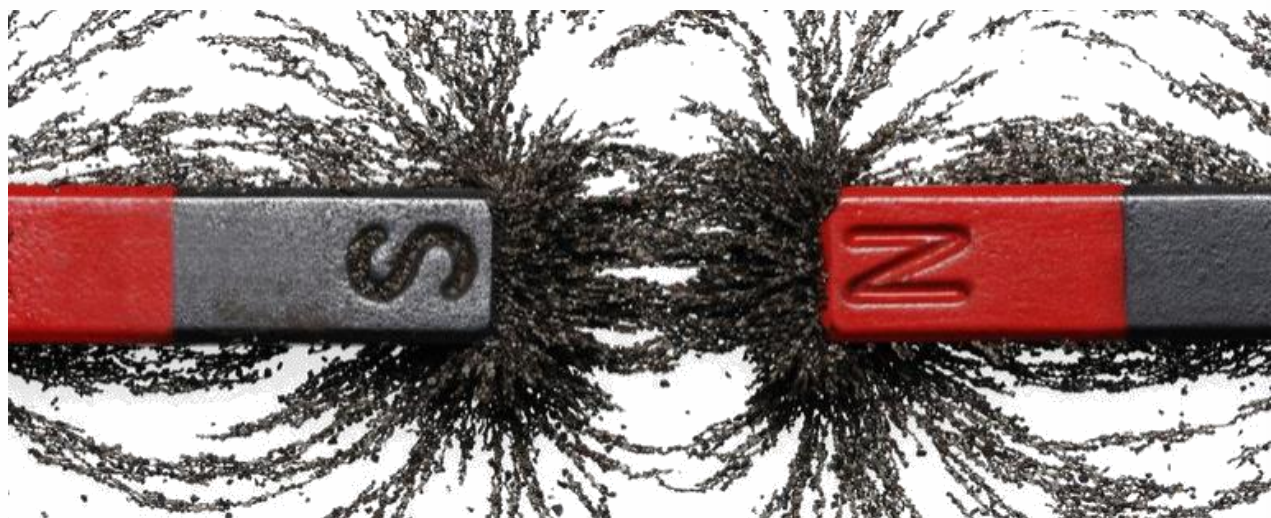


12

Materiály pro magnetické obvody elektrických zařízení



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MSMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Co se v přednášce dozvíte?

- VYSVĚTLÍME SI PODSTATU MAGNETICKÉHO CHOVÁNÍ LÁTEK.
- UKÁŽEME SI, JAK SE CHOVÁJÍ JEDNOTLIVÉ LÁTKY PŘI INTERAKCI S VNĚJŠÍM MAGNETICKÝM POLEM.
- POPÍŠEME SI ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI MAGNETIK.
- VYSVĚTLÍME SI, ŽE CURIEOVOU TEPLOTA NENÍ STEJNÁ PRO VŠECHNY MAGNETICKÉ MATERIÁLY.
- VYSVĚTLÍME SI ROZDÍL MEZI KŘIVKOU PRVOTNÍ MAGNETIZACE A HYSTEREZNÍ SMYČKOU.
- UKÁŽEME SI, JAKÝMI ZPŮSOBY LZE OVLIVŇOVAT VLASTNOSTI MAGNETICKÝCH MATERIÁLŮ.
- SEZNÁMÍME SE S TYPICKÝMI PŘEDSTAVITELI MAGNETICKY MĚKKÝCH A MAGNETICKY TVRDÝCH MATERIÁLŮ.



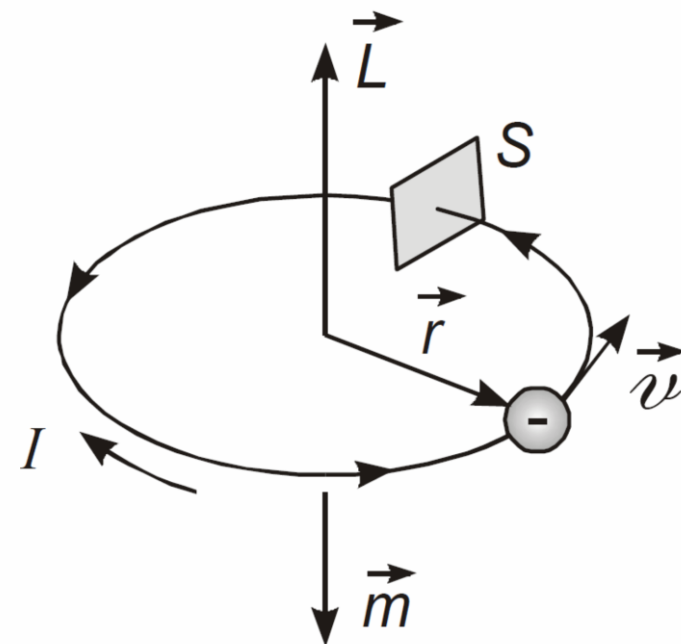
12.1 Fyzikální podstata magnetismu

Elektrony i protony mají (i) *elektrický náboj* a (ii) *pohybují se*, proto můžeme říci, že kolem nich vzniká **magnetické pole**. Existence magnetismu je tedy **přírozenou vlastností všech látek**. V tomto smyslu má každá látka magnetické vlastnosti, ale **ne vždy je lze technicky využít**.

12.1.1 Pohyb elektronů

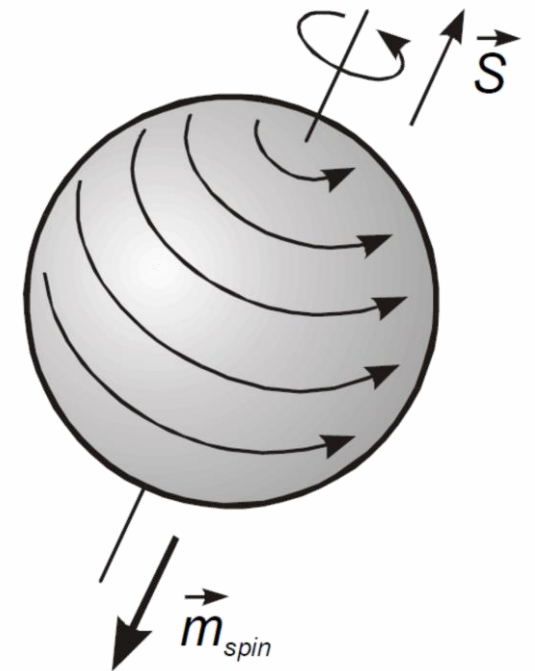
V kvantové mechanice uvažujeme dvojí pohyb elektronů (i) **pohyb elektronu kolem jádra po orbitalu** a (ii) **rotaci elektronu jakožto nabité koule kolem své osy** (*spin elektronu*).

Představa odvozená z klasického modelu atomu: Elektron obíhající rychlostí $\vec{v}$ po kružnici o poloměru r . Elektron nese záporný náboj o velikosti e a vytváří tak *elektrický proud* I , který lze určit jako náboj prošlý průřezem (např. plochou S) za jednotku času.



Elektronu obíhajícímu kolem jádra po orbitě náleží **orbitální moment hybnosti** $\vec{L}$ a také odpovídající **orbitální magnetický moment** $\vec{m}$. Směr vektoru $\vec{m}$ je **kolmý k rovině orbitu** a jeho orientace je daná znaménkovou konvencí pro **směr proudu** a **pravidlem pravé ruky** pro magnetický moment proudové smyčky.

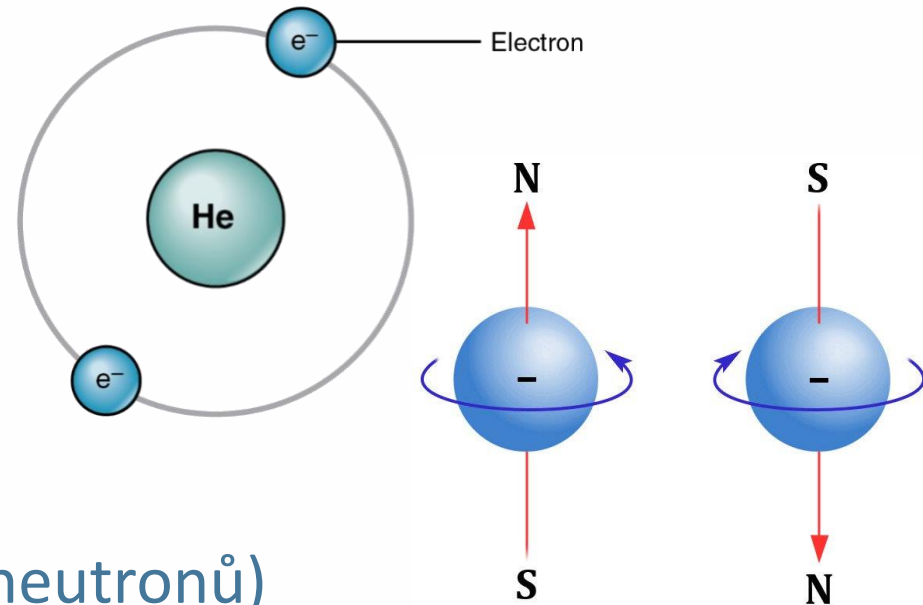
Taktéž **rotaci elektronu** jakožto nabité koule **kolem své osy** (spinu elektronu) přísluší **vnitřní moment hybnosti** $\vec{S}$ a rovněž i odpovídající magnetický moment, který označujeme jako **spinový magnetický moment** $\vec{m}_{spin}$.



Výsledný mg. moment atomu nebo molekuly je vektorovým součtem orbitálních a spinových mg. momentů všech elektronů.

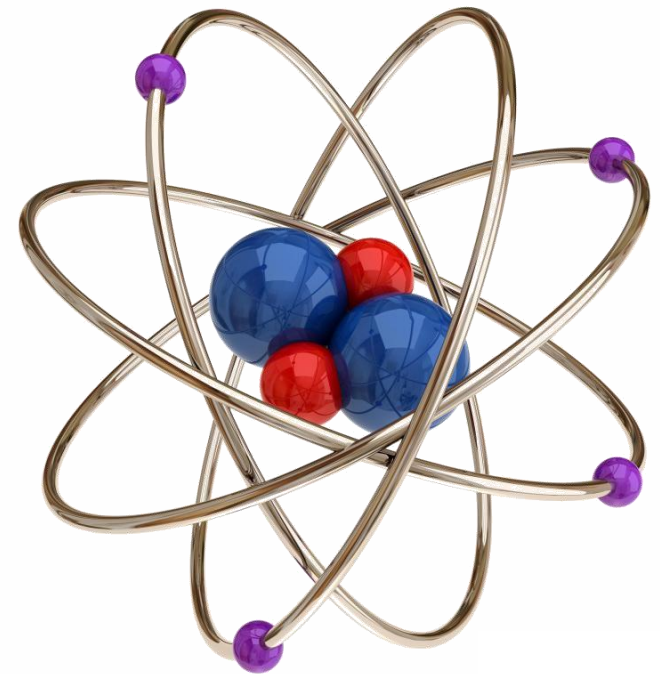
Pro **velké množství atomů** platí, že **orbitální mg. momenty** jednotlivých elektronů se **vyruší** z důvodů **odlišné prostorové orientace momentu hybnosti** jednotlivých elektronů.

