

## MAGNETICKÉ MATERIÁLY

Podle odlišného chování v magnetickém poli je možné rozřadit všechny materiály na feromagnetické a neferomagnetické.

K feromagnetickým materiálům (označují se často jako magnetické) se řadí především železo, nikl, kobalt a jejich slitiny a skupina látek feromagnetických, jejichž hlavním představitelem jsou ferity.

Neferomagnetické materiály se třídí na dvě velké skupiny: materiály diamagnetické a paramagnetické.

## MATERIÁLY DIAMAGNETICKÉ, PARAMAGNETICKÉ, FEROMAGNETICKÉ, ANTIFEROMAGNETICKÉ, FERIMAGNETICKÉ A METAMAGNETICKÉ

Magnetické vlastnosti materiálů jsou dány pohybem elektronů v atomech. Pohyb elektronu okolo jádra vyvolává dráhový magnetický moment elektronu, spin vyvolává spinový magnetický moment elektronu. Součtem obou těchto magnetických momentů jednotlivých elektronů je dán výsledný magnetický moment atomu, který lze považovat za magnetický dipól (elementární magnet). Tento moment určuje magnetické vlastnosti materiálu. Přitom dráhové a spinové magnetické momenty se mohou buď částečně, nebo zcela kompenzovat. Částečná nebo úplná kompenzace momentů závisí na obsazení vnitřních slupek atomového obalu elektrony.

Magnetické vlastnosti prostředí jsou charakterizovány poměrnou permeabilitou  $\mu$ , a magnetickou susceptibilitou  $\kappa$ . V tabulce 15 je uvedena permeabilita, susceptibilita a uspořádání vlastních magnetických momentů materiálů s rozdílným druhem magnetismu.

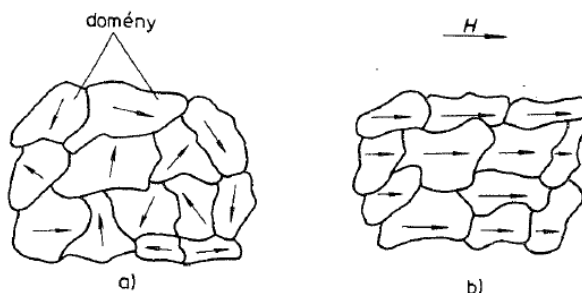
Diamagnetické materiály mají vnitřní slupky v atomovém obalu plně obsazeny elektrony. Jednotlivé dráhové a spinové momenty se tedy úplně kompenzují, takže atomy nemají výsledný vlastní magnetický moment. Získávají jej až po vložení materiálu do magnetického pole.

Paramagnetické materiály nemají vnitřní slupky v atomovém obalu plně obsazeny elektrony. Není tedy možná úplná kompenzace dráhových a spinových momentů; každý atom má stálý výsledný magnetický moment. Tyto momenty jsou však rozloženy nepravidelně všemi směry. Teprve po přiložení vnějšího magnetického pole se natáčejí magnetické momenty atomů do směru pole a navenek se projevuje slabé zmagnetování.

Feromagnetické materiály mají podobně jako paramagnetické materiály stálý výsledný magnetický moment, který je dán nevykompenzovanými spinovými magnetickými momenty na některé z vnitřních, neúplně obsazených slupek atomového obalu. U skupiny železa je to slupka 3d.


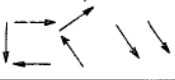





Podle Weissovy teorie feromagnetismu vytvářejí skupiny atomů ve feromagnetickém materiálu malé oblasti, které se nazývají domény. Magnetický moment domény je podstatně větší než magnetický moment atomu. Magnetické momenty domén jsou rozloženy náhodně (obr. 38) a ve svém působení se ruší. Vlivem vnějšího magnetického pole se magnetické momenty domén postupně orientují do směru pole, dochází ke zmagnetování materiálu. Feromagnetismus není tedy vlastností jednotlivých atomů, nýbrž celých oblastí — domén.

