

MAGNETNI MATERIALI

16.11.2008 11:13

Magnetni materiali

1

MAGNETNO POLJE

- Oersted, Amper: Magnetno polje je posledica gibanja elektrine.

3.2
73

- Magnetno polje gibajoče elektrine opisujemo z:

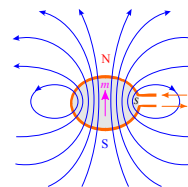
- magnetnim momentom (tok, ploskev tokovne zanke)

$$\vec{m} = I \cdot \vec{S}$$

- magnetizacijo

$$\vec{M} = \frac{\sum \vec{m}}{V}$$

(volumen)



- Na gibajočo elektrino deluje v magnetnem polju sila:

$$d\vec{F} = dQ(\vec{v} \times \vec{B}) = I(d\vec{l} \times \vec{B})$$

16.11.2008 11:13

Magnetni materiali

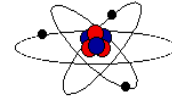
2

Magnetno polje v materialu

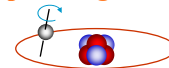
Gibanje elektronov v atomu:

- Nihanje protonov v jedru → majhen vpliv → ga zanemarimo.

- Kroženje elektronov po orbitah → **diamagnetizem**.



- Vrtenje elektronov okrog lastne osi (spin) → **paramagnetizem, feromagnetizem, ferimagnetizem**



atom

- Vsaka snov je zgrajena iz atomov → obstajajo vse tri oblike gibanja elektronov → vsaka snov je magnetna.

- Uporabne so le feromagnetne in ferimagnetne snovi.

Matematični zapis magnetnih razmer v materialu

Gostota magnetnega pretoka:

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M})$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ (Vs/Am)}$$

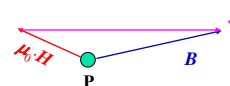
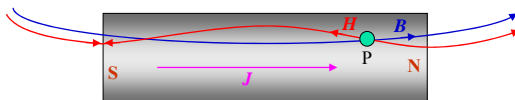
$$\vec{M} = \chi \vec{H}$$

χ - mag. susceptibilnost

$$\vec{B} = \mu_0(1 + \chi)\vec{H} = \mu_0\mu_r\vec{H} = \mu\vec{H} = \mu_0\vec{H} + \mu_0\chi\vec{H} = \mu_0\vec{H} + \vec{J}$$

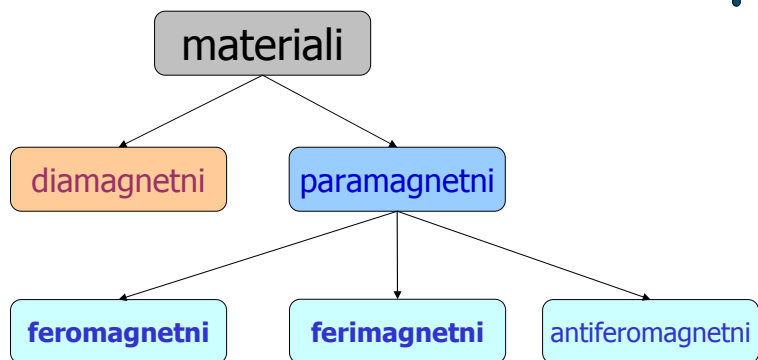
mnogokratnik μ_0 neke snovi

Trajni magnet



OSNOVNA RAZDELITEV MAGNETNIH MATERIALOV

3.3
76



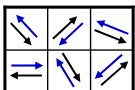
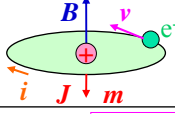
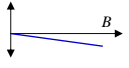
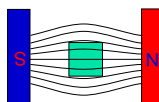

16.11.2008 11:13

Magnetni materiali

5

DIAMAGNETIZEM

3.3.1
76

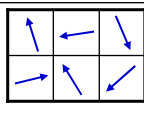
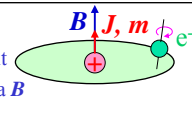
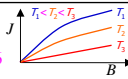
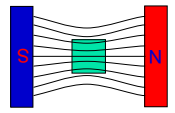
Vzrok:	kroženje elektronov po orbitah, zapolnjene orbite → kompenzacija spinskega momenta.	
Magnetni moment:	brez prisotnosti tujega B zaradi naključnega kroženja elektronov ni momenta. atom	
Usmeritev momentov:	$B = 0$ kompenzacija spinskih m v atomu 	$B \neq 0$ moment je nasproten B 
μ, χ	$\mu_r < 1$, je konstantna, $\chi < 0$ $\mu_{rCu} = 0.99999$, $\chi_{Cu} = -1 \cdot 10^{-6}$	 lastnosti neodvisne od T in B.
Predstavniki:	Bi, Cu, Ag, Au, Ge, Hg, Pb, Be, Sn (sivi), Si, Zn, Cd, Ga, In, Ti, S, B, C, Al ₂ O ₃ , CO ₂ , H ₂ SO ₄ , H ₂ O, ...	
Vpliv na magnetno polje:		idealni diamagnetik je superprevodnik. Meissner-jev efekt: izriv magnetnega polja. 

16.11.2008 11:13

Magnetni materiali

6

PARAMAGNETIZEM

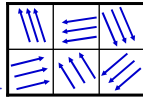
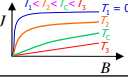
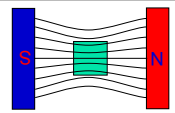
Vzrok:	spinsko gibanje elektronov, nezapolnjene orbite → spinski moment se ne kompenzira.	3.3.2 77
Magnetni moment:	obstaja brez prisotnosti tujega B , zaradi naključnega termičnega nihanja atomov je majhen. Makroskopsko je 0.	
Usmeritev momentov:	$B = 0$ odvisno od trenutne lege nezapoljenih orbit. 	$B \neq 0$ moment podpira B 
μ, χ	$\mu_r > 1$, je \approx konstantna, $\chi > 0$ $\mu_{rAl} = 1.000023$, $\chi_{Al} = 22 \cdot 10^{-6}$	 <p>lastnosti odvisne od T in B.</p>
Predstavniki:	Al, Sn (beli), Pt, Cr, Mn, Ce, Li, Na, Ti, Zr, Ta, Ir Ca, Mg, Mn, U, W, Cr_2O_3 , CeO_2 , $CuCl_2$, FeO_3, \dots	
Vpliv na magnetno polje:		

16.11.2008 11:13

Magnetni materiali

7

FEROMAGNETIZEM

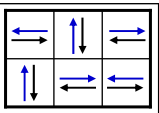
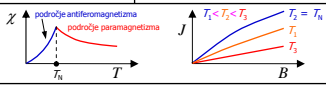
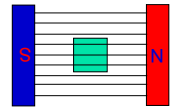
Vzrok:	enak kot pri paramagnetizmu + razmerje medatomske razdalje v kristalu proti polmeru pol zasedene orbite.	3.3.3 78
Magnetni moment:	obstaja brez prisotnosti tujega B , poravnani v področju domen (spontana magnetizacija). Makroskopsko je 0.	
Usmeritev momentov:	$B = 0$ od domene do domene različna. 	$B \neq 0$ m domen v smeri B <p>rast domen z $m \parallel B$. vrtenje domen.</p>
μ, χ	$\mu_r \gg 1$, ni konstantna, $\chi \gg 0$ $\mu_{rFe} = 7000$, $\chi_{Fe} \approx \mu_{rFe}$	 <p>lastnosti odvisne od T in B.</p>
Predstavniki:	Fe, Co, Ni, Dy, Gd, Tb, njihove zlitine	
Vpliv na magnetno polje:		