U **spárovaných elektronů** (ve valenčním pásu tvoří „nedělitelnou“ dvojici – např. atom *He* s jednou dvojicí spárovaných valenčních elektronů) se **vyruší i spinové momenty** a výsledný mg. moment částice **bez přítomnosti mg. pole je nulový**.



12.1.2 Pohyb jader atomů (protonů a neutronů)

Jádra atomů rovněž **přispívají k magnetickému momentu částic** (atomů nebo molekul). Nicméně, **hmotnosti jaderných částic** jsou řádově **1000 krát větší než hmotnost elektronů**, a také **poloměry drah**, po kterých se pohybují, jsou **významně menší** => také jejich **mg. momenty** jsou řádově **1000 krát menší než mg. momenty elektronů**. Často proto jejich příspěvky k celkovému magnetickému momentu atomů **můžeme zanedbat**.



12.2 Rozdělení látek dle mg. momentů atomu

12.2.1 Magnetizace látky

Z makroskopického hlediska můžeme mg. vlastnosti látek popsat pomocí **vektorové veličiny magnetizace $\vec{M}$** , která má význam **magnetického momentu jednotky objemu**. Látky charakterizované magnetizací, nazýváme **magnetika**.

Látky vykazující **nulovou magnetizaci** mohou být tvořeny (i) **částicemi bez vnitřního mg. momentu** nebo (ii) **nahodile uspořádanými částicemi s nenulovým mg. momentem** jejichž mg. momenty se **vyruší**.

Magnetizace látky je ovlivněna fyzikálními a chemickými podmínkami (např. **teplotou**) a záleží také na tom, zdali je látka **vložena do magnetického pole**.

Z hlediska chování v mg. poli můžeme látky rozdělit na:

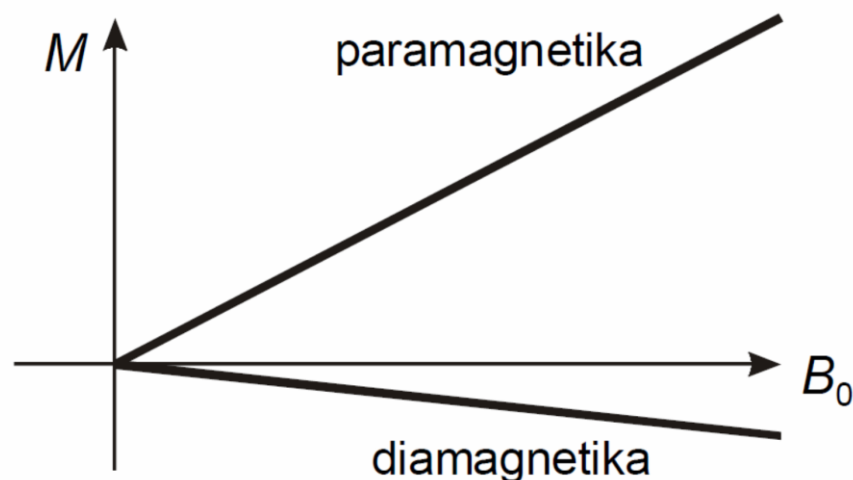
- **látky slabě magnetické** – magnetizace látky po vložení do magnetického pole nabývá pouze malých hodnot;
- **látky silně magnetické** – vykazují velké hodnoty magnetizace.



Magnetické vlastnosti látky jsou dále charakterizovány:

- **relativní (poměrnou) permeabilitou μ_r** a
- **magnetickou susceptibilitou χ_m** ($\chi_m = \mu_r - 1$).

Pro určitou skupinu látek platí, že $\mu_r < 1$. To znamená, že vnější mg. pole je po vložení magnetika **zeslabeno**. Hodnota μ_r je nicméně velmi blízká 1, neboť toto **zeslabení je velmi malé**. V tomto případě mluvíme o látkách **diamagnetických**. Pro další skupinu látek je $\mu_r > 1$, tedy mg. pole je po vložení magnetika **mírně zesíleno**, a mluvíme o látkách **paramagnetických**.



Závislost magnetizace na mg. indukci v případě lineárních magnetik ↑.

← **Poznámka:** Směrnice obou závislostí mají opačná znaménka, tj. **vektor magnetizace** má v případě **paramagnetických látek** **souhlasný směr** jako mg. indukce vnějšího pole B_0 , v případě **diamagnetických látek** je jeho **směr opačný**.

Paramagnetika a diamagnetika řadíme mezi **lineární magnetika** – jejich μ_r je **konstantní** a **nezávislá na intenzitě vnějšího mg. pole**.

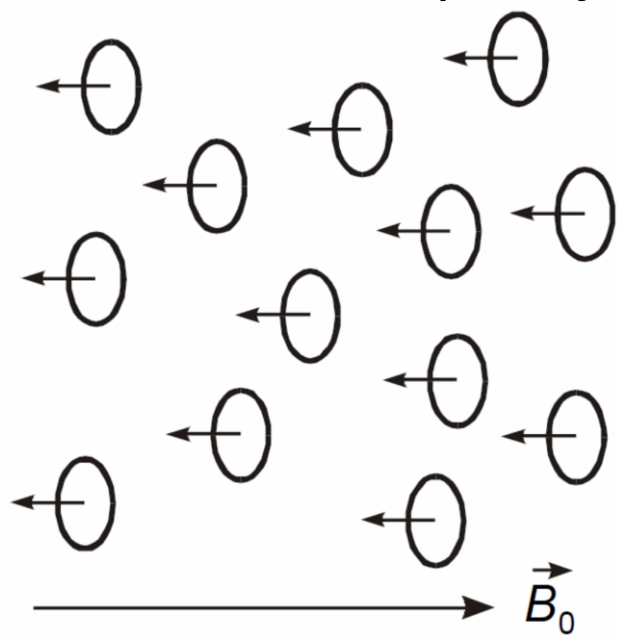
12.2.2 Diamagnetické látky ($\mu_r < 1$, $\chi_m < 0$, $\chi_m(T) = \text{konst.}$)

V diamagnetických látkách se **bez přítomnosti vnějšího mg. pole** magnetické momenty dvojice elektronů v částicích (atomech, molekulách, iontech) **vyruší**, takže **výsledný mg. moment přítomných částic je nulový**.

Po vložení do vnějšího mg. pole dojde k **ovlivnění pohybu elektronů**, což vyvolává **orbitální magnetický moment**, orientovaný **opačně** vzhledem k vektoru intenzity vnějšího pole $\Rightarrow$ v částicích těchto látek se **indukují slabé mg. dipóly**, jejichž mg. pole má **směr opačný**, než je směr vnějšího mg. pole.

Susceptibilita a další materiálové magnetické konstanty diamagnetik obvykle **nezávisí na teplotě**.

Do této skupiny patří **některé kovy, některé nekovové pevné látky, plyny a většina organických látek** (např. *Cu, Zn, Ge, Si, Hg, H, N, vzácné plyny...*).



↑ **Orientace mg. momentů proudových smyček vzhledem k indukci vnějšího mg. pole u diamagnetik.**

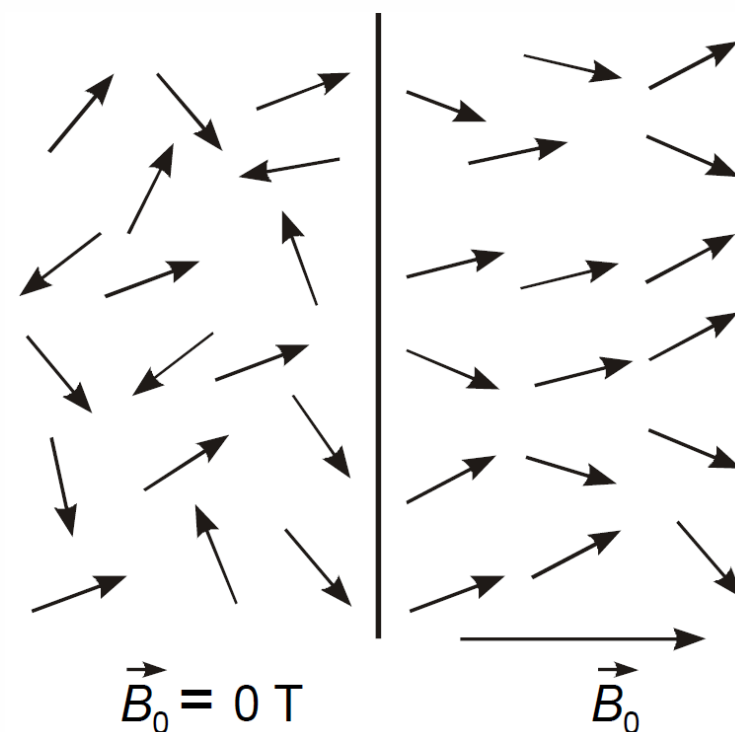
12.2.3 Paramagnetické látky ($\mu_r > 1$, $\chi_m > 0$, $\chi_m(T) \neq \text{konst.}$)

Paramagnetismus je způsoben přítomností atomů s **nenulovým permanentním mg. momentem**. Magnetické dipólové momenty jednotlivých částic **spolu interagují nepatrně a bez přítomnosti vnějšího mg. pole jsou orientovány nahodile** => **celkový mg. moment je nulový**.

Po vložení do vnějšího mg. pole mají částice s permanentním mg. dipólovým momentem snahu **orientovat se souhlasně s vnějším mg. polem**. Proti tomuto ději působí neuspořádaný **tepelný pohyb částic**.

U většiny paramagnetik **závisí velikost magnetizace na teplotě**.

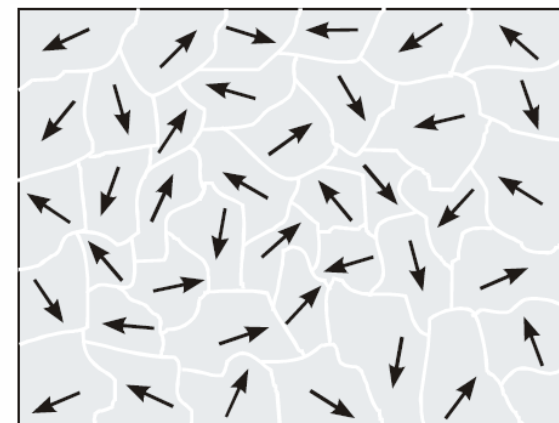
Do této skupiny patří např. *Al*, *Sn*, *Na*, *Mg*, *O*, *Pt*, *W* aj.



↑ **Permanentní mikroskopické mg. dipóly v paramagnetické látce.**

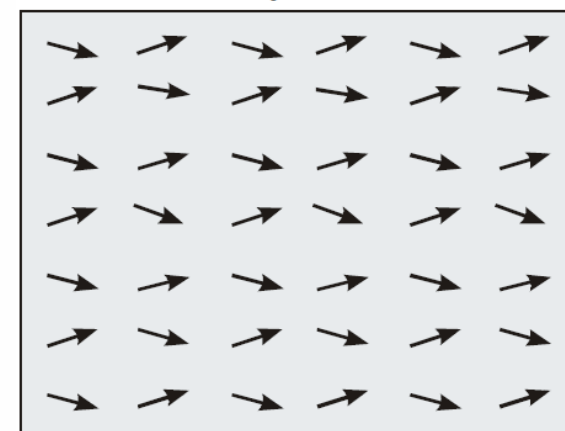
12.2.4 Feromagnetické látky ($\mu_r \gg 1$, $\chi_m \gg 0$, $\chi_m(T) \neq \text{konst.}$)

Nejvýznamnější skupina magnetik. Jejich atomy mají vnitřní mg. momenty, které spolu **silně interagují**. Všechny feromagnetické látky obsahují **mikroskopické oblasti** (tzv. **Weissovy domény**) zaujímající objem 10^{-12} až 10^{-8} m^3 . Uvnitř těchto domén jsou **mg. momenty** jednotlivých částic **orientovány souhlasně**.



$$\vec{B}_0 = \vec{0} \text{ T}$$

V **nezmagnetovaných vzorcích** jsou jednotlivé **domény orientovány nahodile**, takže výsledná magnetizace materiálu **je nulová**.