Uspořádání magnetických momentů ovlivňuje teplota. Zahřeje-li se feromagnetický materiál na určitou teplotu označovanou jako Curieova teplota, zanikají jeho feromagnetické vlastnosti a stává se z něho paramagnetický materiál.



Obr. 38. Doménová struktura feromagnetického materiálu  
a) bez magnetického pole, b) v magnetickém poli

Tabulka 15. Vlastnosti materiálů s rozdílným druhem magnetismu

Druh magnetismu	Poměrná permeabilita $\mu_r$	Magnetická susceptibilita $\chi$	Vlastní magnetické momenty	Materiál
neutrální	1	0		vakuum
diamagnetismus	< 1	< 0	úplně kompenzované 	měď, vzácné plyny, většina organických látek
paramagnetismus	> 1	> 0	rozloženy nepravidelně všemi směry 	hliník, kyslík
feromagnetismus	závisí na intenzitě magnetického pole		Weissova doména 	železo, kobalt, nikl, gadolinium, četné slitiny a sloučeniny z prvků feromagnetických i neferomagnetických
	$\gg 1$	$\gg 1$		
antiferomagnetismus	> 1	> 0	uspořádány antiparalelně 	mangan
ferimagnetismus	$\gg 1$	$\gg 1$	uspořádány antiparalelně, ale nestejně velké 	ferity manganatozinečnaté, nikelnatozinečnaté
metamagnetismus	závisí na intenzitě magnetického pole		malá $H$ 	chlorid železitý
			velká $H$ 	

Feromagnetismus je vázán na určitou strukturu krystalové mřížky, a proto se může vyskytovat pouze u materiálů v pevném skupenství; nemůže vzniknout u materiálů v kapalném nebo plynném skupenství.

Antiferomagnetické materiály, jako např. mangan, se řadí mezi materiály paramagnetické. Liší se od nich tím, že magnetické momenty jsou uspořádány antiparalelně (tab. 15). Sléváním manganu jako antiferomagnetické složky s mědí a hliníkem jako neferomagnetickými složkami dochází k takovému uspořádání atomů krystalové mřížky slitiny, že vznikne feromagnetický materiál. Známé jsou Heuslerovy slitiny se složením např. 26 % manganu, 13 % hliníku a 61 % mědi.

Feromagnetické materiály mají seřazeny sousední magnetické momenty antiparalelně. Tyto momenty však nejsou stejně velké, nevykompenzují se a projevují se výsledným rozdílovým magnetickým momentem. Feromagnetismus je zvláštním případem antiferomagnetismu.

Metamagnetické materiály (tab. 15) se chovají ve slabém magnetickém poli jako antiferomagnetické, v silném poli jako feromagnetické.

## ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI MAGNETICKÝCH MATERIÁLŮ

### Porovnání materiálů podle elektrické a magnetické vodivosti

Z hlediska elektrické vodivosti se rozlišují materiály, které vedou elektrický proud, a materiály, které jej nevedou. Je tedy možné vodiče v elektrickém obvodu dokonale izolovat. Potom prochází proud pouze cestou, kterou vymezuje vodič.

Z hlediska magnetické vodivosti všechny materiály vedou magnetický indukční tok. Nejsou tedy materiály, které by jej nevedly, tj. materiály magneticky nevodivé, pro které by platilo  $\mu_r = 0$ . Magnetickému indukčnímu toku není možné vymezit cestu jako elektrickému proudu ve vodiči.