16.11.2008 11:13

Magnetni materiali

8

ANTIFEROMAGNETIZEM

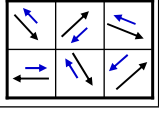
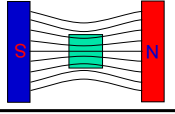
Vzrok:	nezapolnjene orbite + določena kristalna struktura (majhne razdalje med atomi v kristalu).	3.3.4 80
Magnetni moment:	popolna kompenzacija m sosednjih atomov v domeni.	
Usmeritev momentov:	$B = 0$ $m = 0$  $B \neq 0$ $m \approx 0$	
μ, χ	$\mu_r \approx 1$, $\chi \approx 0 = f(T)$ 	lastnosti odvisne od T , delno od B .
Predstavniki:	Cr, Mn, O, Nd, Sm, MnO, MnS, MnF ₂ , FeO, NiO, ..	
Vpliv na magnetno polje:		

16.11.2008 11:13

Magnetni materiali

9

FERIMAGNETIZEM

Vzrok:	nezapolnjene notranje orbite + določena kristalna struktura.	3.3.5 80
Magnetni moment:	obstaja brez prisotnosti tujega B , nepopolna kompenzacija m med skupinami atomov. Makroskopsko je 0.	
Usmeritev momentov:	$B = 0$ od kristala do kristala različna.  $B \neq 0$ m kristalov v smeri B	obnaša se podobno kot feromagnetik. Manjši B_s .
μ, χ	$\mu_r \gg 1$, ni konstantna, $\chi \gg 0$ μ_r - manjša od feromagnetikov	lastnosti odvisne od T in B .
Predstavniki:	Eu, Ho, Er, Tm, magnetit: Fe ₃ O ₄ , spinel: MgAl ₂ O ₄ feriti: MFe ₂ O ₄ , M ₃ Fe ₅ O ₁₂ ,	
Vpliv na magnetno polje:		3 valentne redke zemlje. kovine.

16.11.2008 11:13

Magnetni materiali

10

MAGNETNE LASTNOSTI MAGNETNIH MATERIALOV

- **Ugotovitev:** vsi materiali so magnetni,
- **Tehnično uporabni so:**
 - le tisti, ki imajo ob šibkem B_0 velik prispevek k B (ovrednotimo z M, J, μ, χ) \rightarrow
 - **feromagnetni in ferimagnetni** materiali.
- Po električnih lastnostih spadajo:
 - **feromagnetni** materiali med prevodnike,
 - **ferimagnetni** materiali med polprevodnike.
- Magnetne lastnosti **fero-** in **ferimagnetnih** materialov so:
 - odvisne od zunanjšega magnetnega polja,
 - mnogo večje kot pri drugih tipih magnetizma (dia- in paramagnetikih),
 - odvisne od temperature (Curiejeva temperatura).

3.4
82

16.11.2008 11:13

Magnetni materiali

11

OPIS MAGNETNIH LASTNOSTI MAGNETNIH MATERIALOV

- Zaradi nelinearnosti magnetnih lastnosti jih opisujemo v obliki funkcije:

- $B = f(H)$

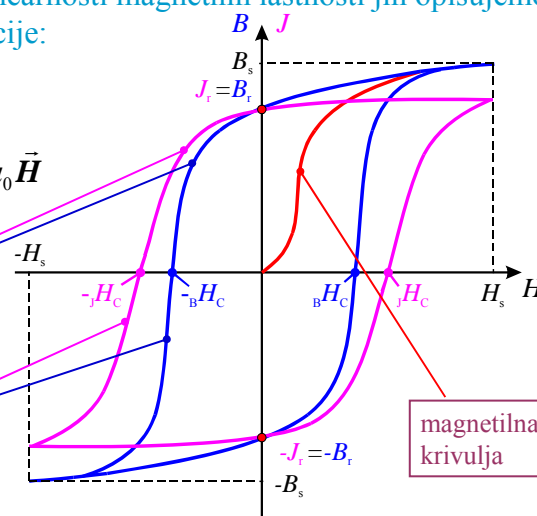
- $J = f(H)$

$$\vec{J} = \vec{B} - \mu_0 \vec{H}$$

razmagnetilna
krivulja (2. kvadrant)

histerezna
zanka

magnetilna
krivulja



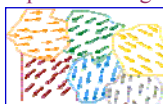
16.11.2008 11:13

Magnetni materiali

12

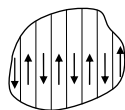
MAGNETNE DOMENE ali WEISSOVA OBMOČJA

- so področja kristala feromagnetnih materialov s spontano magnetizacijo,
- Znotraj domene so magnetni momenti atomov m enako usmerjeni $\rightarrow M$ domene,

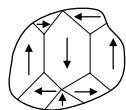


- Smeri M domen so različne in so odvisne od kristalne strukture,

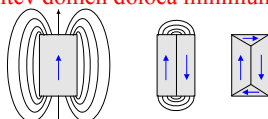
kobalt:
antiparalelno usmerjeni m



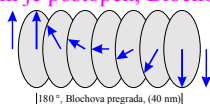
železo:
 m poravnani z robovi kristala



- Število in razporeditev domen določa minimum magnetne energije kristala,



- Prehod m med domenami je postopen, Blochova pregrada:



[180°, Blochova pregrada, (40 nm)]

16.11.2008 11:13

Magnetni materiali

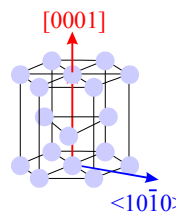
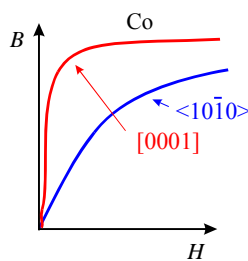
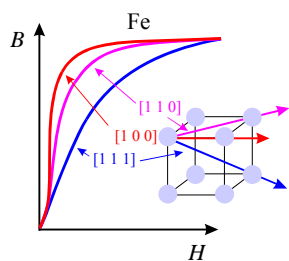
13

3.4.1

82

MAGNETENJE IN PREMAGNETENJE MAGNETNIH MATERIALOV

- Vpliv smeri magnetenja kristala glede na njegovo lego:



16.11.2008 11:13

Magnetni materiali

14

3.4.2

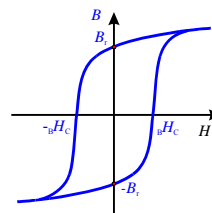
86



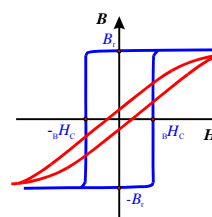
MAGNETENJE IN PREMAGNETENJE MAGNETNIH MATERIALOV

- **Materiali z naključno usmerjenimi kristali:**
 - izotropne lastnosti,
 - magnetne lastnosti določa povprečje vseh domen,
 - okrogle histerezne zanke (R oblika).