Ve **zmagnetovaném stavu** dojde k **orientaci domén ve směru vnějšího mg. pole**. Proti tomuto ději působí neuspořádaný **tepelný pohyb částic**.

$$\vec{B}_0 \rightarrow$$

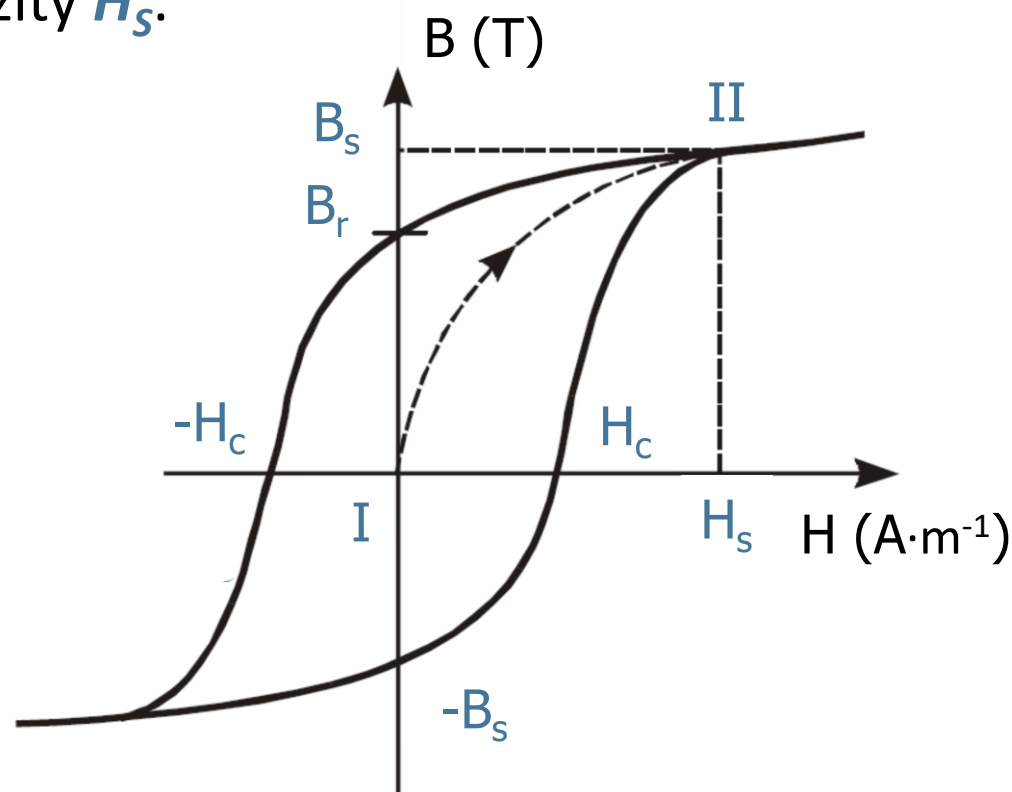
Na rozdíl od **paramagnetik**, kde k magnetizaci přispívají především **momenty orbitální**, za mg. vlastnosti **feromagnetických látek** odpovídají především **nevykompenzované spinové mg. momenty**.

Hysterezní smyčka

Jestliže jsou feromagnetické látky vloženy do magnetického pole, je pro ně charakteristická **složitá závislost magnetizace** (mg. indukce) **na intenzitě mg. pole**, historii vzorku a dalších faktorech – tzv. **hysterezní smyčka**.

Mg. indukce vzorku, který byl původně nezmagnetován, roste nejdříve **nelineárně** (mezi body I až II) a **poměrně rychle** po tzv. **křivce prvotní magnetizace** a to až do hodnoty intenzity H_s .

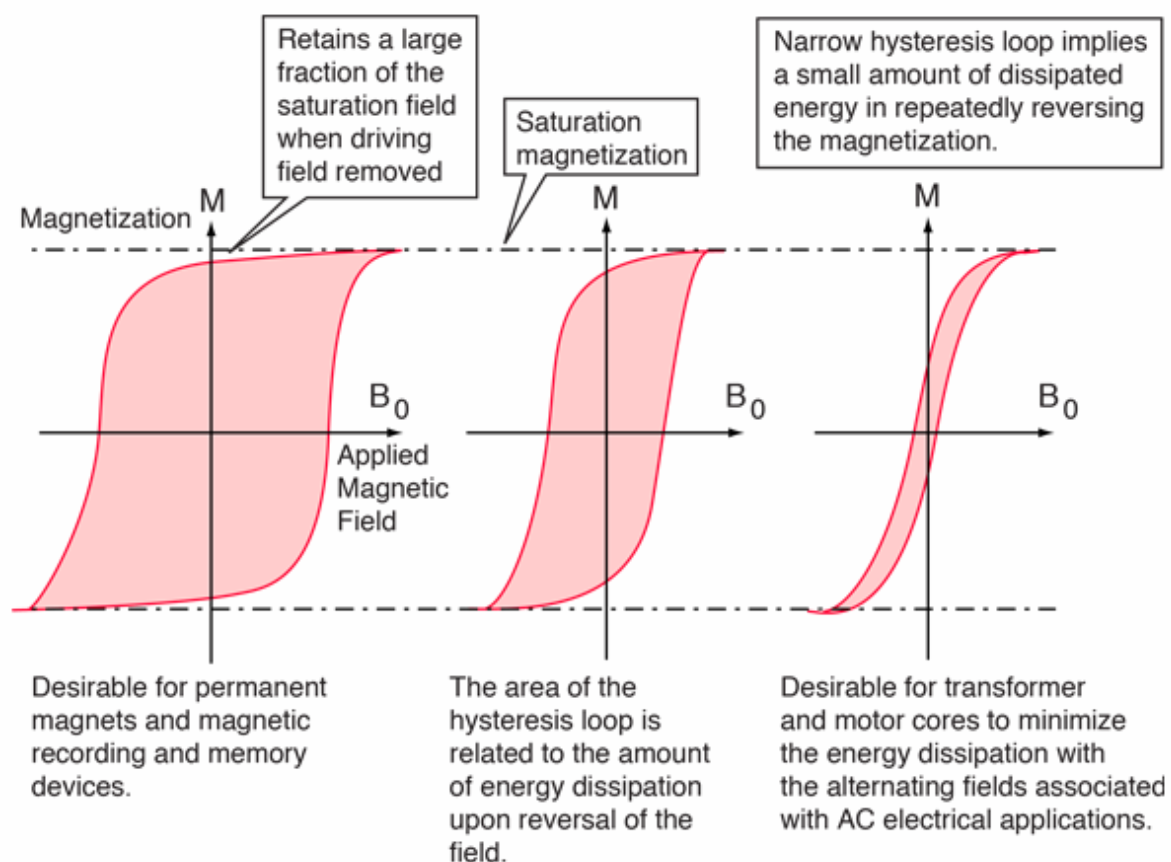
Pak dojde k **nasycení** a další zvyšování intenzity pole vede k **malému růstu mg. indukce**. Hodnota indukce B_s , příslušná H_s se nazývá **indukce při nasycení**. Následné snižování intenzity pole vede k odlišnému průběhu indukce po křivce **II** → B_r . **Nulovému poli** odpovídá **nenulová hodnota indukce** B_r tzv. **remanentní indukce**.



Nulové hodnoty indukce se dosáhne při opačné orientaci pole, jehož intenzita má velikost H_c , nazývanou **koercitivní síla**.

Zmagnetovaná feromagnetika mohou sloužit jako **zdroje mg. pole**, tzv. **permanentní magnety** (např. pro buzení v el. toč. strojích). V tomto případě požadujeme **vysoké hodnoty H_c** (řádově $10^3 \text{ A}\cdot\text{m}^{-1}$) a rovněž jsou žádoucí **vysoké hodnoty B_r** . Hovoříme o **magneticky tvrdých feromagnetikách** (široká hysterezní smyčka).

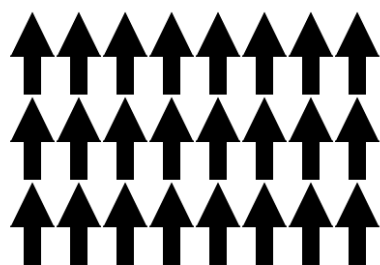
Feromagnetické látky se dále používají jako jádra v generátorech, transformátorech a elektromotorech. V tomto případě je žádoucí materiál s **nízkou hodnotou H_c** , tzv. **magneticky měkká feromagnetika** (s úzkou hysterezní smyčkou).



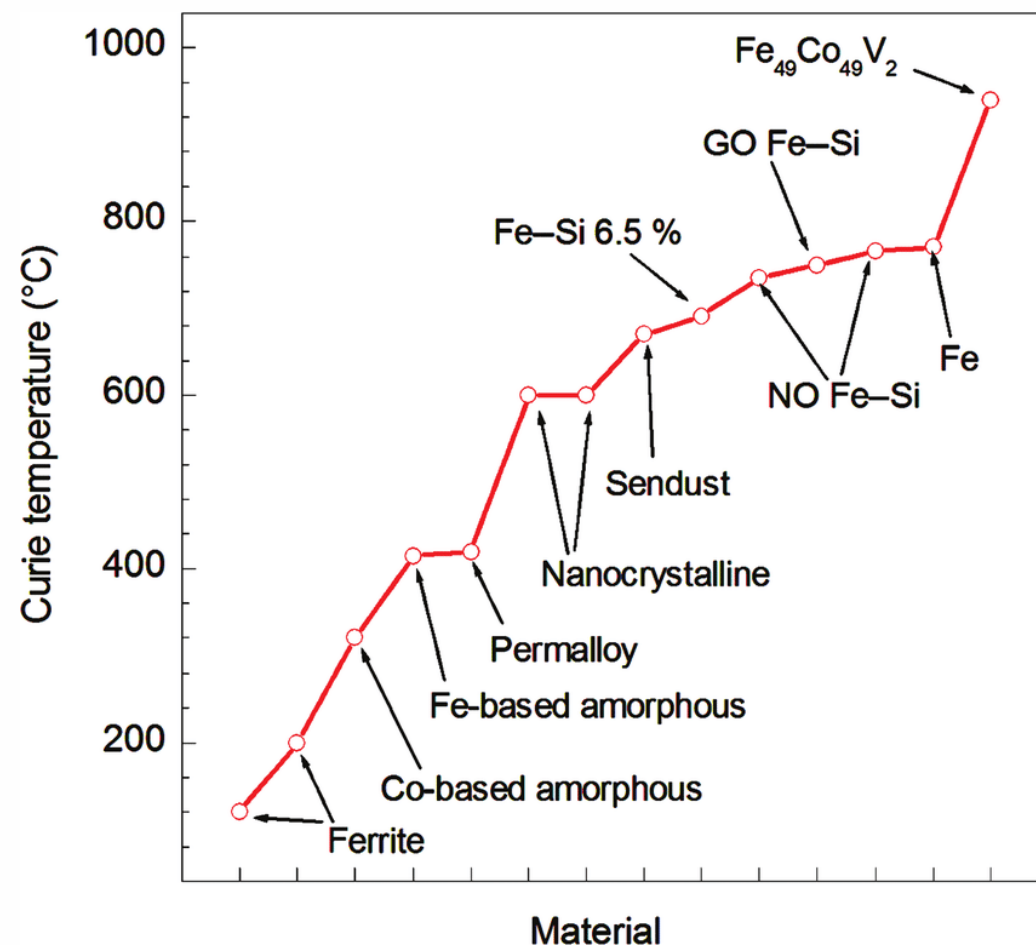
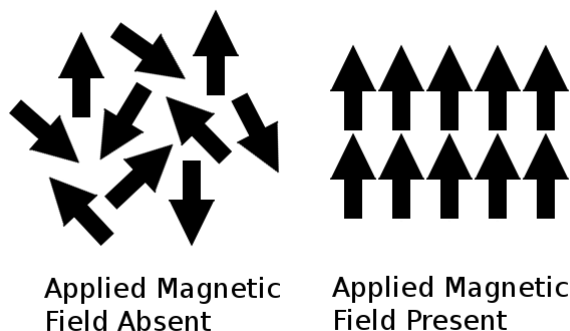
U feromagnetických látek dochází k tomu, že nad určitou tzv. **Curieovou teplotou** (T_c) **ztrácí** feromagnetická látka svou **spontánní magnetizaci** a stává se **paramagnetickou látkou**.

