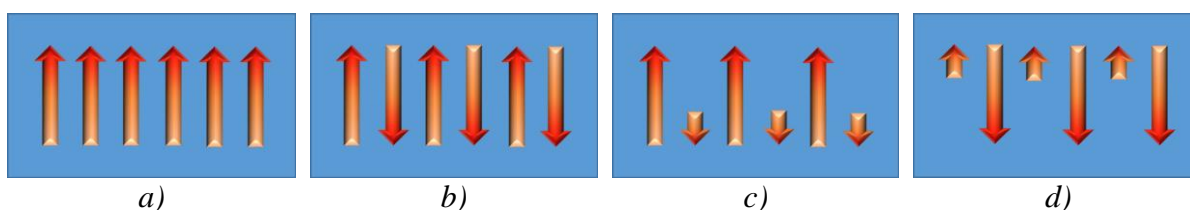
Obr.1.15 Teplotná závislosť prevrátenej hodnoty susceptibility pre tri rôzne magnetiká s vyznačenou Curieho teplotou  $T_C$ , Néelovou teplotou  $T_N$

Pod teplotou  $T_N$  sa v materiáli magnetické podmriežky rovnakých magnetických iónov, alebo atómov vzájomne prenikajú a magnetizácia je v antiparalelnom usporiadaní. Ich vzájomné pôsobenie je kompenzované tak, že výsledný magnetický moment je nulový (Obr. 1.14).

Pri Néelovej teplote dochádza k porušeniu antiparalelnej orientácie spinov a materiál prechádza do paramagnetického stavu. Patria sem oxidy, sulfidy, chloridy mangánu, chrómu, železa, kobaltu a niklu.

## 1.7. Ferimagnetizmus

Ferimagnetizmus je zvláštnym prípadom antiferomagnetizmu. Antiparalelné susedné magnetické momenty však nie sú rovnaké a tým sa nevykompenzujú, to znamená, že prejavujú rozdielový magnetický moment. Patria sem ferity - zlúčeniny  $Fe_2O_3$  s oxidmi niektorých kovov s oxidačným číslom +II (Mg, Zn, Cu, Fe, Mn). Porovnanie orientácie a veľkosti feromagnetických materiálov je znázornené na obr. 1.16.



Obr. 1. 16 Schematické znázornenie orientácie magnetických momentov v látke vloženej do magnetického poľa: a) – feromagnetická látka, b) – antiferomagnetická látka, c), d) – ferimagnetická látka

Ferimagnetické materiály sa vyznačujú kombináciou magnetických vlastností a veľkého elektrického odporu. Vstupnými materiálmi pri ich výrobe sú oxidy  $Fe_2O_3$ ,  $MnO$ ,  $NiO$  a ich výroba zodpovedá keramickým technológiám, pri ktorých sa postupne namiešajú namleté práškové suroviny, a potom sa lisujú a vypaľujú. Používajú sa na jadrá vysokofrekvenčných cievok a transformátorov, na výrobu keramických magnetov, na prenášanie veľkých výkonov v impulzných riadených zdrojoch, vo zvracích transformátoroch a pod. Patria sem magneticky mäkké ferity na báze Mn-Zn a Mg-Mn-Zn, ktoré sa využívajú najmä v telekomunikačnej technike, v ktorej sa vyžadujú materiály s vysokou permeabilitou, malým stratovým činiteľom, malými hysteréznymi stratami a zaručenou rezistivitou (jadrá vychyľovacích cievok farebných obrazoviek, anténne tyče apod.). Magneticky tvrdé ferity sú oxidové materiály zodpovedajúce chemickému zloženiu  $MeOx6Fe_2O_3$ , kde Me predstavuje bárium alebo stroncium. Vyrábajú sa keramickou technológiou a môžu byť izotropné alebo anizotropné. Používajú sa pre veľmi výkonné motory, 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).

---

Materiály s ferimagnetickými vlastnosťami sa v praxi označujú ako ferity. Ferit ako feromagnetický materiál nemá nič spoločné s feritom zo sústavy Fe-C. Ferimagnetický ferit je keramický materiál na báze oxidu železa, je elektricky nevodivý a krehký. Tuhý roztok uhlíka v železe sa môže vyskytovať ako ferit  $\alpha$ , alebo ferit  $\delta$ , je elektricky vodivý a schopný plasticky sa deformovať.

- [1] A. G. Olabi and A. Grunwald, "Design and application of magnetostrictive materials," *Mater. Des.*, vol. 29, no. 2, pp. 469–483, 2008.
- [2] N. Lupu, "Magnetostriction vs . Magnetoelastic Effects," 2007.
- [3] T. Zhang, B. T. Yang, H. G. Li, and G. Meng, "Dynamic modeling and adaptive vibration control study for giant magnetostrictive actuators," *Sensors Actuators, A Phys.*, vol. 190, pp. 96–105, 2013.
- [4] P. Bobes-Limenes, J. A. García, J. Carrizo, M. Rivas, and J. C. Martínez-García, "Inverse Wiedemann effect in Fe-Al alloys for torque sensing applications," *Sensors Actuators, A Phys.*, vol. 180, pp. 45–48, 2012.
- [5] J. Luňáček, O. Životský, Y. Jirásková, J. Buršík, P. Janoš, Thermally stimulated iron oxide transformations and magnetic behaviour of cerium dioxide/iron oxide reactive sorbents, *Materials Characterization* 120, pp. 295-303, 2016.
- [6] A. Chrobak, G. Haneczok, O. Životský, A. Hendrych, J. Kansy, B. Kotur, Optimization of Soft Magnetic Properties in Fe<sub>82</sub>Nb<sub>2</sub>B<sub>14</sub>RE<sub>2</sub> (RE = Y, Gd, Tb and Dy) Group of Amorphous Alloys, *Acta Physica Polonica A* 130, pp. 916-919, 2016.
- [7] G. Ziolkowski, A. Chrobak, J. Klimontko, D. Chrobak, O. Životský, A. Hendrych, J. Rak, High coercivity in Fe–Nb–B–Dy bulk nanocrystalline magnets, *Physica Status Solidi A, Applications and Materials Science* 213, pp. 2954-2958, 2016.
- [8] R. Siddheswaran, P. Šutta, P. Novák, M. Netrvalová, A. Hendrych, O. Životský, In-situ X-ray diffraction studies and magneto-optic Kerr effect on RF sputtered thin films of BaTiO<sub>3</sub> and Co, Nb co-doped BaTiO<sub>3</sub>, *Ceramics International* 42, pp. 3882-3887, 2016.
- [9] Feynman, R.P.; Leighton, R.B.; Sands, M.: Feynmanovy přednášky z fyziky {2. díl. Fragment, 2013, ISBN 9788025316436.
- [10] Coey, J.: Magnetism and Magnetic Materials. Cambridge University Press, 2010, ISBN 9780521816144.