- **Materiali z usmerjenimi kristali:**
 - anizotropne lastnosti,
 - pri magnetenju v prednostni smeri je histerezna zanka pravokotna (Z oblika).
 - pri magnetenju pravokotno na prednostno smer je histerezna zanka ploska in položna (F oblika).



3.4.2
87



16.11.2008 11:13

Magnetni materiali

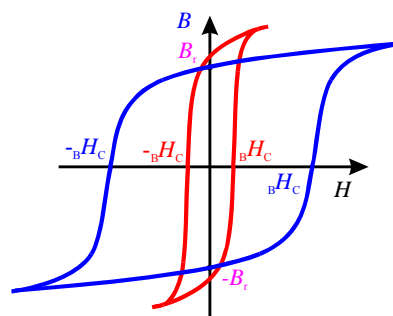
15



MAGNETENJE IN PREMAGNETENJE MAGNETNIH MATERIALOV

- **Kristali brez nepravilnosti:**
 - za premikanje Blochovih pregrad in vrtenje domen je potrebna majhna energija,
 - histerezna zanka je ozka,
 - mehkomagnetni material (za jedra v izmeničnih poljih).

- **Kristali z mnogimi nepravilnostmi:**
 - potrebna velika energija za magnetenje,
 - nepravilnosti ustvarimo z notranjimi napetostmi, vključki,
 - histerezna zanka je široka,
 - trdomagnetni materiali (za trajne magnetne).



3.4.2
88

16.11.2008 11:13

Magnetni materiali

16



GOSTOTA NASIČENJA IN CURIEJEVA TEMPERATURA

SNOV	B_s (T)	T_C (°C)
Fe	2,158	770
Co	1,9	1121
Ni	0,608	358
Gd	1,363	16
Fe ₃ C	1,24	215
MnBi	0,78	350
MnO · Fe ₂ O ₃	0,52	295 ... 303
FeO · Fe ₂ O ₃	0,6	563 ... 590
NiO · Fe ₂ O ₃	0,34	575 ... 597
MgO · Fe ₂ O ₃	0,14	523 ... 440
LiO · Fe ₂ O ₃ · Fe ₃ O ₄	0,39	590 ... 670
BaO · Fe ₂ O ₃	0,41	450

3.4.2
88

16.11.2008 11:13

Magnetni materiali

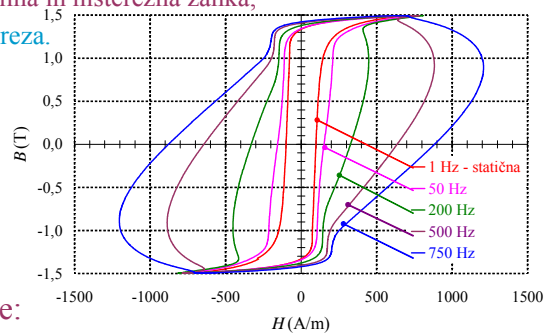
17



MAGNETENJE IN PREMAGNETENJE MAGNETNIH MATERIALOV

Počasno magnetenje:

- zanemarljiv vpliv vrtnčnih tokov,
- statična magnetilna in histerezna zanka,
- simetrična histereza.



Hitro magnetenje:

- prisoten vpliv vrtnčnih tokov → deformacija histereze,
- dinamična magnetilna in histerezna zanka,
- histereza ni vedno simetrična (enosmerno predmagnetenje).

3.4.2
89

16.11.2008 11:13

Magnetni materiali

18



VRSTE PERMEABILNOSTI

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H} = \mu \vec{H}$$

- Absolutna permeabilnost μ :

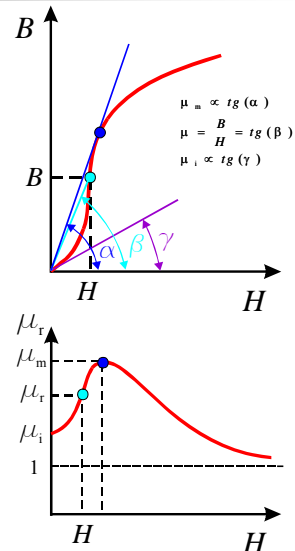
$$\mu = \frac{B}{H} \quad \left(\frac{\text{Vs}}{\text{Am}} \right)$$

v vakuumu $\mu \rightarrow \mu_0$

- Relativna permeabilnost μ_r :

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} = 1 + \chi = \frac{B}{\mu_0 H}$$

- je mnogokratnik μ_0 .
- odvisna je od H (μ_{50} , μ_{100} → 50, 100 A/m)



3.5
90

16.11.2008 11:13

Magnetni materiali

19



VRSTE PERMEABILNOSTI

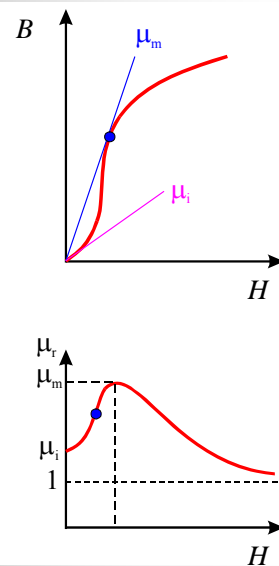
- Maksimalna permeabilnost μ_m, μ_{\max} :

- je največja vrednost μ_r .
- določamo jo na magnetilni krivulji.

- Začetna permeabilnost μ_i (initial):

$$\mu_i = \frac{1}{\mu_0} \lim_{H \rightarrow 0} \frac{B}{H}$$

- vrednost dobimo z ekstrapolacijo $H \rightarrow 0$,
- pri meritvi mora biti $H < 1$ (A/m),
- materiali z velikimi $\mu_i \rightarrow$ visoko permeabilni materiali,
- odvisna od temperature in frekvence.



3.5.3
91

16.11.2008 11:13

Magnetni materiali

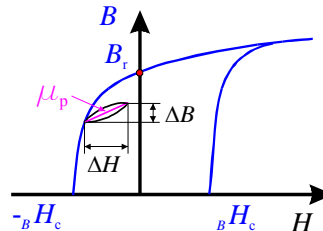
20

- **Permanentna permeabilnost μ_p :**

- je primer inkrementalne permeabilnosti na razmagnetilni krivulji,

$$\mu_p = \frac{1}{\mu_0} \frac{\Delta B}{\Delta H}$$

- pomembna za trajne magnete.



MAGNETNE IZGUBE

- **Obavnavna je odvisna od področja uporabe materiala:**

- **Elektronika:** preko izgubne upornosti (vernost prenosa informacije),
- **Energetika:** preko magnetnih razmer (izkoristek, segrevanje, vernost prenosa informacije – višji harmoniki).

