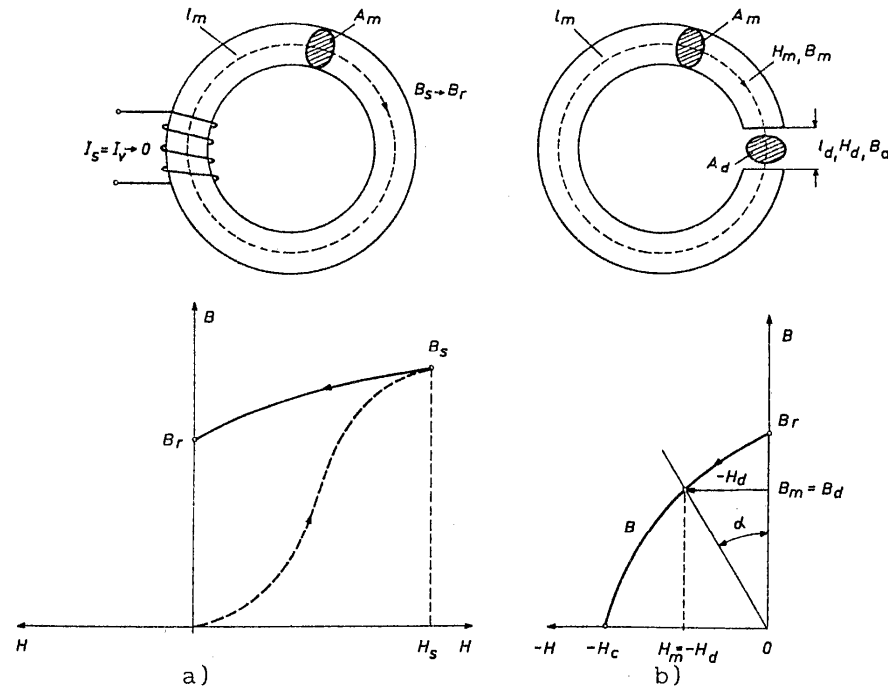


Trdomagnetni materiali



Razmagnetenje lahko opazujemo na dva načina:

- s pomočjo faktorja razmagnetenja $k_{dem} = -\frac{H_m}{M}$, kjer je M magnetenje magneta, k_{dem} pa lahko dosega le vrednosti $k_{dem} < 1$,
- s pomočjo koeficienta permeance $ctg\alpha = \frac{B_m}{\mu_0 \cdot H_m}$, ki je definiran z naklonskim kotom delovne premice.

Če je presek magneta enak preseku zračne reže, lahko pišemo

$$B_d = B_m \text{ in } H_d = H_m,$$

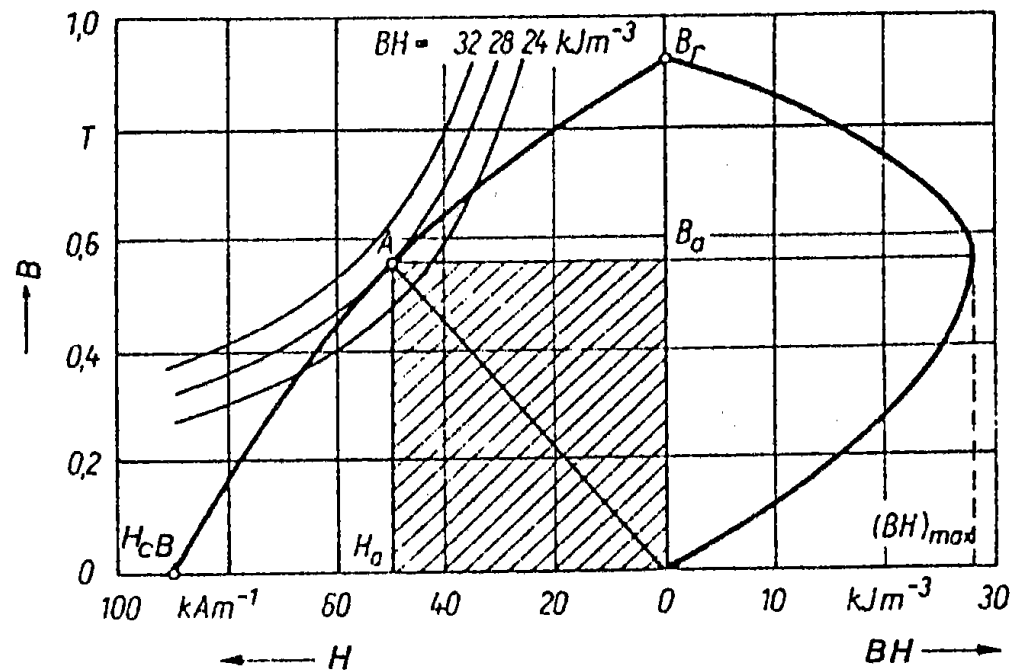
Če je magnet izdelan v obliki tankega obroča, ali na način, da ima majhno zračno režo, kjer lahko stresanje zanemarimo, določimo delovno točko magnetne s pomočjo geometrije:

$$\text{ctg } \alpha = \frac{A_d \cdot l_m}{A_m \cdot l_d} \mu_0$$

kjer so A_d in A_m presek zračne reže oz. magneta, l_d in l_m pa dolžina zračne reže oz. magneta.

Če delovno točko pomikamo po razmagnetilni krivulji in množimo vsakokratno vrednost B_m in H_m , dobimo energijsko vsebino delovne točke magneta:

$$W_d = B_m \cdot H_m \quad \left(\frac{\text{J}}{\text{m}^3} = \frac{\text{Ws}}{\text{m}^3} \right)$$



Čim večji je BH_{maks} pri nekem magnetu, toliko manjši je lahko njegov volumen za opravljanje iste funkcije.

Ker je mogoče na osnovi enačbe $\oint_c H dl = \sum I$ pri stanju $I = 0$ zapisati, da je:

$$H_m \cdot l_m - H_d \cdot l_d = 0$$

Če predpostavimo: $B_m \cdot A_m = B_d \cdot A_d = \Phi$

Z množenjem zgornjih dveh enačb dobimo volumen magneta in če vstavimo $H_d = B_d/\mu_0$:

$$V_m = \frac{B_d^2}{B_m \cdot H_m \cdot \mu_0} V_d$$

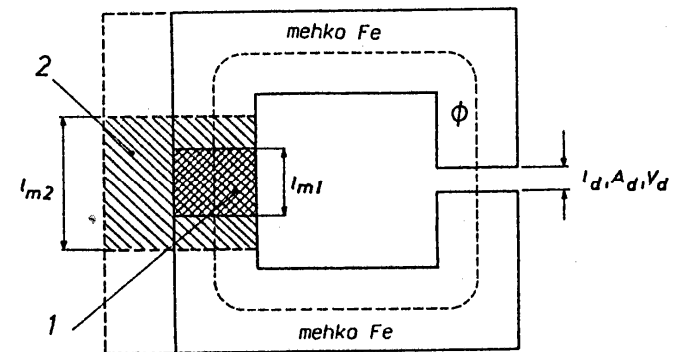
Kakšne lastnosti naj ima trajni magnet?

1. Trajni magnet naj ima čim večji maksimalni energijski produkt

Trdi magnet 1, ima neko dolžino l_{m1} , presek A_{m1} in s tem volumen V_{m1} , poganja magnetno polje skozi zračno režo dolžine l_d , preseka A_d oz. volumna V_d . Torej ustvari trajni magnet 1 naslednje razmere:

$$H_{m1} \cdot l_{m1} = H_d \cdot l_d \quad \text{in}$$

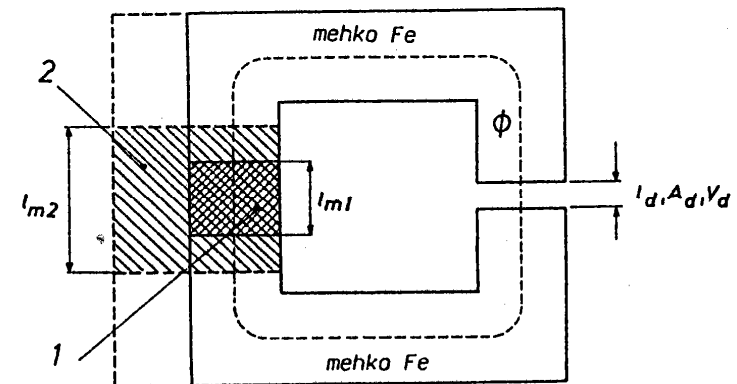
$$B_{m1} \cdot A_{m1} = B_d \cdot A_d = \Phi$$