### Charakteristiky magnetování

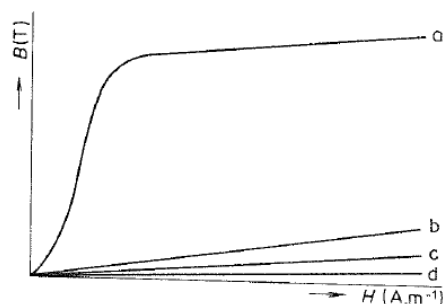
Magnetické vlastnosti feromagnetických a ferimagnetických materiálů v magnetickém poli popisuje závislost magnetické indukce B na intenzitě magnetického pole H podle vztahu

$$B = \mu H = \mu_r \mu_0 H$$

kde  $\mu$  je permeabilita,  $\mu_r$  poměrná permeabilita,  $\mu_0$  magnetická konstanta.

Závislost  $B = f(H)$  není pro feromagnetické materiály lineární, protože jejich poměrná permeabilita  $\mu_r$  se mění podle velikosti intenzity magnetického pole H, a proto se znázorňuje obvykle graficky. Nazývá se křivka magnetování.

Pro neferomagnetické materiály je závislost  $B = f(H)$  lineární, protože jejich poměrná permeabilita  $\mu_r$  je stálá ( $\mu_r < 1$  pro látky diamagnetické,  $\mu_r > 1$  pro látky paramagnetické,  $\mu_r = 1$  pro vakuum). Křivka magnetování pro neferomagnetické materiály je přímka vycházející z počátku, jejíž směrnice je úměrná poměrné permeabilitě  $\mu_r$ . Křivky magnetování pro materiál feromagnetický a neferomagnetický (diamagnetický, paramagnetický, vakuum) jsou uvedeny na obr. 39.

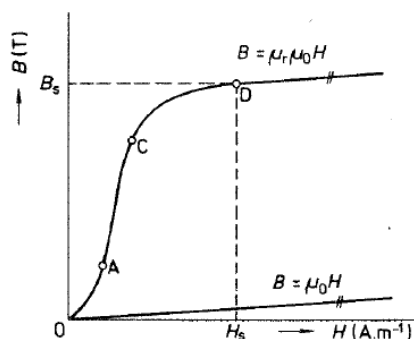


Obr. 39. Křivky magnetování materiálu  
 a – feromagnetického,  
 b – paramagnetického,  
 c – vakuum,  
 d – diamagnetického

Křivka magnetování materiálu, který je magnetován buď poprvé, nebo po předcházejícím dokonalém odmagnetování, se nazývá křivka prvotního magnetování. Spolu s hysterezní smyčkou patří tato křivka k charakteristikám magnetování materiálu. Každý magnetický materiál má své vlastní charakteristiky magnetování. Tyto charakteristiky se získají při magnetování stejnosměrným proudem. Tvar charakteristik se změní při magnetování střídavým proudem.

#### Křivka prvotního magnetování

Tato křivka (obr. 40) po průchodu počáteční oblastí OA přechází do strmé části AC, na níž navazuje horní koleno v úseku CD. Od bodu D přechází křivka do oblasti nasycení. Při intenzitách pole  $H > H_s$ , tj. za bodem D, je feromagnetický materiál magneticky nasycen. Magnetická indukce v magnetickém nasycení  $B_s$ , charakterizující materiál, závisí na jeho chemickém složení.