Pro teploty nižší než Curieova teplota je látka **feromagnetická** a při teplotě absolutní nuly bude její **magnetizace největší**.

$T < T_c$ (feromagnetické chování)



$T > T_c$ (paramagnetické chování)

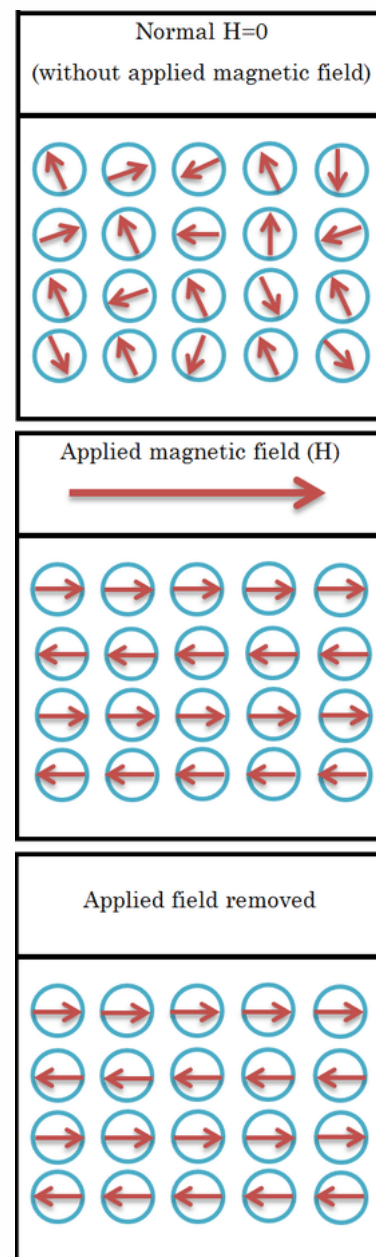


12.2.5 Antiferomagnetické látky ($\mu_r \approx 1$, $\chi_m \approx 0$, $\chi_m(T) \neq \text{konst.}$)

Antiferomagnetické látky (**antiferomagnetika**) jsou pevné látky s nejčastěji **krystalickou strukturou**, v nichž vzájemným působením atomů dochází ke vzniku **magnetických domén**, tak jako u feromagnetik. Nicméně, při působení vnějšího mg. pole jsou v těchto doménách mg. momenty atomů **uspořádány antiparalelně**.

Protože **opačně orientované** mg. momenty se **navzájem ruší**, nemají antiferomagnetika **navenek žádný magnetický moment** a to až do kritické, tzv. **Néelovy teploty** (T_N), kdy tato antiparalelní orientace magnetických momentů atomů zaniká a tyto látky se začínají chovat jako **paramagnetika**.

K antiferomagnetikům patří: **mangan** a **chrom**, některé **oxidy** (např. manganatý - MnO , železnatý - FeO , nikelnatý - NiO) a různé **sloučeniny** (selenid manganu - $MnSe$, chlorid železnatý - $FeCl_2$, fluorid železnatý - FeF_2 , chlorid měďnatý - $CuCl_2$ aj.).



12.2.6 Ferimagnetické látky ($\mu_r \gg 1$, $\chi_m \gg 0$, $\chi_m(T) \neq \text{konst.}$)

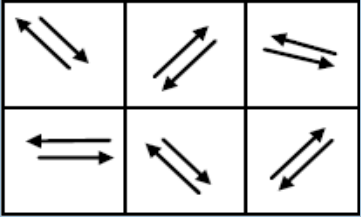
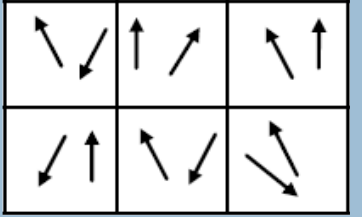
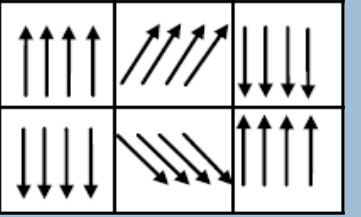
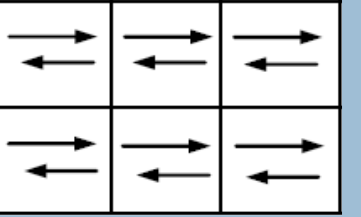
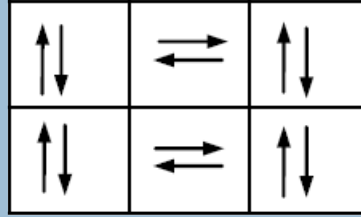
Jedná se o **zvláštní případ antiferomagnetismu**, kdy magnetický moment atomů je v protikladu jako u antiferomagnetismu, ale **protikladné mg. momenty jsou nerovné** a **spontánní magnetizace** tedy **zůstává**. Ferimagnetismus se vyskytuje u látek krystalické povahy.

Typickým příkladem této skupiny jsou **ferity** (oxid železitý Fe_2O_3 + oxidy dalších kovů), které vykazují určitý mg. moment.



Ferromagnetic 	Below T_C , spins are aligned parallel in magnetic domains
Antiferromagnetic 	Below T_N , spins are aligned antiparallel in magnetic domains
Ferrimagnetic 	Below T_C , spins are aligned antiparallel but do not cancel
Paramagnetic 	Spins are randomly oriented (any of the others above T_C or T_N)

12.2 Rozdělení látek dle mg. momentů atomu

Diamagnetika	Paramagnetika	Feromagnetika	Ferimagnetika	Antiferomagnetika
Předpoklady				
Atomy s obsazenými dráhami	Atomy s neobsazenými dráhami	Atomy s neobsazenými dráhami	Atomy s neobsazenými (vnitřními) dráhami určité mřížkové struktury	Neuzavřené dráhy, velmi malá vzdálenost atomů
Magnetický moment				
Bez vnějšího pole není moment. Kompenzace spinových momentů.	Moment je ↓, existuje bez vnějšího pole. Nepravidelné rozdělení momentových směrů.	Moment je ↑, spontánní magnetizace. Weissovy domény.	Moment existuje v důsledku neúplné kompenzace.	Momenty jsou vykompenzovány v důsledku antiparalelního postavení.
Směr momentů				
				
Permeabilita (susceptibilita) a příklady materiálů				
$\mu_r < 1$ ($\chi_m < 0$)	$\mu_r > 1$ ($\chi_m > 0$)	$\mu_r \gg 1$ ($\chi_m \gg 0$)	$\mu_r \gg 1$ ($\chi_m \gg 0$)	$\mu_r \approx 1$
<i>Cu, Au, Ag</i>	<i>Al, Sn, Pt</i>	<i>Fe, Co, Ni</i>	<i>Ferity</i>	<i>MnO</i>



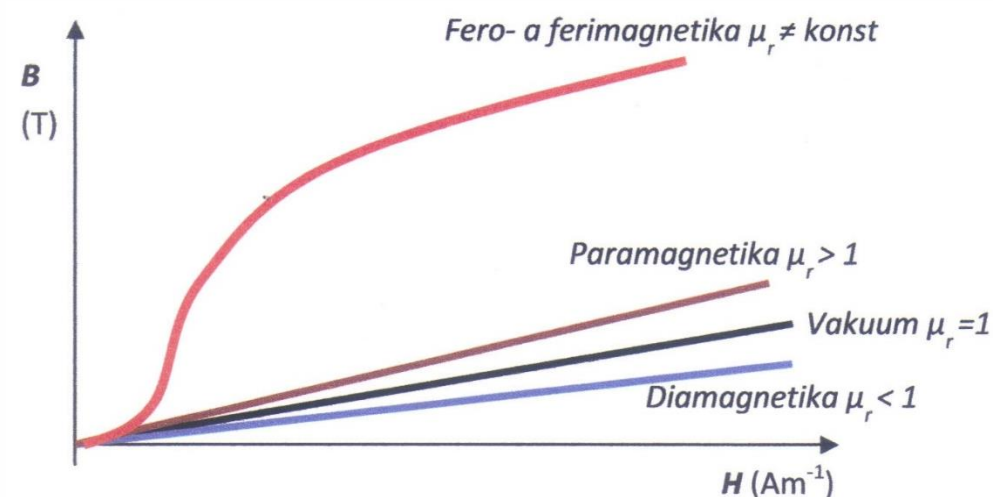
12.3 Přehled vybraných vlastností mg. materiálů

12.3.1 Permeabilita μ ($\text{H}\cdot\text{m}^{-1}$)

Charakterizuje vliv magnetického pole na magnetický stav materiálu. Obvykle se uvádí **relativní permeabilita** μ_r , která vyjadřuje, kolikrát je permeabilita daného materiálu vyšší (nižší) než **permeabilita vakua** ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H}\cdot\text{m}^{-1}$).