- **Izgubna upornost:**

- magnetne izgube želimo ovrednotiti s joulovim zakonom,

$$P_{iz} = I^2 \cdot R$$

- ta način določanja izgub uporabljamo pri magnetenju v šibkih poljih,

- **upornost jedra R_j :**

$$R_j = R_c - R_-$$

R_c – celotna upornost tuljave

R_- – ohmska upornost pri $f = 0$ Hz

MAGNETNE IZGUBE

- Celotna upornost pri $f \neq 0$ Hz

$$R_c = R_{\text{Cu}} + R_{\text{e}} + R_{\text{v}} + R_{\text{h}} + R_{\text{n}}$$

$\underbrace{\hspace{10em}}_{R_{\text{Cu}}} \quad \underbrace{\hspace{10em}}_{R_{\text{j}}}$

3.6.1
99

R_{Cu} – vpliv vrtilčnih tokov v navitju
 R_{e} – izolacijska upornost
 R_{n} – posledična upornost

- Ločitev izgub v jedru:

$$R_{\text{j}} = R_{\text{v}} + R_{\text{h}} + R_{\text{n}}$$

$$\frac{R_{\text{j}}}{f \cdot L} = v \cdot f + h \cdot H + n$$

- vrtilčna upornost:

$$R_{\text{v}} = v \cdot L \cdot f^2$$

- histerezna upornost:

$$R_{\text{h}} = h \cdot L \cdot f \cdot H$$

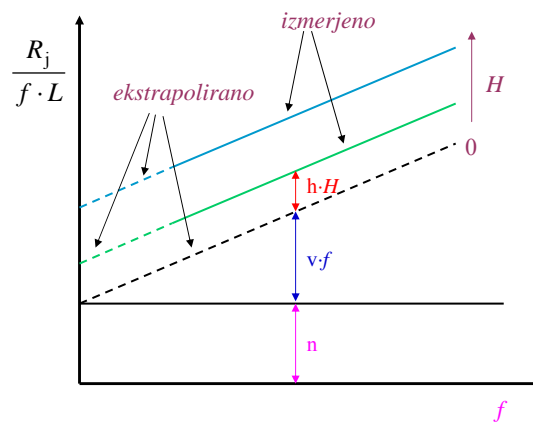
- posledična upornost:

$$R_{\text{n}} = n \cdot L \cdot f$$

MAGNETNE IZGUBE

- Grafična ločitev izgub:

$$\frac{R_{\text{j}}}{f \cdot L} = v \cdot f + h \cdot H + n$$





SPECIFIČNE MAGNETENE IZGUBE

3.6.3
103

- Izgube pri večjih B :

$$P_s = P_v + P_h$$

mW/cm³ – informatika, W/kg - energetika

Za energetske namene podajamo P_{izg} za določen B in za določeno f ($P_{10/50}$, $P_{15/50}$, ...).

- Izgube v magnetni pločevini:

- Histerezne:

$$P_h \cong 0.004 \frac{f H_c \hat{B}}{\rho} \quad \left(\frac{W}{kg} \right)$$

- Vrtinčne:

$$P_v \cong 0.26 \frac{d^2 f^2 \hat{B}^2 \gamma}{\rho} \quad \left(\frac{W}{kg} \right)$$

d = debelina pločevine (cm)
 f = frekvenca (Hz)
 H_c = koercitivna poljska jakost (A/m)
 \hat{B} = temenska vrednost B (T)
 γ = specifična prevodnost (S/m)
 ρ = specifična gostota (g/cm³)

16.11.2008 11:13

Magnetni materiali

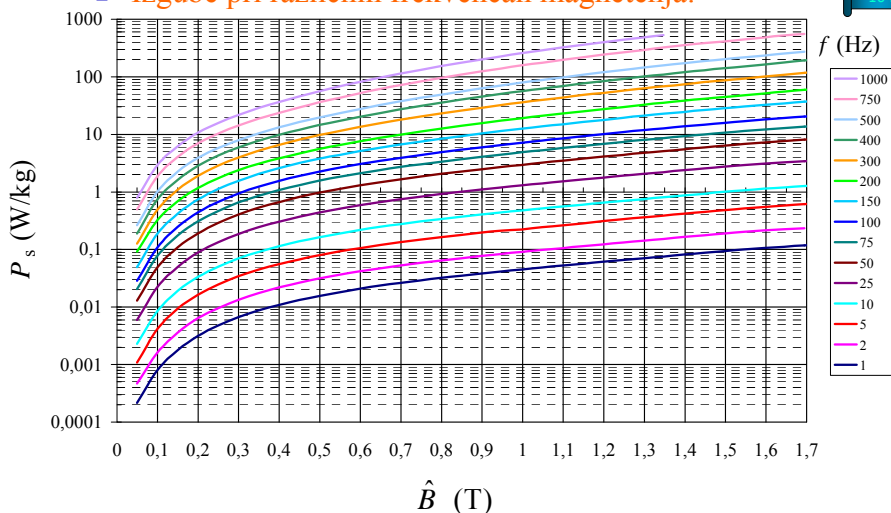
25



SPECIFIČNE MAGNETENE IZGUBE

3.6.3
104

- Izgube pri različnih frekvencah magnetenja:



16.11.2008 11:13

Magnetni materiali

26

SPECIFIČNE MAGNETENE IZGUBE

- Ukrepi za zmanjšanje magnetnih izgub:

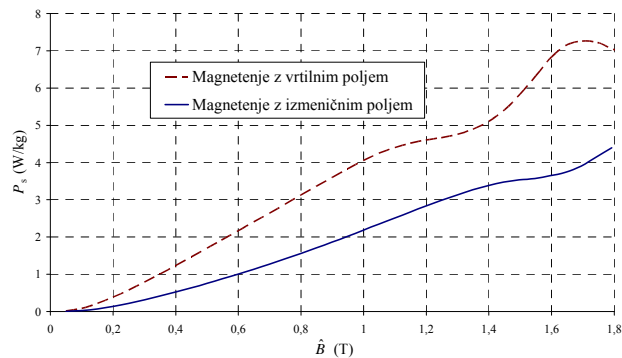
- zmanjšanje γ (legiranje s: Si, ..., uporaba drugih mag. mat: feriti
→ 10^6 - 10^{12} krat manjšo γ kot kovinski),
- uporaba prahaste tehnologije (zdrobitev magnetnega materiala in vezava z izolacijskim materialom),
- stanjšanje lamel pločevine (običajno 0.5 mm),
- medsebojna izolacija lamel (z laki, oksidi),
- uporaba materialov z ozko histerežno zanko,
- optimalna kristalna struktura materiala.

3.6.3
105

VPLIVI MAGNETENJA NA IZGUBE

- Magnetne izgube so odvisne od načina magnetenja:

- Izmenično magnetenje,
- Magnetenje z vrtilnim poljem.

3.6.4
105

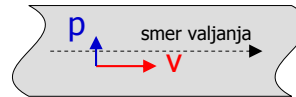


MAGNETNA ANIZOTROPIJA

- je odvisnost magnetnih lastnosti v odvisnosti od smeri,
- je nezaželen pojav ali pa je ustvarjen namenoma,
- je posledica tehnološkega postopka (valjanje, vlečenje, mehanske napetosti, ohlajanje v magnetnem polju, določena kristalna struktura,...),
- ločimo:
 - anizotropijo magnetenja (opazujemo μ) in
 - izgubno anizotropijo (opazujemo izgube premagnetenja).