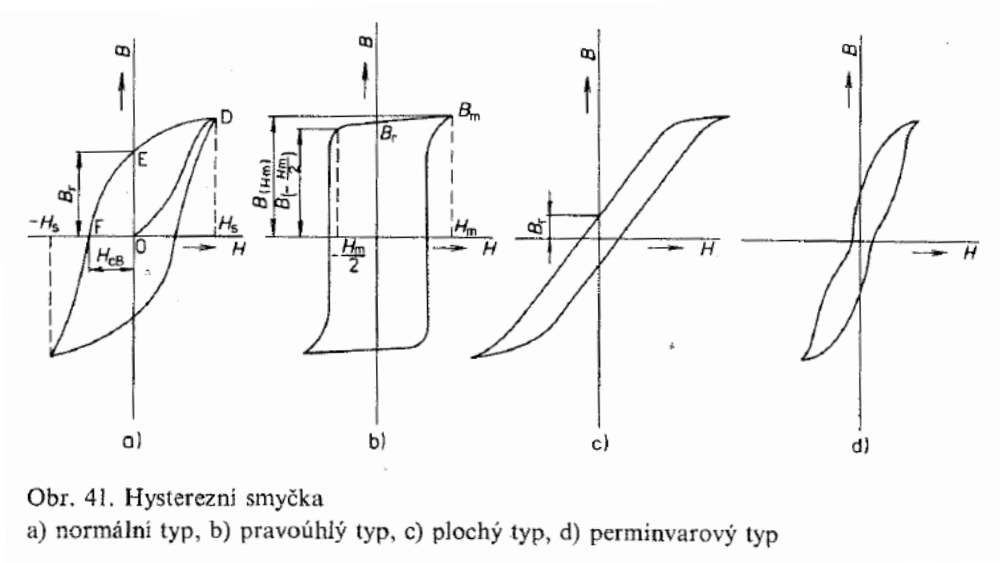


Obr. 40. Křivka prvotního magnetování

#### Hysterezní smyčka

Hysterezní smyčka magnetického materiálu (obr. 41) je uzavřená křivka magnetování, která vyjadřuje závislost  $B = f(H)$  při pomalé, plynulé změně intenzity magnetického pole od  $+H_s$  do  $-H_s$ . Intenzita magnetického pole  $H_s$  odpovídá bodu nasycení D.

Hysterezní smyčka se získá provedením jednoho tzv. cyklu magnetování. Úsek hysterezní smyčky OE se nazývá remanence  $B_r$ , úsek OF koercivita  $H_{cB}$ . Hysterezní smyčka, která vychází z pracovního bodu odpovídajícího magnetické indukci v magnetickém nasycení  $B_s$  se nazývá hraniční (maximální) hysterezní smyčka.

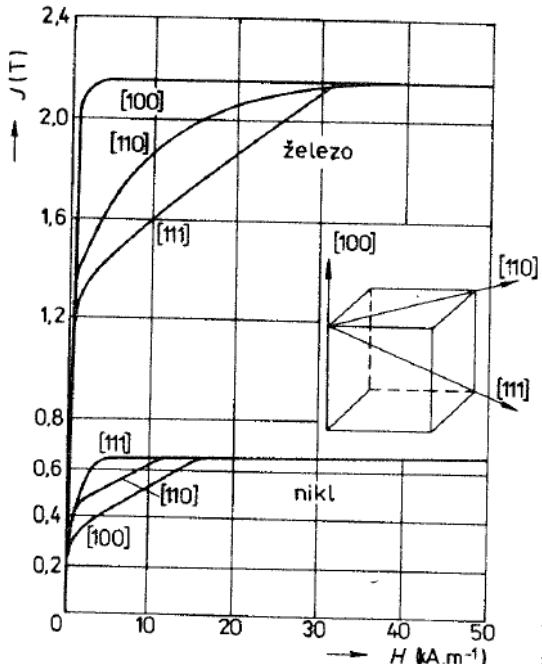


Na tvar hysterezní smyčky má vliv především chemické složení a stav krystalové mřížky, související se způsoby technologického zpracování, jako např. válcováním za studena nebo za tepla, žháním nebo kalením.

Magnetická anizotropie

U feromagnetických materiálů se projevuje magnetická anizotropie tím, že jejich krystaly mají v různých krystalografických směrech odlišné magnetické vlastnosti. V některém směru je magnetování snazší než v jiném směru. Podle toho se rozlišuje směr snadného a neseadného magnetování vzhledem k osám krystalu.

U krystalu železa  $\alpha$  s prostorově středěnou mřížkou je směrem snadného magnetování směr jeho osy [100]. Směr méně snadného magnetování je směr [110]. Směr nejméně snadného magnetování je směr [111] (obr. 42).