12.3.2 Magnetizační charakteristiky

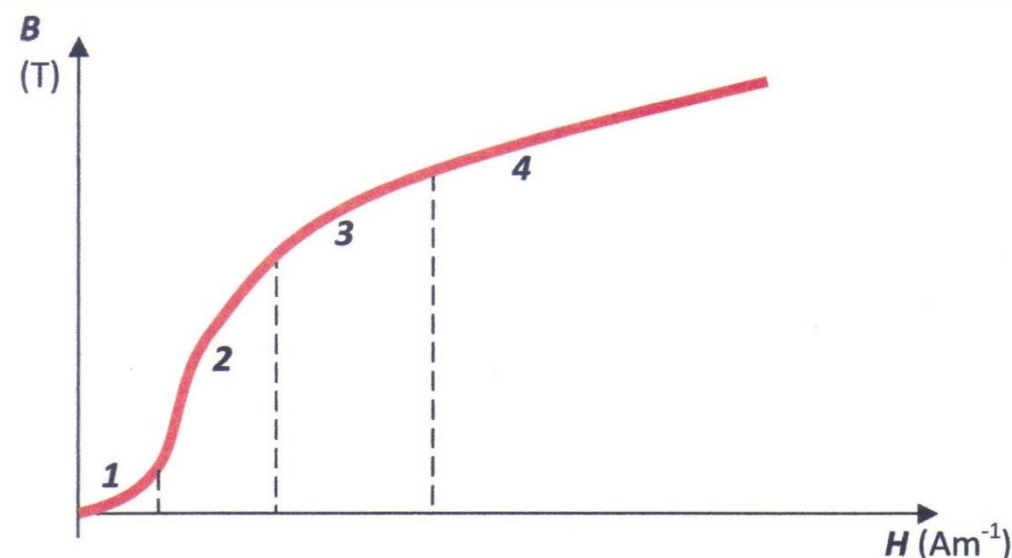
Magnetizační charakteristika je závislost **magnetické indukce** na **intenzitě magnetického pole**, tj. $B = f(H)$. Magnetizační charakteristiky látek **diamagnetických** a **paramagnetických** (tj. lineárních magnetik) jsou **přímky**, protože jejich μ_r je konstantní. Magnetizační charakteristika **fero- a ferimagnetických** látek **není přímka**, protože jejich μ_r se v průběhu magnetizace mění v závislosti na intenzitě magnetického pole.



12.3.3 Křivka prvotní magnetizace

Je magnetizační křivka materiálu, který je **magnetován poprvé**, nebo je ve stavu po **úplném odmagnetování**. Křivka prvotní magnetizace má několik oblastí:

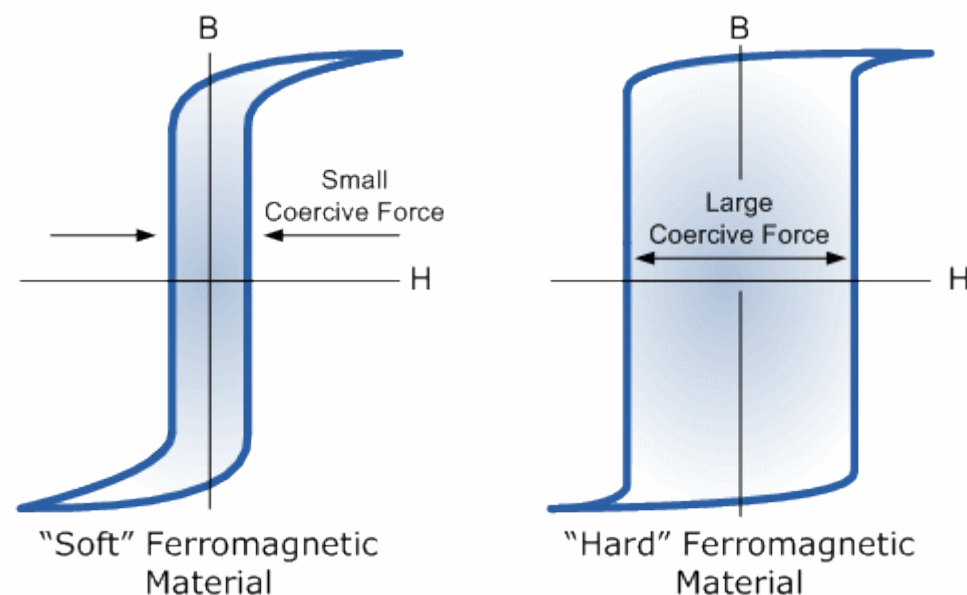
1. Vlivem vnějšího mg. pole se **zvětšuje objem Weissovo domén**, v nichž se **směr momentu nejvíc blíží směru intenzity vnějšího mg. pole**. Tento děj je **vratný**.
2. Objem domén s příznivou orientací mg. momentů se dále **zvětšuje** na úkor domén s nepříznivou orientací. Tyto změny objemu se však uskutečňují **skokovými nevratnými posuny** doménových stěn (tzv. **Blochových stěn**).
3. Doménové stěny se již **neposouvají**. Je-li feromagnetická látka monokrystalická, je celý krystal jedinou doménou. Dalšího zvětšování mg. indukce lze dosáhnout **pootočením (orientováním) mg. momentů** do směru intenzity mg. pole.



Orientování mg. momentů je děj, který vyžaduje větší energii, a proto se může uskutečnit pouze v silných mg. polích. Jsou-li mg. momenty všech domén orientovány do **směru intenzity vnějšího mg. pole**, dochází k **magnetickému nasycení látky**. Nasycení se projeví tím, že magnetická indukce se při dalším zvětšování intenzity magnetického pole již téměř nemění.

4. Charakterizuje **stav technického nasycení feromagnetika**. Mg. indukce se ve skutečnosti nepatrně zvětšuje i při tomto stavu, protože silné mg. pole je schopno **obrátit směr mg. momentů i těch atomů**, kterým tepelný pohyb vnutil **antiparalelní orientaci**.

Pokud po zmagnetování feromagnetika do stavu nasycení začneme intenzitu mg. pole snižovat, má mg. indukce vyšší hodnoty než při předchozí magnetizaci. Tento děj se označuje jako **magnetická hystereze** (viz **hysterezní smyčka** výše).



12.3.4 Měrné ztráty Δp_{Fe} , příp. $\Delta p_{1,0}$, $\Delta p_{1,5}$ ($W \cdot kg^{-1}$)

Jako měrné ztráty se udávají **ztráty v 1 kg materiálu střídavě magnetovaného při frekvenci 50 Hz** a při sinusovém průběhu magnetické indukce obvykle s maximální hodnotou 1 T, nebo 1,5 T. U plechů **válcovaných za studena** jsou $\Delta p_{1,0}$ obvykle 0,46 – 0,8 $W \cdot kg^{-1}$, u plechů **válcovaných za tepla** obvykle 0,9 – 3,6 $W \cdot kg^{-1}$.

12.3.5 Magnetostrikce

Magnetostrikce představuje **změnu délky krystalu**, nebo **objemu materiálu** v magnetickém poli.

a) Tvarová magnetostrikce: působením vnějšího mg. pole dochází k deformaci domén a **prodloužení**, nebo **zkrácení krystalu**, přičemž jeho **objem zůstává konstantní**.

b) Objemová magnetostrikce: je **změna objemu materiálu** vlivem působení magnetického pole. Největších změn objemu je dosahováno v blízkosti Curieovy teploty.



12.3.6 Ovlivňování vlastností magnetických materiálů

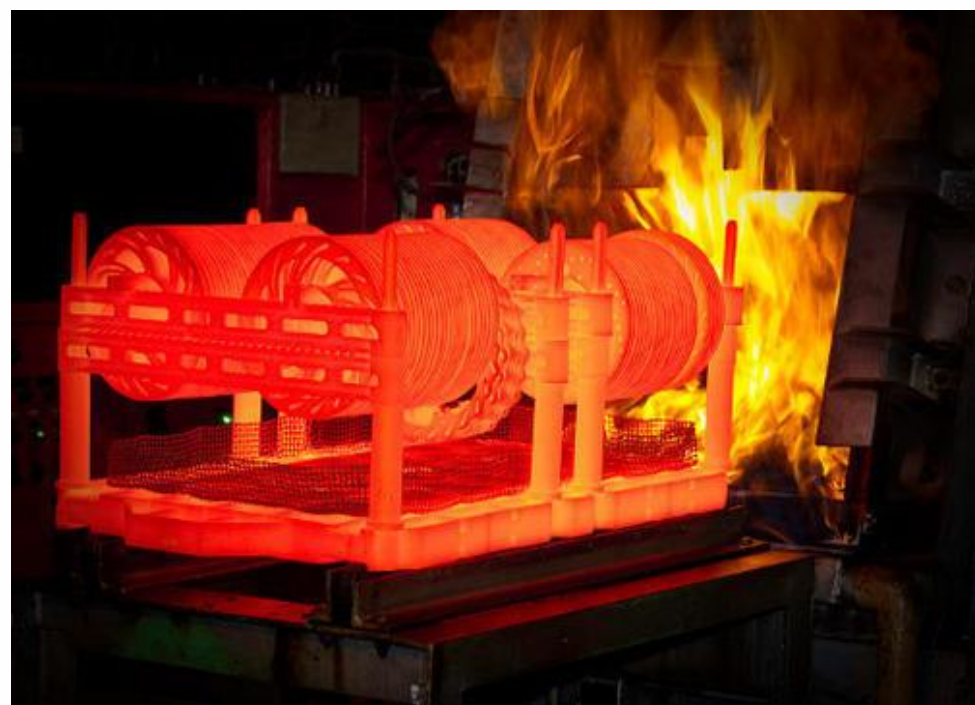
Vlastnosti magnetických materiálů lze do určité míry řídit buď **změnou složení**, nebo **změnou jejich struktury**.

a) Změnou složení se především ovlivňuje **měrný elektrický odpor** a **některé magnetické vlastnosti** materiálu, proto se např. *permalloye* taví a odlévají **ve vakuu**, aby nedošlo ke **znečištění materiálu**.

b) Na strukturu materiálu má velký vliv **tepelné zpracování** a **mechanické tváření materiálu**. Provádí se například **válcování za tepla** či **za studena**.

Žiháním se u **magneticky měkkých materiálů** odstraňuje **vnitřní pnutí** a **zvětšuje se jejich permeabilita** a **snižuje se koercitivní intenzita**.

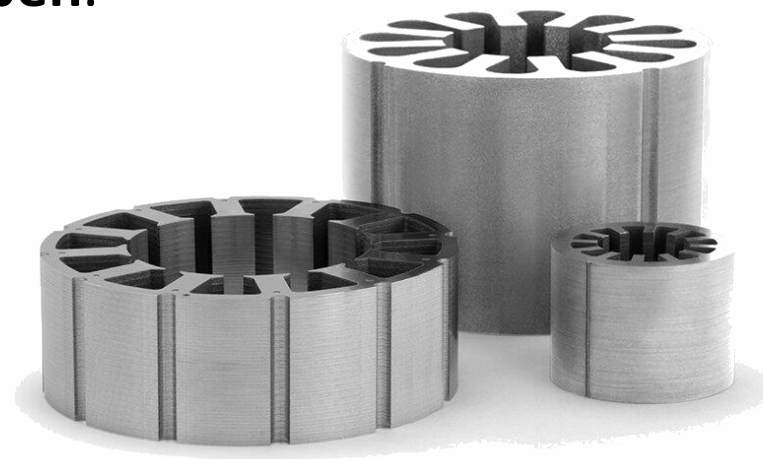
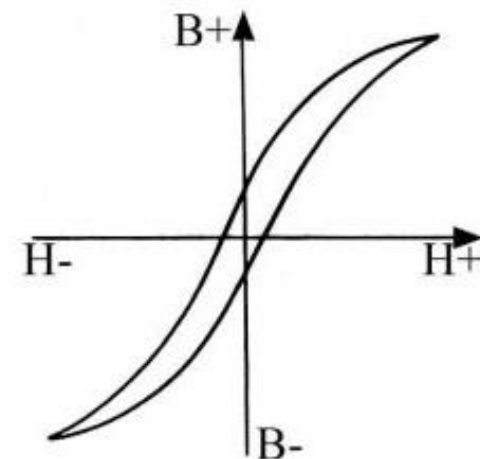
Kalením se naopak **zvyšuje vnitřní pnutí** u **magneticky tvrdých materiálů**, **zmenšuje se jejich permeabilita** a **zvětšuje se koercitivní intenzita**.