3.6.5
106

$$A_m(\%) = \frac{\mu_{\max} - \mu_{\min}}{\mu_{\max} + \mu_{\min}} 100$$



$$A_i(\%) = \frac{P_p - P_v}{P_p + P_v} 100 \quad \text{ali} \quad A_i(\%) = \frac{P_{\max} - P_{\min}}{P_{\max} + P_{\min}} 100$$

16.11.2008 11:13

Magnetni materiali

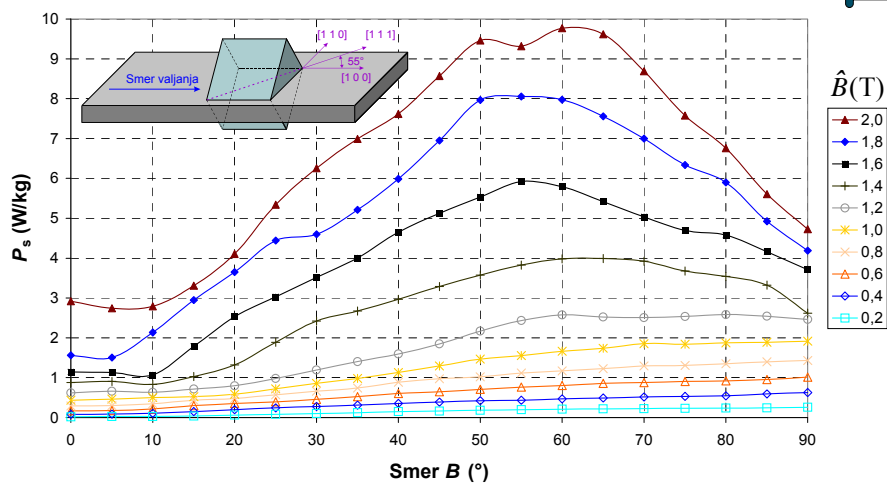
29



MAGNETNA ANIZOTROPIJA

- Izgube v odvisnosti od smeri magnetenja pri različnih B

3.6.5
106



16.11.2008 11:13

Magnetni materiali

30

RAZDELITEV MAGNETNIH MATERIALOV PO MAGNETNIH LASTNOSTIH

Magnetno mehki:

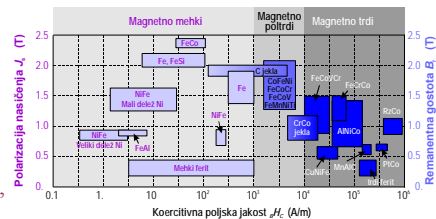
- za premagnetenje je potrebna mala energija,
- premikanje Blochovih pregrad,
- $H_c < 1 \text{ kA/m}$,
- ozke histerezne zanke,
- male P_h , običajno visok μ .

Magnetno pol trdi:

- zlitine Fe Co Ni,
- $1 \text{ kA/m} < H_c < 10 \text{ kA/m}$,
- srednje široke histerezne zanke,
- zahtevajo se določene P_h .

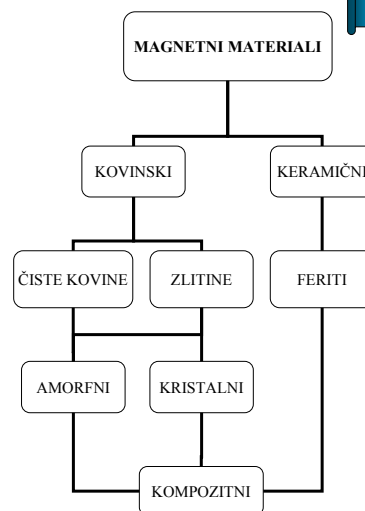
Magnetno trdi:

- za premagnetenje je potrebna velika energija,
- prevračanje Weisssovih območij,
- Blochove pregrade se ne premikajo,
- $H_c > 10 \text{ kA/m}$,
- široke histerezne zanke,
- velike P_h .



VRSTE MAGNETNIH MATERIALOV

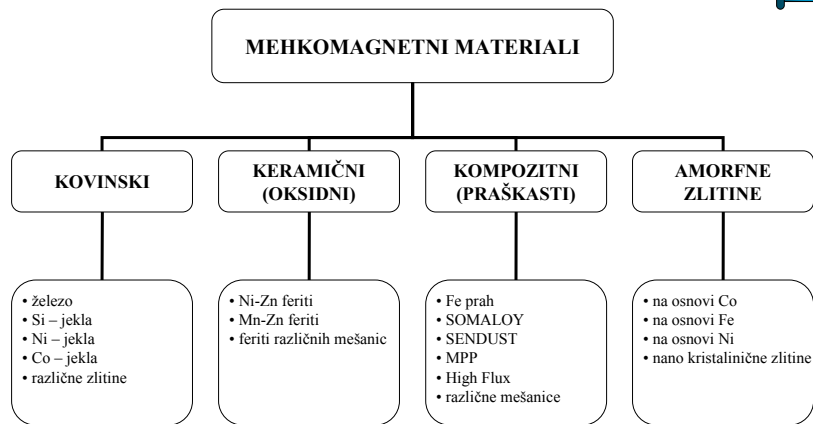
- **Kovinski:** (čiste kovine in zlitine), (magneti so lahko liti ali prahasti),
- **Keramični:** (oksidni - feriti, neoksidni - nitridi, sulfidi, karbidi).





VRSTE MEHKOMAGNETNIH MATERIALOV

3.9.1
117



16.11.2008 11:13

Magnetni materiali

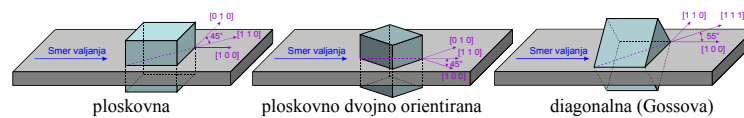
33



KOVINSKI MEHKOMAGNETNI MATERIALI

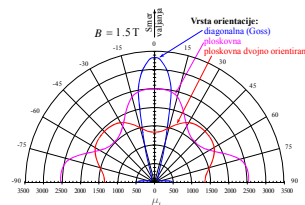
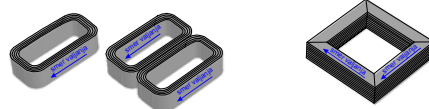
3.9.1.1
118

- Čisto Fe, tehniško čisto Fe, nelegirana jekla: uporaba v enosmernih magnetnih poljih.
- Silicijeva jekla: uporaba v transformatorjih, motorjih, generatorjih in merilnih pretvornikih.
 - s Si in ustrezno teksturo dosežemo odlične magnetne lastnosti,



- vsak % Si v Fe poveča ρ za $\cong 2$ krat in zmanjša B_s za 0.05 T \rightarrow max 3-5% Si,

- z rastjo deleža Si raste krhkost materiala,
- jedra iz Si anizotropnih materialov.



16.11.2008 11:13

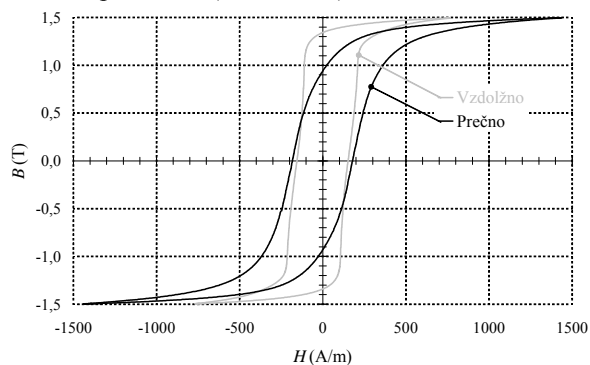
Magnetni materiali

34



KOVINSKI MEHKOMAGNETNI MATERIALI

- Histerezni zanki za vzdolžno in prečno smer magnetenja orientirane pločevine (M600-50A)



- Orientirane pločevine → transformatorske pločevine,
- Neorientirane pločevine → dinamo pločevine.