Obr. 42. Křivky magnetování železa a niklu v různých krystalografických směrech

## CHARAKTERISTICKÉ VLASTNOSTI MAGNETICKÝCH MATERIÁLŮ

Charakteristické vlastnosti magnetických materiálů jsou vyjádřeny několika základními veličinami.

### Permeabilita

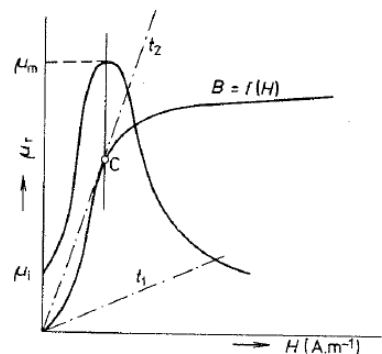
Permeabilita  $\mu$  charakterizuje vliv magnetického pole na magnetický stav materiálu. Vychází se ze vztahu  $\mu = \mu_0 \mu_r$ ,

kde  $\mu$  je permeabilita,  $\mu_0$  permeabilita vakua (magnetická konstanta),  $\mu_r$  poměrná permeabilita.

Poměrná permeabilita  $\mu_r$  charakterizuje vlastnosti materiálu. U neferomagnetických materiálů se nepatrně liší od hodnoty 1 a je stálá. Poměrná permeabilita feromagnetických a ferimagnetických materiálů má velkou hodnotu, i několik set tisíc, která není stálá a závisí na intenzitě magnetického pole  $H$  a na předcházejícím magnetování. Průběh závislosti  $\mu_r = f(H)$  znázorňuje křivka permeability na obr. 43. Se zvětšující se intenzitou magnetického pole  $H$  se poměrná permeabilita zvětšuje z počáteční hodnoty  $\mu_i$  na maximální hodnotu  $\mu_m$ ; dosáhne ji v bodě C.

Počáteční permeabilita  $\mu_i$  se vztahuje k počáteční oblasti křivky  $B = f(H)$ . Je úměrná směrnici tečny  $t_1$  vedené ke křivce prvotního magnetování v počátku.

Maximální permeabilita  $\mu_m$  je největší hodnota permeability (obr. 43). Je úměrná směrnici tečny  $t_2$  vedené z počátku souřadnic k hornímu kolenu křivky prvotního magnetování (komutační křivky).



Obr. 43. Křivka permeability

### Koercivita

Koercivita  $H_{cB}$  ( $A \cdot m^{-1}$ ) vyjadřuje hodnotu intenzity magnetického pole, při které je magnetická indukce nulová, pokud se zmenšovala intenzita magnetického pole předepsaným způsobem. Je udána na hysterezní smyčce úsečkou OF (obr. 41a).

Podle velikosti koercivity se třídí magnetické materiály na magneticky měkké a magneticky tvrdé. Například magneticky měkká křemíková ocel Eo 10 má koercivitu  $28 A \cdot m^{-1}$ .

### Remanence

Remanence  $B_r$  vyjadřuje hodnotu magnetické indukce při nulové hodnotě intenzity magnetického pole, pokud byl magnetický materiál demagnetován předepsaným způsobem. Na hysterezní smyčce je udána úsečkou OE (obr. 41a). Jednotkou je tesla. Remanence magnetických materiálů se pohybuje v rozmezí 0,5 až 1 T.

Curieova teplota

Curieova teplota, udává teplotu, při níž materiál přechází ze stavu feromagnetického do paramagnetického. Kobalt má Curieovu teplotu 1120 °C, ferity 90 až 500 °C.