12.4 Magneticky měkké materiály

12.4.1 Společné vlastnosti magneticky měkkých materiálů

- Vykazují úzkou hysterezní smyčku.
- **Snadno se zmagnetují/odmagnetují** (i slabým mg. polem).
- **Mají vysokou relativní permeabilitu μ_r** , ta v průběhu magnetizace klesá.
- Jejich **koercitivní intenzita H_c** je nízká (pod $800 \text{ A}\cdot\text{m}^{-1}$).
- **Křivka prvotní magnetizace má strmý průběh.**
- **Indukce nasycení B_s** je obvykle vysoká.
- Vykazují většinou malé hysterezní ztráty a ztráty vířivými proudy.
- Používají se pro magnetické obvody toč. a netočivých el. strojů.



12.4.2 Čisté železo (železo *Armco*) a nízkouhlíkové oceli

Čisté železo má **nízký obsah uhlíku** (maximálně do 0,1 %) a obsahuje **velmi málo nečistot**. V důsledku toho má **malou rezistivitu** a vznikají v něm **velké ztráty při střídavé magnetizaci**. Z těchto důvodů se používá pro **magnetické obvody** u *stejnoseměrných strojů a přístrojů*.

Železo čistoty 99,99 % má $\mu_{rmax} = 100\ 000$, při čistotě 99,96% je relativní permeabilita rovna už jen 5 000. $H_c = 7,95 - 32\ \text{A}\cdot\text{m}^{-1}$; B_r okolo 0,5 T.

12.4.3 Křemíková ocel

Křemíková ocel je **nejdůležitější materiál** pro použití ve *střídavých mg. polích s frekvencí 50 Hz*. Křemík **zvyšuje rezistivitu** oceli, čímž se zmenšují její ztráty při **střídavé magnetizaci**. Křemík také **zvětšuje permeabilitu**, **zmenšuje koercitivitu** a **měrné ztráty**.

Legováním se přidává obvykle **0,5 – 4,5 % Si** (při vyšším obsahu Si by materiál šel **těžko zpracovávat**). Křemíková ocel se používá k výrobě **transformátorových a dynamových plechů**.

Křemíková ocel typicky vykazuje $\mu_{rmax} \approx 160\ 000$ a $H_c \approx 2\ \text{A}\cdot\text{m}^{-1}$.



Plechý se z **křemíkové oceli** vyrábějí **válcováním za tepla** i za **studena**.

a) Plechy válcované za tepla

Do základní oceli se přidává obvykle **0,5 až 4,6 % Si**. Ingoty křemíkové oceli se válcují při teplotě vyšší než 750 °C na tloušťku nejčastěji **0,35** nebo **0,5 mm**. V důsledku válcování vzniká v materiálu **vnitřní pnutí**, které **zhoršuje magnetické vlastnosti** (zvyšuje se H_c a snižuje se μ_r). Zlepšení dosáhneme **žiháním plechu** bez přístupu vzduchu v teplotním rozmezí 800 – 850 °C.

Při výrobě se plechy z jedné strany pokrývají **tenkou vrstvou izolace** (vrstva laku, vodního skla, zoxidovaný povrch samotného kovu apod.). Dosáhneme tak **omezení ztrát vířivými proudy**.

Plechý válcované za tepla dosahují B_r typicky v rozmezí 1 – 1,2 T a **měrné ztráty** 0,9 – 3,6 W·kg⁻¹. S ohledem na to, že jednotlivé krystaly těchto plechů jsou uspořádány **zcela náhodně**, jsou mg. vlastnosti plechu ve všech směrech **téměř stejné** a **nezávisí na směru válcování**, tj. plechy válcované za tepla označujeme jako **magneticky izotropní**.

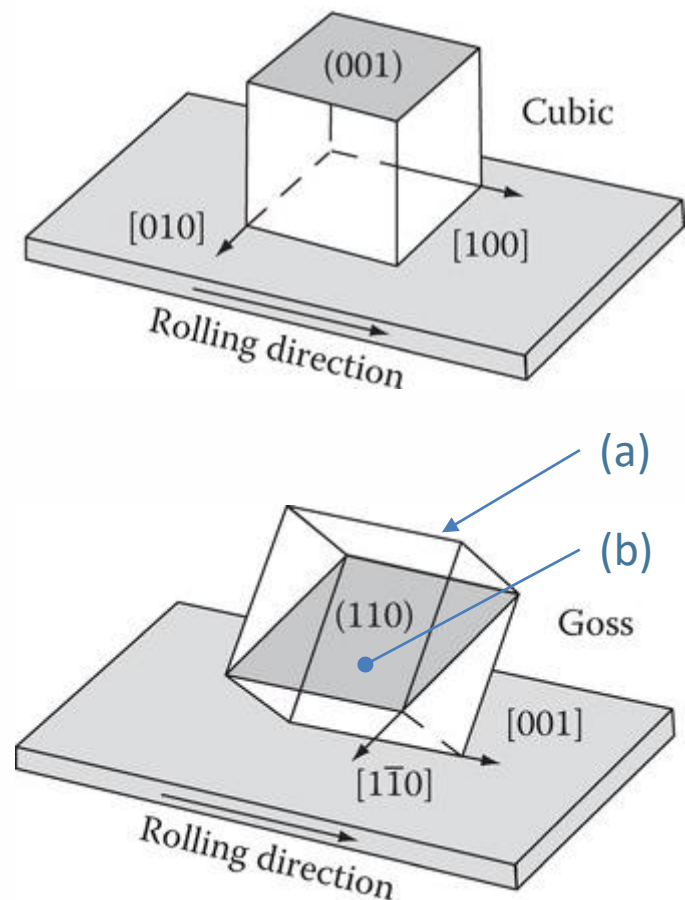
Plechý válcované za tepla se **používají k výrobě mg. obvodů transformátorů a točivých elektrických strojů**.



b) Plechy válcované za studena s orientovanou strukturou

Válcováním pásu **za studena** se krystaly v poslední fázi uspořádají (orientují) svými hranami **rovnoběžně se směrem válcování**. V tomto směru pak probíhá i **velmi snadno magnetizace**. Takovéto pásy vykazují ve směru válcování **vysokou μ_r , nízkou H_c a nízké ztráty**. S rostoucí odchylkou od směru válcování se magnetické vlastnosti zhoršují. Označujeme je jako **magneticky anizotropní**.

Tyto pásy mají tzv. **Gossovou strukturu**, ve které je většina krystalů orientovaná tak, že **hrana krychle krystalu (a) je rovnoběžná se směrem válcování** a **úhlopříčná rovina (b) leží v rovině pásu**. Pás s Gossovou strukturou má nejlepší vlastnosti **pouze ve směru válcování**, proto je potřeba navrhnout při konstrukci magnetický obvod tak, aby byl průběh magnetického toku převážně shodný se směrem válcování pásu.



Výroba **orientovaných pásů** (*Cold Rolled Grain Oriented Electrical Steel*, **CRGO**) je poměrně **náročná**. Do oceli se přidávají asi **3 % Si**, pak se provádí **válcování za tepla** na tloušťku 3 mm, dále se střídá několikrát **válcování za studena** a **žíhání**. Při konečném žíhání v ochranné atmosféře při teplotě 1200 °C se uvolňuje vnitřní pnutí a krystaly se orientují do směru válcování.

Výsledná tloušťka pásu je obvykle 0,35 mm, případně 0,13 nebo 0,08 mm. CRGO plechy **mají vyšší B_r** , než **plechy válcované za tepla** (typicky 1,5 – 1,7 T) a opět se opatřují tenkou vrstvou izolace.

Používají se zejména pro výrobu velkých transformátorů.



c) Pásky válcované za studena s neorientovanou strukturou:

Jedná se o plechy označované jako **CRNGO** (*Cold Rolled Non-Oriented Electrical Steel*), které obsahují **0,5 až 3,5% Si** a vykazují měrné ztráty $1,1 - 3,6 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Jejich předností je **povrchová jakost, malá tolerance tloušťky a velmi dobrá zpracovatelnost**. Obvykle se vyrábějí v tloušťce 0,5 mm.

Používají se pro točivé stroje, malé transformátory, spínače a relé.

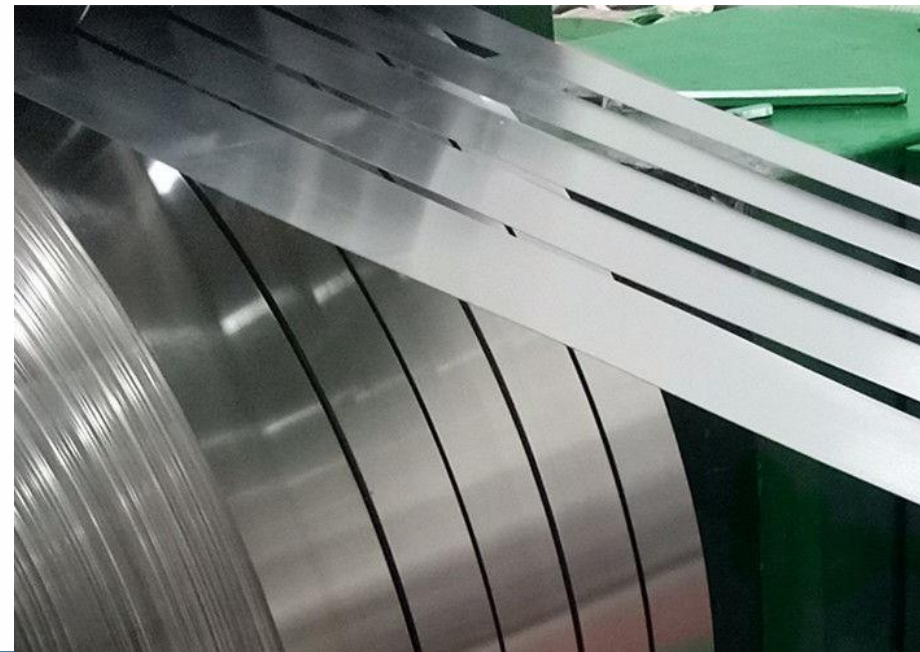


12.4.4 Slitiny *Fe-Ni* (Permalloy)

Slitiny *niklu* a *železa* se označují souhrnným názvem **Permalloy**. Kromě *Fe* obsahují 35 – 81 % *Ni* + další prvky, jako *Mo*, *Mn*, *Cu*. Jsou to **velmi kvalitní magneticky měkké materiály**.