KOVINSKI MEHKOMAGNETNI MATERIALI

3.9.1.1
129

- **Zlitine Fe-Ni:**
 - so magnetno najmehkejši materiali
 - imajo visoko μ_i in μ_{\max} ,
 - majhna H_c ,
 - možne različne oblike histereznih zank (Z, F, R).
- **Zlitine Fe-Co:**
 - materiali z najvišjimi B_s ($B_s \approx 2,4$ T),
 - lastnosti lahko spreminjamo s sestavo in tehnologijami.



KERAMIČNI MEHKOMAGNETNI MATERIALI

3.9.1.2
127

■ Mehkomagnetni feriti:

- izredno velika ρ ($\rho = 10^3 - 10^7 \Omega\text{m}$) \rightarrow majhne vrtilne izgube \rightarrow za visoke f (do 10 MHz), nizka J_s ($J_s = 0.17 - 0.5 \text{ T}$).
- Po kristalni strukturi delimo ferite na:
 - FERIT 1: kubično-spinelna struktura
 - FERIT 2: kubično-granatna struktura
 - FERIT 3: heksagonalna struktura
- Kristali so homogeni in zmesni, ki zmeraj vsebujejo Fe_2O_3
- $(\text{M}_1\text{O} \cdot \text{M}_2\text{O} \cdot \text{M}_3\text{O} \dots) \text{Fe}_2\text{O}_3 \equiv (\text{M}_1, \text{M}_2, \text{M}_3, \dots) \text{Fe}_2\text{O}_4$
- Uporabljamo enojne, dvojne, ... ferite (število M)
- Najpogosteje uporabljamo:
 - **MnZn ferit:** visoka μ_i , male histerezne izgube, za ferite nizka $\rho \rightarrow$ do 2 MHz.
 - **NiZn ferit:** nižja μ_i , male histerezne izgube, $10^3 - 10^7$ višja $\rho \rightarrow$ do 10 MHz.

16.11.2008 11:13

Magnetni materiali

37



KOMPOZITNI MEHKOMAGNETNI MATERIALI

3.9.1.3
128

- Imenujemo jih tudi SMC materiali (Soft Magnetic Composites),
- Osnova so magnetni prahovi, ki so prevlečeni z oksidom ali z izolacijskim slojem (magnetodielektrični materiali),
- Oblikujemo in utrdimo jih s stiskanjem pod visokimi tlaki,



- So alternativa klasičnim lameliranim materialom in feritom:
 - velika ρ (višja od lameliranih in nižja od feritov) \rightarrow male vrtilne izgube \rightarrow za f (do 200 Hz),
 - dokaj visoka J_s ,
 - lastnosti so odvisne od vrste in velikosti prahov, od deleža veziva in tlaka pri stiskanju.

16.11.2008 11:13

Magnetni materiali

38

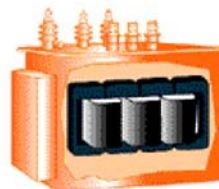
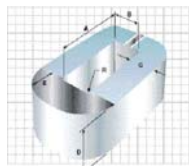


AMORFNI MEHKOMAGNETNI MATERIALI

- So kovinski materiali z amorfno strukturo (kovinsko steklo).
- Amorfno strukturo dosežemo z hitrim ohlajanjem (1.000.000 K/s), z melt spinnerjem,
- Za izboljšanje lastnosti jih termično obdelamo v izmeničnem magnetnem polju → nanokristalinična struktura,
- Ker nimajo kristalnih pregrad so H_c nizke (~ 0.4 A/m) → majhne izgube
- Druge lastnosti:
 - okrog 3 krat večjo ρ od Si jekel ($\sim 1.2 \cdot 10^3 \Omega\text{m}$) → male vrtilne izgube (zmanjšanje do 70% glede na Si jekla),
 - velika μ ($\sim 50\,000$), in μ_m ($\sim 100\,000$),
 - nekoliko nižja B_s (1.6 T) → potrebne večje dimenzije ($\sim 20\%$),
 - uporabni do $f = 400$ Hz,
 - nizka Curiejeva temperatura $\sim 400^\circ\text{C}$.



3.9.1.4
132



16.11.2008 11:13

Magnetni materiali

39



VRSTE MAGNETNO POLTRDIH MATERIALOV

- Običajno so kovinski materiali z osnovo Fe,
- Dodatki: Co, Cr, Cu, Mn, V, Ni, ...
- Lastnosti so odvisne od sestave in tehnoloških postopkov (hladno preoblikovanje, žarjenje, ...)

3.9.2
133

16.11.2008 11:13

Magnetni materiali

40

2 VRSTE TRDOMAGNETNIH MATERIALOV

■ Kovinski trdomagnetni materiali:

■ Martenzitna jekla:

- jekla z $\approx 1\%$ C in različnimi dodatki (Cr, W, Co, ...),
- dobimo iz avstenita s hitrim ohlajanjem
- lahka mehanska obdelava,
- možna termična obdelava,
- magnetne lastnosti: $B_r \approx (0.7 - 1.2) \text{ T}$, $H_c \approx (5.5 - 20) \text{ kA/m}$, $(BH)_{\max} \approx (2.4 - 7.4) \text{ kJ/m}^3$, uporabna temperatura $\leq 80 \text{ }^\circ\text{C}$, zelo občutljivi na staranje.

■ Zlitine Co-Fe-V:

- material: z $\approx 50\%$ Co ter (8-13) %V ostalo je Fe,
- magnetne lastnosti: $B_r \approx (0.8 - 1.4) \text{ T}$, $H_c \approx (10 - 32) \text{ kA/m}$, $(BH)_{\max} \approx (6.5 - 42) \text{ kJ/m}^3$, uporabna temperatura $\leq 350 \text{ }^\circ\text{C}$, pravokotne histerezne zanke, dragi.

3 VRSTE TRDOMAGNETNIH MATERIALOV

■ Zlitine Al-Ni-Co-Fe:



- materiali: z $\approx (5-15) \%$ Al, (24-29) % Ni, (0-40) %Co, Cu, Ti, ..., ter 8-13 %V ostalo je Fe,
- magnetne lastnosti: $B_r \approx (0.6 - 1.3) \text{ T}$, $H_c \approx (35 - 140) \text{ kA/m}$, $(BH)_{\max} \approx (10 - 75) \text{ kJ/m}^3$, uporabna temperatura $\leq 500 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_c \approx 810 \text{ }^\circ\text{C}$,
- posebne lastnosti: nizki temperaturni koeficient, korozijsko obstojni, velika časovna stabilnost lastnosti.

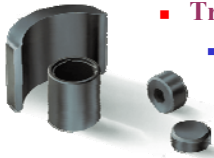
■ Zlitine Mn-Al-C:

- je alternativa dragim materialom,
- materiali: z $\approx 70\%$ Mn, 39 % Al, 1 %C ostalo je Fe,
- magnetne lastnosti: $B_r \approx (0.5 - 0.6) \text{ T}$, $H_c \approx (160 - 210) \text{ kA/m}$, $(BH)_{\max} \approx (40 - 55) \text{ kJ/m}^3$, uporabna temperatura $\leq 100 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_c \approx 300 \text{ }^\circ\text{C}$.