## DRUHY MAGNETICKÝCH MATERIÁLŮ A JEJICH VLASTNOSTI

Tabulka 16. Druhy magnetických materiálů

<p><b>1. Magneticky měkké materiály</b> Základní vlastnosti:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>– snadno se zmagnetují (i slabým vnějším magnetickým polem), snadno se odmagnetují;</li><li>– úzká hysterezní smyčka (strmý průběh křivky prvotního magnetování);</li><li>– malá koercivita (<math>H_{cB} &lt; 1\,000\text{ A} \cdot \text{m}^{-1}</math>);</li><li>– velká počáteční a maximální permeabilita;</li><li>– malé hysterezní ztráty při magnetování střídavým proudem.</li></ul> <p><b>2. Magneticky tvrdé materiály</b> Základní vlastnosti:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>– nesnadno se zmagnetují a zejména přemagnetují;</li><li>– široká hysterezní smyčka (málo strmý průběh křivky prvotního magnetování);</li><li>– velká koercivita (<math>H_{cB} &gt; 1\,000\text{ A} \cdot \text{m}^{-1}</math>);</li><li>– velká remanence;</li><li>– velký maximální součin <math>(BH)_m</math>.</li></ul> <p><b>3. Materiály se zvláštními magnetickými vlastnostmi.</b></p>
--

Mezi krystalické materiály se řadí:

1. kovové kompaktní materiály — technicky čisté železo, křemíková ocel, permalloye;
2. kovové práškové materiály — železové materiály;
3. nekovové oxidové materiály — ferity.

Technicky čisté železo

Technicky čisté železo je název pro slitinu železa s obsahem nejvýše 0,1% uhlíku a s malým obsahem např. manganu, fosforu, síry. Zejména uhlík zhoršuje permeabilitu a koercivitu. Magnetické vlastnosti se zlepšují žíháním. Vzhledem k malé rezistivitě se technicky čisté železo používá v magnetických obvodech se stejnosměrným magnetováním. K technicky čistému železu patří ocel Arema, Armco, behanit, karbonylové železo a elektrolytické železo.

## Křemiková ocel

Křemiková ocel je slitina železa a křemíku. Přísadou křemíku se zvětšuje rezistivita materiálu, a tak se omezují ztráty vířivými proudy. Zhoršuje se však zpracovatelnost materiálu, což souvisí s jeho obtížnějším válcováním a stříháním.

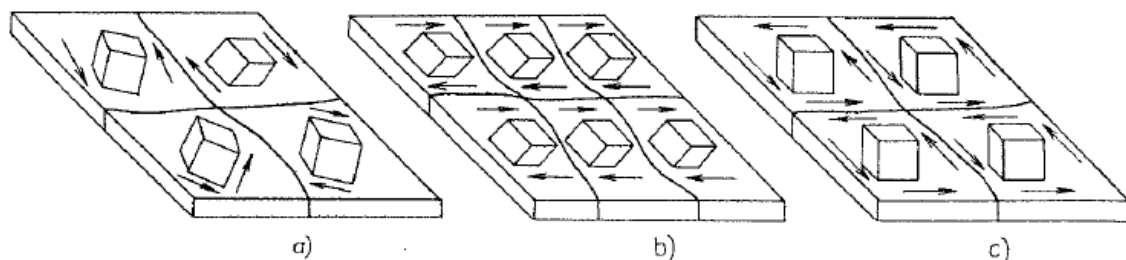
Z křemikové oceli se vyrábějí:

- elektrotechnické plechy válcované za tepla;
- pásy pro elektrotechniku válcované za studena s orientovanou strukturou;
- pásy pro elektrotechniku válcované za studena s neorientovanou strukturou.

### Elektrotechnické plechy válcované za tepla

Magnetické vlastnosti plechu válcovaného za tepla jsou ve všech směrech téměř stejné, protože jednotlivé krystaly v takovém plechu jsou uspořádány náhodně (obr. 45a). Je to tedy magneticky izotropní materiál.

Po dlouhou dobu se výlisky z těchto plechů používaly pro magnetické obvody ve sdělovací i silové elektrotechnice. V současné době se již tyto plechy nevyrábějí, protože jsou plně nahrazeny pásy válcovanými za studena s neorientovanou strukturou.