Permalloye typicky vykazují $\mu_{rmax} = 80\,000 - 100\,000$, jejich **rezistivita** je **dvakrát větší** než u čistého *Fe*, takže mají **nízké hysterezní ztráty** a **ztráty vířivými proudy**. **Koercitivní síla** permalloyů **je nízká**. Vlastnosti permalloyů lze ovlivnit složením a tepelným zpracováním. Žíháním se dá dosáhnout pravoúhlé hysterezní smyčky, kdy $B_r = B_s$.

Používají se např. na *jádra transformátorů* a *tlumivek*; jako *stínící kryty* k magnetickému odstínění; pro *přenos signálů* v transformátorech pro sdělovací techniku; dříve pro *magnetofonové hlavy* a také v *magnetických systémech měřicích přístrojů*.



12.4.5 Slitiny Fe-Co

Vykazují **velkou indukci nasycení B_s** , slitina s **35% obsahem Co** má vůbec **nejvyšší dosažitelnou hodnotu, $B_s = 2,4$ T**, ale **nelze ji mechanicky tvářet**.

Nejrozšířenější je slitina s obsahem **48 % Fe + 50 % Co a 2 % V**, která má **$B_s = 2,35$ T** a je **mechanicky (za tepla) zpracovatelná až na tenký plech**.

Pravoúhlou hysterezní smyčku vykazuje slitina **Permendur (49 % Fe + 49 % Co + 2 % V)** s velkou hodnotou indukce nasycení (**$B_s = 2,15$ T**) zpracovaná termomagneticky po tváření za studena. *Permendur* se využívá též jako magnetostrikční materiál.

Slitiny Fe-Co lze **použít** např. na *relé, sluchátkové membrány, rotory elektrických strojů* apod. Nicméně, pro běžné aplikace jsou kobaltové slitiny **cenově nedostupné**.

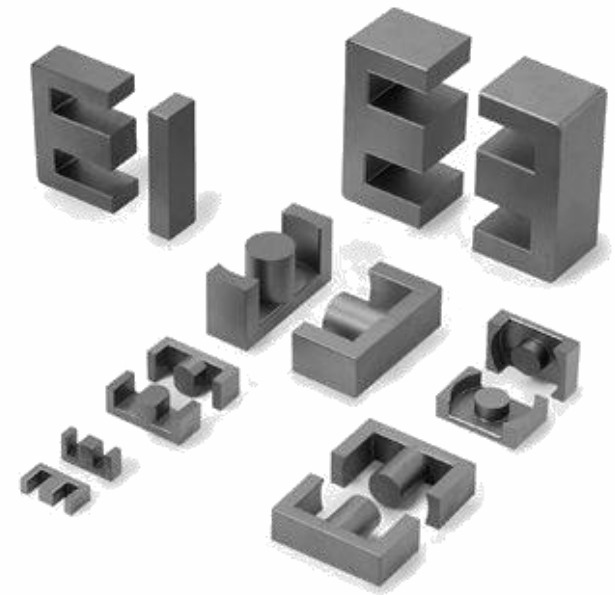


12.4.6 Magneticky měkké ferity

Jsou **oxidy železa**, u kterých se projevuje feromagnetismus. Vznikají sloučením **oxidu železitého Fe_2O_3** s **oxidem vhodného dvojmocného kovu** (Ni , Mn , Zn , Mg , Co , Cd). Jejich obecný vzorec je **$MO \cdot Fe_2O_3$** , kde **M** znamená dvojmocný kov.

Magneticky měkké ferity se **vyrábějí práškovou metalurgií** pod souhrnným označením **FONOX**, mají **vysokou rezistivitu** (s vyšší teplotou klesá), jsou **křehké** a **tvrdé**. Počáteční μ_r průmyslově vyráběných feritů je od 10 do 10 000.

Použití: *součástky pro vf techniku (MHz až GHz); v radiotechnice, radioelektronice a v mikrovlnné technice (jádra širokopásmových, mezifrekvenčních, výstupních a pulzních transformátorů, feritové antény apod.). Pro telekomunikační techniku jsou vhodné ferity **$Mg-Mn-Fe$** a **$Ni-Zn-Fe$** . Některé vykazují pravoúhlou hysterezní smyčku. Ty lze použít ve výpočetní technice jako paměťové prvky.*

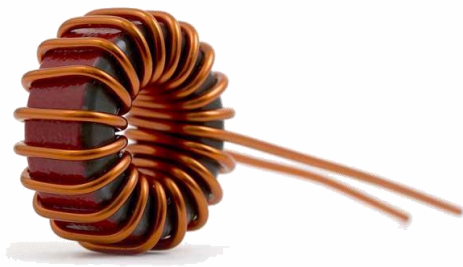


12.4.7 Kovové prášky

Jedná se o **zrnka feromagnetického prachu** o průměru od 1 do 100 μm , které **se smísí s vhodnou izolační látkou** (jádra jsou tedy navzájem izolována) a **slisují se**, takto se **zmenší ztráty vířivými proudy**.

Používají se v oblasti vysokých frekvencí, kde by kompaktní materiál vykazoval vysoké ztráty.

Takto lze zpracovávat např. **prášky na bázi čistého železa**, **permalloy**, **Sendust** (Fe + 7 % Al + 10 % Si).



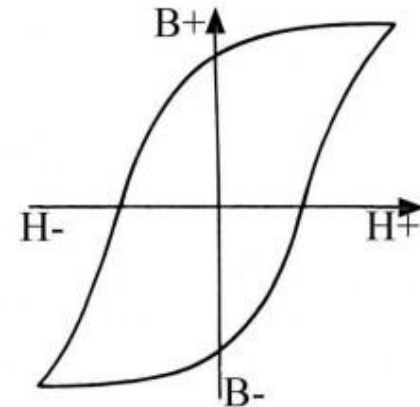
12.4.8 Kovová skla

Nazývají se též **amorfní kovy** nebo **amorfní kovové slitiny**. Při rychlém ochlazení ($10^5 \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$) **tuhnou bez krystalizace**. Podrobněji o kovových sklech v **Přednášce č. 13**.

12.5 Magneticky tvrdé materiály

12.5.1 Společné vlastnosti magneticky tvrdých materiálů

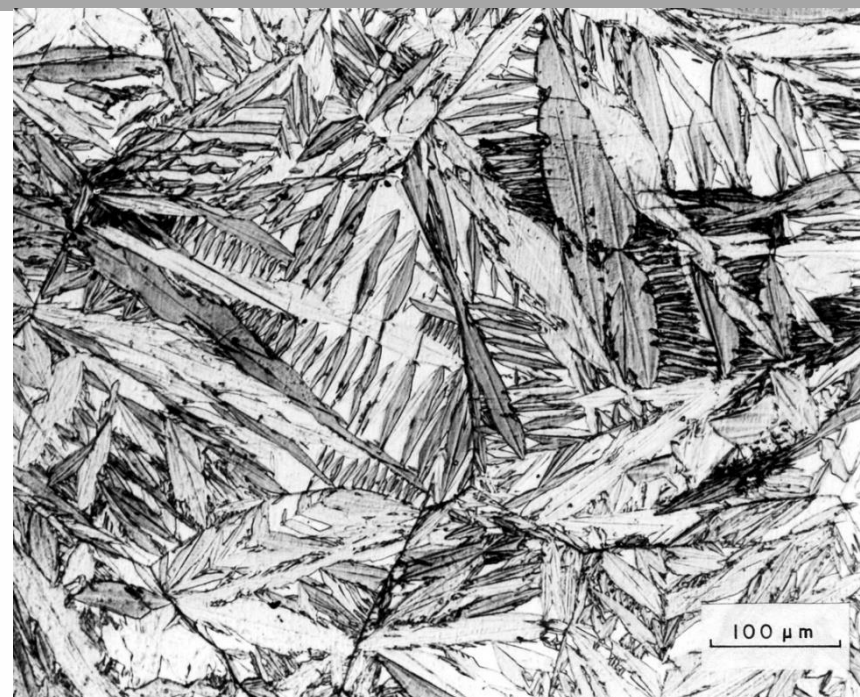
- Vykazují širokou hysterezní smyčku.
- Nesnadno se zmagnetují a nesnadno se odmagnetují.
- Mají vysokou hodnotu koercitivity H_c , obvykle nad $1\,000\text{ A}\cdot\text{m}^{-1}$ (až 10^5).
- Mají vysokou remanentní indukci B_r .
- Křivka prvotní magnetizace má pozvolnější průběh než u magneticky měkkých materiálů.
- Používají se k výrobě permanentních magnetů.
- Jsou charakterizovány tzv. *maximálním energetickým součinem* $(BH)_{max}$ ($\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}$), který je úměrný energii, uložené v magnetu optimálního tvaru.



12.5.2 Martenzitické oceli

Jedná se o oceli s ***martenzitickou strukturou*** dosahující i po přidání *wolframu*, *chromu*, *molybdenu* nebo *kobaltu* maximálního součinu $(BH)_{max}$ pouze $4 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-3}$. Zejména z tohoto důvodu **význam celé skupiny těchto materiálů klesá**.

Martenzitické oceli s 0,8 až 1,5 % C typicky vykazují $B_r = 0,9 \div 1,2 \text{ T}$ a $H_c = 1,6 \div 4 \text{ kA}\cdot\text{m}^{-1}$.



Martenzitická struktura je typická pro ***slitiny železa*** s vyšším až vysokým obsahem ***uhlíku*** (od 0,5 až 6,5 %), které jsou při zpracování rychle ochlazeny (kaleny). Slitina v tomto okamžiku přechází ze struktury **austenitu** na **martenzit**. Zatímco ***austenit*** je rovnovážný tuhý roztok uhlíku v železe vykazující **paramagnetické vlastnosti**, ***martenzit*** je nerovnovážný přesycený tuhý roztok uhlíku v železe vznikající díky tomu, že atomy uhlíku nemají (při rychlém ochlazení) čas difundovat ven z krystalové struktury. Martenzit se chová jako **feromagnetikum**.

12.5.3 Magneticky tvrdé slitinové materiály

Wolframové oceli (0,5 ÷ 1,1 % C; 1,5 ÷ 7 % W): $B_r = 0,9$ T; $H_c = 4,8$ kA·m⁻¹. Jejich nevýhodou jsou sklony ke stárnutí, vysoká cena a celkově horší magnetické vlastnosti.

Chromové oceli (0,8 ÷ 1,2 % C; 2 ÷ 6 % Cr; 0,15 ÷ 1,5 % Si): $B_r = 0,8$ ÷ 1,05 T; $H_c = 4,4$ ÷ 6 kA·m⁻¹. Oproti wolframovým ocelím jsou levnější a stabilnější. Vyrábějí se pod označením **Magnet C** a používají se na elektroměry a magnetické obvody synchronních motorů.

Kobaltové oceli (1 % C; 2 ÷ 45 % Co; 2 ÷ 10 % Cr; 0 ÷ 7 % W; 0 ÷ 2 % Mo): $B_r = 0,75$ ÷ 1,1 T; $H_c = 5,6$ ÷ 23 kA·m⁻¹. Vyznačují se vyšší Curieovou teplotou, vyšší magnetostrikcí a jsou odolné vůči stárnutí.

Molybdenové oceli

(12 % Co; 17 % Mo): $B_r = 1$; $H_c = 20$ kA·m⁻¹.