4 VRSTE TRDOMAGNETNIH MATERIALOV

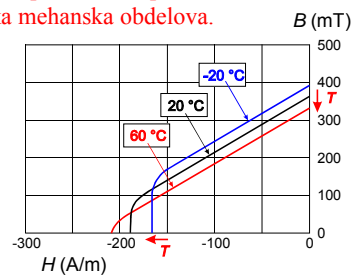
■ Keramični trdomagnetni materiali:

3.9.3.2
136



■ Trdomagnetni feriti:

- **materiali:** splošna formula → $MO nFe_2O_3$
 - barijev ferit: $BaO 6Fe_2O_3$ (najpogostejša uporaba),
 - kobaltov ferit: $CoO Fe_2O_3 + FeO Fe_2O_3$,
 - stroncijev ferit: $SrO 6Fe_2O_3$.
- **magnetne lastnosti:** $B_r \approx (0.2 - 0.5) T$, $H_c \approx (120 - 280) kA/m$, $(BH)_{max} \approx (5 - 40) kJ/m^3$, uporabna temperatura $\leq 150 \text{ }^\circ C$, $T_c \approx 450 \text{ }^\circ C$, krhki, težka mehanska obdelova.



16.11.2008 11:13

Magnetni materiali

43

5 VRSTE TRDOMAGNETNIH MATERIALOV

■ Trdomagnetni materiali iz redkih zemelj:

3.9.3.3
138

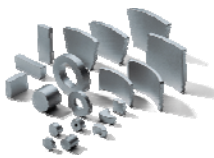
■ Redke zemlje RZ:

- so oksidi elementov med atomskim številom 57 - 71 (lantanoidi), (La - lantan, Sm - samarij, Y - itrij, ..),
- mešanica oksidov redkih zemelj → mischmetal → MM,
- RZ so električno dobro prevodne in piroforne → vnetljive.



■ Zlitine Sm - Co in MM - Co:

- zlitina je intermetalna spojina,
- **sestava:** običajno zlitina Sm ali tudi MM (mischmetal) s Co ($SmCo_5$, $MMCo_5$, Sm_2Co_{17}). Co tvori z RZ zlitine, ki imajo izjemne trdomagnetne lastnosti,
- **izdelava:** poteka v obliki prahov, oblikovanje in sintranje se izvaja v zaščitni atmosferi,
- **magnetne lastnosti:** magnetno anizotropni, krhki, dragi, $B_r \approx (0.75 - 1.1) T$, $H_c \approx (520 - 730) kA/m$, $(BH)_{max} \approx (110 - 200) kJ/m^3$, uporabna temperatura $\leq 250 \text{ }^\circ C$, $T_c \approx 725 \text{ }^\circ C$, $\mu_{rec} = 1.05$,
- **uporaba:** zaradi visoke cene v miniaturnih dražjih napravah ob povišanih temperaturah.



16.11.2008 11:13

Magnetni materiali

44



- **Zlitine Nd-Fe-B:**

- **sestava:** $\approx 15\%$ Nd, do 77% Fe in $\approx 8\%$ B \rightarrow metalidna zlitina,
- **izdelava** je prahastega tipa:
 - komponente stalimo v vakuumski peči in naglo ohladimo \rightarrow nanokristalinična struktura,
 - material zdrobimo v prah,
 - oblikovanje poteka s stiskanjem (lahko je prisotno magnetno polje),
 - utrjevanje: sintranje, vezava z umetnimi smolami.
- **mehanske lastnosti:** podobne trdim jeklom \rightarrow možno mehansko obdelovati, slaba korozijska obstojnost,
- **magnetne lastnosti:** $B_r \approx (0.7 - 1.3) T$, H_c (400 - 1000) kA/m, $(BH)_{\max} \approx (200 - 350) \text{ kJ/m}^3$, nizka uporabna temperatura $\leq 120 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_c \approx 310 \text{ }^\circ\text{C}$, $\mu_{\text{rec}} = (1.06 - 1.15)$, močna magnetna anizotropnost, poceni (reda feritov).

- **Zlitine Sm-Fe-N:**

- **perspektivna sestava:** $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_3$ (boljše lastnosti od $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$),
- izdelava je izredno zahtevna.

- **Kompozitni trdomagnetni materiali**

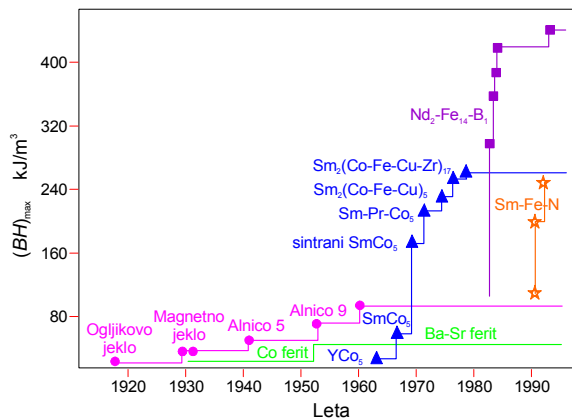
- **cilj uporabe kompozitnih materialov:** poenostavitev oblikovanja, izdelava kompliciranih oblik,
- **izdelava:** vezava trdomagnetnih materialov, običajno z višjimi H_c ,
- magnetni materiali so v obliki prahov,
- **oblikovanje:** stiskanje ali brizganje,
- **lastnosti:** izotropne ali anizotropne.