Obr. 45. Schéma orientace krystalů v plechu, popř. pásu z křemikové oceli  
a) válcovaném za tepla, b) válcovaném za studena s Gossovou strukturou, c) válcovaném za studena s kubickou strukturou

### Slitiny nikl — železo (permalloy)

Slitiny na bázi niklu a železa se označují názvem permalloy. V porovnání s křemikovou ocelí mají velkou počáteční a maximální permeabilitu a je možné je válcovat na plechy tloušťky až 0,03 mm. Vyznačují se malou koercivitou, jsou nasyceny již ve slabém magnetickém poli.

Při jejich výrobě je nutné dodržet kromě chemického složení slitiny též tepelné a mechanické zpracování. Z pásů se lisují výlisky různých tvarů, např. tvaru M a EB (obr. 48). Magnetické vlastnosti závisí na konečném tepelném zpracování ve vodíkové atmosféře při teplotě až 1 300 °C.

Tepelně zpracované součásti se nesmějí dále mechanicky deformovat (ohýbat, vrtat, nýtovat).

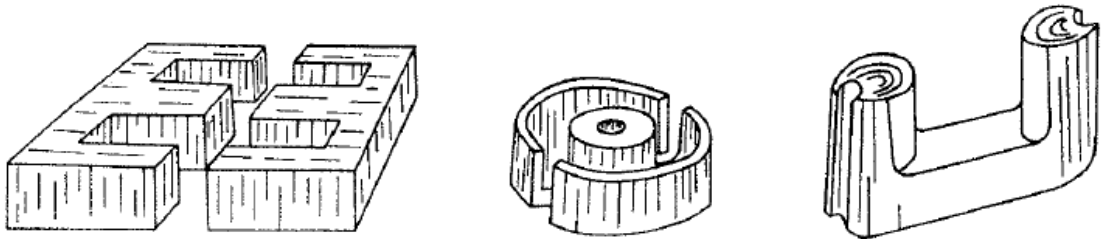


## Magneticky měkké ferity

Ferity jsou oxidové materiály, které vznikají chemickým sloučením oxidu železitého ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) s oxidem vhodného dvojmocného, výjimečně též jednomocného kovu. Mají obecný vzorec  $\text{MO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ , v němž M označuje dvojmocný iont kovu (Mn, Ni, Zn), popř. jednomocný iont kovu, např. Li. Tak vznikají ferity jednoduché, např. ferit nikelnatý  $\text{NiO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$

Ferity se vyrábějí keramickou technologií. Výlisky zhotovené nejčastěji lisováním, popř. protlačováním se vypalují při teplotách 1100 až 1400 °C. Přitom dochází k jejich smrštění až o 25%.

Mechanickými vlastnostmi se ferity podobají keramickým materiálům. Jsou křehké a porézní. Dají se opracovat pouze broušením, řezáním diamantovým kotoučem nebo ultrazvukem. Mají rezistivitu 10 až  $10^5 \Omega \cdot \text{m}$ . Proto jsou ztráty vířivými proudy malé a není třeba dělit jádro na vzájemně izolované vrstvy nebo částčky jako u kovových materiálů.



Obr. 49. Výrobky z magneticky měkkých feritů

## Magneticky tvrdé materiály

Základní vlastnosti magneticky tvrdých materiálů jsou uvedeny v tab. 16. Do této skupiny patří martenzitické oceli, vytvrzovatelné slitiny netvářitelné, vytvrzovatelné slitiny tvářitelné, práškové materiály, ferity a sloučeniny na bázi kobalt — vzácné zeminy.

### Martenzitické oceli

Tyto oceli s martenzitickou strukturou dosahují i po přidání wolframu, chromu, molybdenu nebo kobaltu maximálního součinu (BH), . Zejména z tohoto důvodu význam celé skupiny těchto materiálů klesá.