12.5.4 Slitiny typu *AlNiCo* na bázi železa

Jsou tvořeny **železem**, v němž jsou hlavními přísadami *kobalt, hliník, nikl*, příp. další prvky (např. *titan a měď*). Existuje celá řada těchto slitin. Všechny jsou **tvrdé, křehké a obrobitelné pouze broušením**. Obecně dosahují **vynikajících magnetických vlastností**. Vyrábějí se **odléváním a práškovou metalurgií**. Zlepšení magnetických vlastností se u nich dosahuje **tepelným zpracováním v silném magnetickém poli**. Vysoká T_c těchto slitin je předurčuje i pro nasazení při zvýšených teplotách.

Používají se velmi často pro permanentní magnety např. v **měřicích přístrojích, elektrických strojích** apod.

Označení	Složení	B_r (T)	H_c (kA·m ⁻¹)	$(BH)_{\max}$ (kJ·m ⁻³)
Alni	Fe-Al-Ni-Cu	0,5 ÷ 0,7	32 ÷ 44	0,9 ÷ 1,4
Alnico	Fe-Al-Ni-Co-Cu	0,5 ÷ 1,4	44 ÷ 110	7 ÷ 34
Alnico 2	Fe-10Al-18Ni-13Co-5Cu	0,7	45	N/A
Alnico 5	Fe-8Al-13Ni-24Co-3Cu	1,2	49	N/A
Ticonal	Fe-Al-Ni-Co-Cu-Ti	0,7 ÷ 1,1	135 ÷ 155	24 ÷ 55
Alnico 9	Fe-8Al-15Ni-34Co-4Cu-5Ti	1	125	N/A



12.5.5 Slitiny *Cunife* (60 % Cu; 20 % Ni a 20 % Fe)

Jsou magneticky **anizotropní** a typicky dosahují $B_r = 0,5$ až $0,58$ T; $H_c = 35$ až $47,8$ kA·m⁻¹.

12.5.6 Slitiny *Cunico* (35 ÷ 60 % Cu; 20 ÷ 41 % Co)

Například slitiny Cu50-Ni21-Co29 dosahují remanence $0,35$ až $0,5$ T při $H_c = 56$ kA·m⁻¹. Vyrábějí se ve tvaru drátů, pásů, tyček, resp. speciálně tvarované pro malé přístroje.

12.5.7 Slitiny *Vicalloy* (32 % Fe; 52 % Co; 14 % V)

Zpracovávají se kalením, popouštěním a tvářením za studena. Tyto slitiny získávají magnetické vlastnosti až po tváření. Jsou určeny **pro náročné podmínky** (hodinky, magnetické záznamy, speciální motory, paměti apod.). Mají vysokou remanenci $0,6$ až $1,45$ T při $H_c = 36$ kA·m⁻¹. Pro vysoký obsah Co jsou drahé.

12.5.8 Slitiny *Platinax* (Pt-Co)

Jedná se o slitiny s vysokou koercitivitou $H_c = 380$ kA·m⁻¹ a součinem $(BH)_{\max} = 37$ kJ·m⁻³. Jsou **drahé, ale velmi kvalitní**. Používají se např. pro magnetické čtecí hlavy paměti apod.



12.5.9 Slitiny Fe-Cr-Co

Díky **tvářitelnosti za studena** lze z těchto slitin vyrobit i **velmi tenké pásy** (až 0,25 mm) a dokonce i **dráty**. Navíc tvářením získají **některé typy i anizotropní vlastnosti**, kdy ve směru tváření vykazují pronikavé zlepšení magnetických vlastností.

Tenké pásy z tvářitelných mg. tvrdých slitin se používají pro výrobu **miniaturních magnetů pro nejrůznější účely**: *informační displeje, magnety palubních přístrojů, indikační prvky, kompasy*.

Označení	Složení	B_r (T)	H_c (kA·m ⁻¹)	$(BH)_{\max}$ (kJ·m ⁻³)
Cunife	Cu-Ni-Fe	0,5 ÷ 0,7	20 ÷ 40	3 ÷ 5
Cunico	Cu-Ni-Co	0,3 ÷ 0,5	36 ÷ 56	3,6 ÷ 4
Remalloy	Fe-Co-Mo	1	20	4 ÷ 5
Vicalloy	Co-Fe-V	0,9 ÷ 1	20 ÷ 40	4 ÷ 14
	Fe-Co-V	0,5 ÷ 0,8	15 ÷ 28	8
	Fe-Cr-Co (izotropní)	0,9 ÷ 1,1	31 ÷ 36	12
	Fe-Cr-Co (anizotropní)	1,2 ÷ 1,3	43 ÷ 49	32
Platinax	Pt-Co	0,6	380	37



12.5.10 Magnety na bázi vzácných zemin

Jsou to **velmi kvalitní permanentní magnety**. Jedná se nejčastěji o **(i) sloučeniny kobaltu s kovy vzácných zemin** (např. *Sm* - samarium, *Nd* - neodym), které se vyrábějí **práškovou metalurgií**, protože jejich přímé slévání není možné; nebo **(ii) slitiny železo-neodym-bor**, které dosahují výborných magnetických vlastností.

Magnety na bázi vzácných zemin umožňují značnou miniaturizaci rozměrů, protože dosáhnou stejné přídržné síly při mnohem menších rozměrech než např. feritové magnety. Širšímu uplatnění brání zejména **vysoká cena surovin** a také **velmi náročná technologie zpracování**.

Používají se např. na: *výrobu rotorů a statorů toč. strojů, lineární motory, magnetické spojky a brzdy, magnetické polarizátory tekutin, magnetické separátory.*

Materiál	B_r (T)	H_c (kA·m ⁻¹)	$(BH)_{\max}$ (kJ·m ⁻³)	T_c (°C)
SmCo ₅	0,9 ÷ 0,925	680 ÷ 710	160 ÷ 170	720
Sm ₂ Co ₁₇	1,03 ÷ 1,06	720 ÷ 790	190 ÷ 215	825
Fe-Nd-B	1,05 ÷ 1,2	780 ÷ 870	210 ÷ 265	310



12.5.11 Magneticky tvrdé ferity

Jejich obecný vzorec je $MO \cdot 6Fe_2O_3$, kde M je dvojmocný prvek (Ba , Sr , Co , nebo Pb). Mají **vysokou rezistivitu** a **nízkou remanenci B_r** . Jsou **tvrdé, křehké** a **odolné proti korozi**.

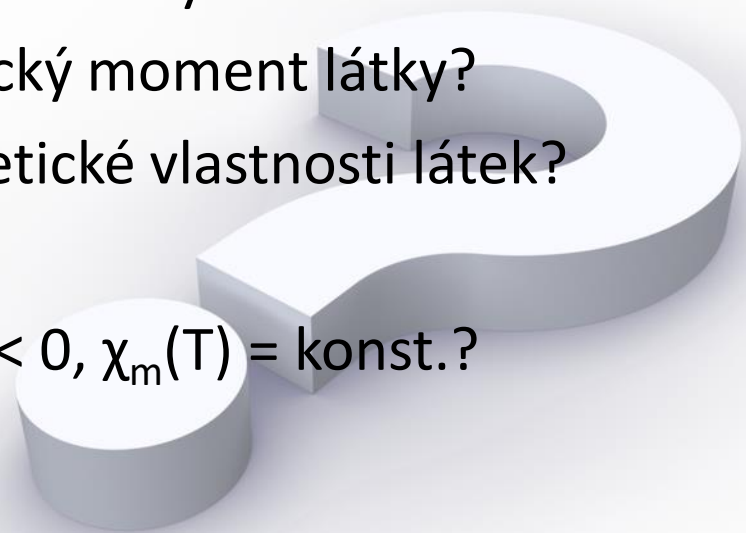
Magneticky tvrdé ferity se vyrábějí **práškovou metalurgií**. Vysoké anizotropie lze dosáhnout magnetickým polem, kdy se zrna natočí do osy snadné magnetizace.

Využívají se např. k výrobě *součástí pro reproduktory; motory a generátory v automobilovém průmyslu; rotory, statory stejnosměrných a asynchronních motorků, aj.*



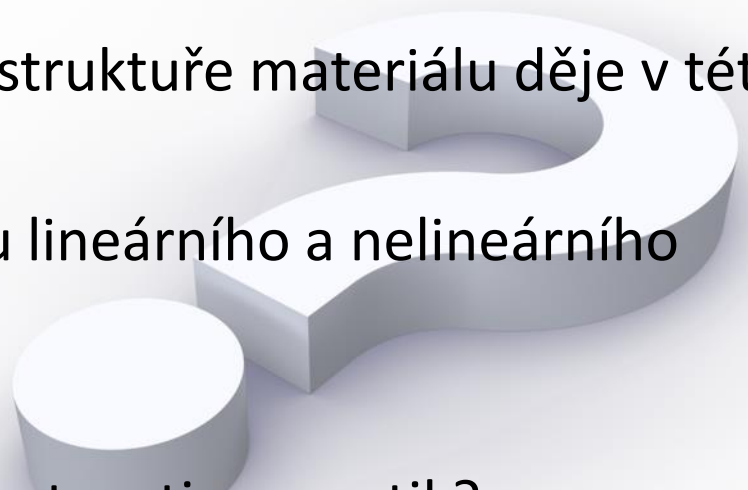
Kontrolní otázky

- Je existence magnetismu přirozenou vlastností všech látek?
- Co je to spin elektronu a spinový magnetický moment elektronu?
- Popište podstatu vzniku orbitálního mg. momentu elektronu.
- Jak moc přispívá pohyb protonů a neutronů k celkovému mg. momentu částic?
- Co je to magnetizace? Jaký má význam?
- Jaká může být příčina nulové magnetizace látky?
- Čím je způsoben permanentní magnetický moment látky?
- Jaké základní parametry popisují magnetické vlastnosti látek?
- Co je to permeabilita?
- Pro jakou skupinu látek platí: $\mu_r < 1$, $\chi_m < 0$, $\chi_m(T) = \text{konst.}$?
- Znáte nějaké diamagnetické kovy?
- Znáte nějaké paramagnetické kovy?



Kontrolní otázky

- Co jsou to lineární magnetika?
- Co jsou to Weissovy domény a Blochovy stěny?
- Co je to Curieova a Neélova teplota?
- Jaké látky vykazují antiferomagnetické chování?
- Nakreslete a popište křivku prvotní magnetizace feromagnetika.
- Nakreslete a popište hysterezní smyčku magneticky měkkého a magneticky tvrdého materiálu.
- Co je to indukce při nasycení a co se ve struktuře materiálu děje v této fázi magnetizace?
- Nakreslete magnetizační charakteristiku lineárního a nelineárního magnetika.
- Co je to magnetostrikce?
- Jak lze v principu ovlivnit magnetické vlastnosti magnetik?
- Jmenujte typické vlastnosti magneticky měkkých/tvrdých materiálů?



Kontrolní otázky

- Je čisté železo magneticky měkký nebo tvrdý materiál?
- Popište vlastnosti a použití křemíkové oceli.
- Jaký je rozdíl mezi plechy válcovanými za tepla a za studena?
- Jaký je rozdíl mezi CRGO a CRNGO plechy?
- Co je to permalloy a kde se používá?
- Jaká je nevýhoda kobaltových slitin?
- Jaké magneticky měkké slitiny mohou typicky dosahovat velmi vysokých hodnot B_s (např. až 2,4 T)?
- Jak a z čeho se zpracovávají magneticky měkké/tvrde ferity?