8 VRSTE TRDOMAGNETNIH MATERIALOV

Pregled lastnosti trdomagnetnih materialov

3.9.3.5

141



16.11.2008 11:13

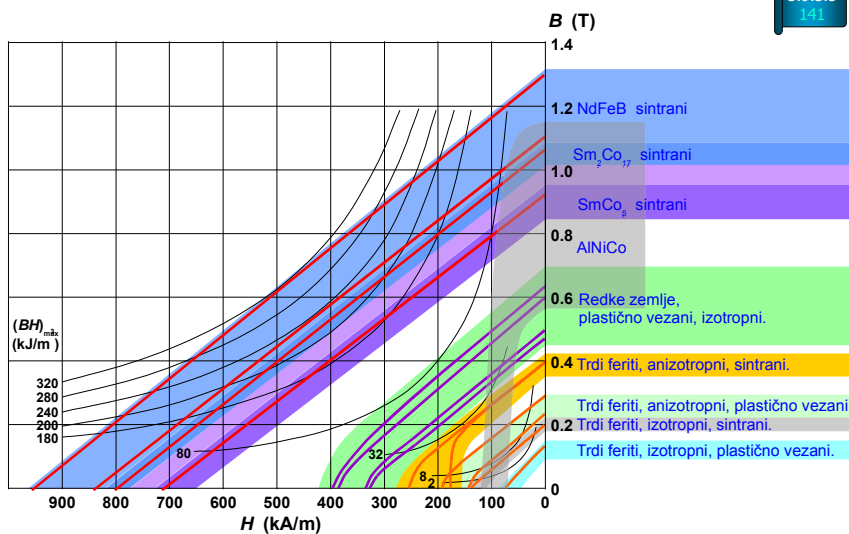
Magnetni materiali

47

9 VRSTE TRDOMAGNETNIH MATERIALOV

3.9.3.5

141



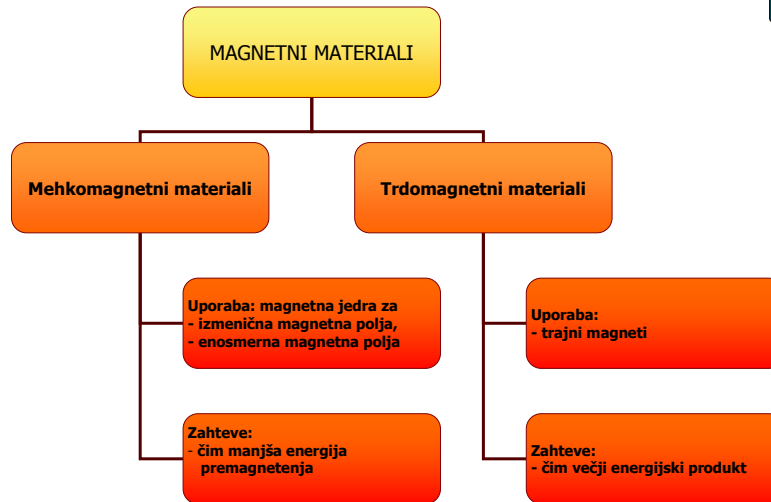
16.11.2008 11:13

Magnetni materiali

48

UPORABA MAGNETNIH MATERIALOV

3.10
143



16.11.2008 11:13

Magnetni materiali

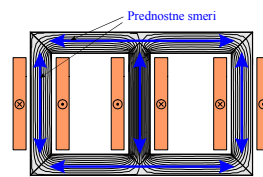
49

2 UPORABA MEHKOMAGNETNIH MATERIALOV

■ Uporaba v energetiki:

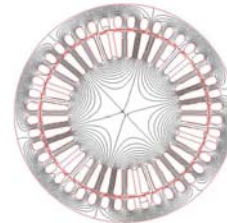
■ Energetski transformatorji:

- čim večja μ_m
- čim lažje magnetenje,
- čim večja stopnja anizotropije,
- čim manjše izgube magnetenja,
- materiali: orientirano Si jeklo.



■ Električni stroji: motorji, generatorji:

- čim večja B_s ,
- čim manjše izgube magnetenja,
- izotropnost magnetnih lastnosti,
- materiali: neorientirano Si jeklo.



■ Merilni pretvorniki:

- čim višja in konstantna permeabilnost,
- čim manjše izgube magnetenja,
- materiali: čisto Fe, Fe-Si, Fe-Ni, Fe-Al, Fe-Co, ...

3.10.1
143

16.11.2008 11:13

Magnetni materiali

50

- Uporaba v elektroniki:

- **Prenosniki in dušilke:**

- **zahteve:** velika μ_i , visoke mejne frekvence, linearna magnetilna krivulja (konstantna μ), dobre impulzne lastnosti (velika razlika $B_s - B_r$), mala temperaturna odvisnost,
 - **materiali:** Fe-Ni, Fe-Al.

- **Merilni pretvorniki:**

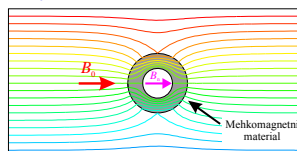
- zahteve: že omenjene lastnosti, širok frekvenčni pas. Ozka histereza, velik μ_{\max} ,
 - **materiali:** Fe-Ni.

- **Magnetni releji:**

- zahteve: velika μ - pritezna sila, mala H_c - lepljenje, visoka ρ - odzivni čas,
 - **materiali:** Fe-Ni, relejno železo

- **Magnetni zasloni:**

- zahteve: velika μ_i , mala H_c
 - **materiali:** Fe-Ni, relejno železo



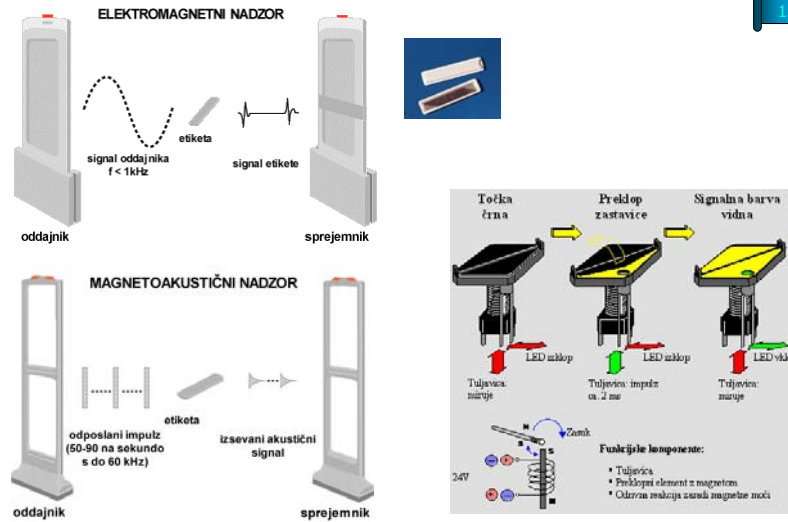
UPORABA MAGNETNO POL TRDIH MATERIALOV

- **Uporaba:** v sistemih, kjer je potrebno material hitro premagnetiti in ta mora ostati namagneteten,
- **Zahteve:** (H_c med 2 - 8 kA/m, velik B_r , pravokotna histereza, hitro premagnetenje, ...)
- **Materiali:** (Co-Fe-Ni, zlitine Fe in Co z Cu, Mn, V, ...)
- **Primeri:** bistabilni releji, hermetični releji, pridrževalni releji, magnetne zavore, histerezni motorji, elektronski nadzor, mehanski displeji, ...)



UPORABA MAGNETNO POL TRDIH MATERIALOV

3.10.2
151



16.11.2008 11:13

Magnetni materiali

53

UPORABA TRDOMAGNETNIH MATERIALOV

3.10.3
152

- Uporabljamo jih izključno za izdelavo trajnih magnetov,
- Trajni magneti so izvori trajnega in konstantnega magnetnega polja.
- Želene lastnosti:
 - čim večji maksimalni energijski produkt $(BH)_{\max}$,
 - μ_p čim bližja vrednosti 1,
 - čim linearnejša razmagnetilna krivulja,
 - čim večji B_p ,
 - čim večja termična stabilnost in višja T_c ,
 - zadostna korozijska obstojnost,
 - zadovoljive tehnološke lastnosti,
 - čim nižja cena.
- Primeri uporabe:
 - elektromehanski sistemi: interakcija med poljem magneta in tokovodnika,
 - magnetomehanski sistemi: interakcija med dvema magnetoma ali magnetom in feromagnetnim materialom,
 - kot permanentni izvor magnetnega polja (magnetne normale, mehčalci vode, ionske črpalke, ciklotroni, ...)

16.11.2008 11:13

Magnetni materiali

54



MAGNETNI MATERIALI

KONEC

16.11.2008 11:13

Magnetni materiali

55