Če želimo zdaj zamenjati ta magnet s takšnim, ki bi imel slabši energijski produkt $Bm_2 \cdot Hm_2 < Bm_1 \cdot Hm_1$, bi moral biti ustrezno večji. Torej mora biti:

$$H_{m2} \cdot l_{m2} = H_d \cdot l_d \quad \text{in}$$

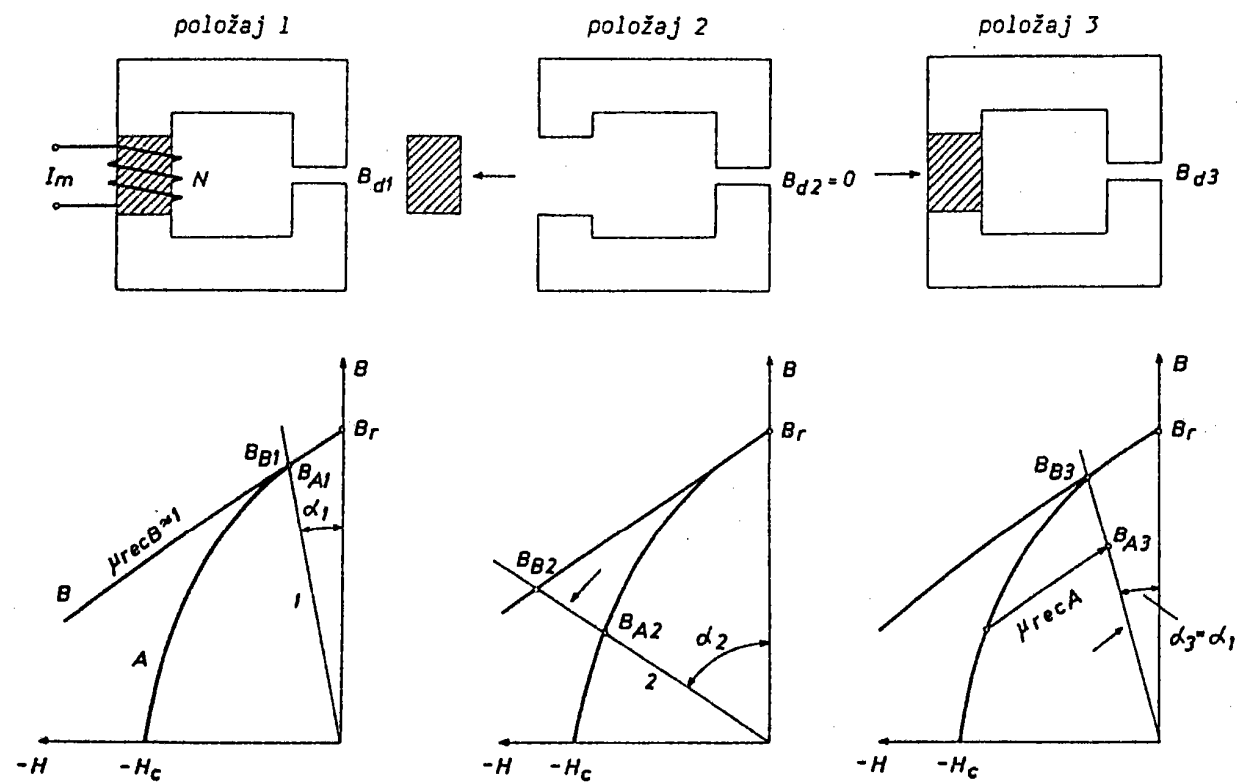
$$B_{m2} \cdot A_{m2} = B_d \cdot A_d = \Phi$$



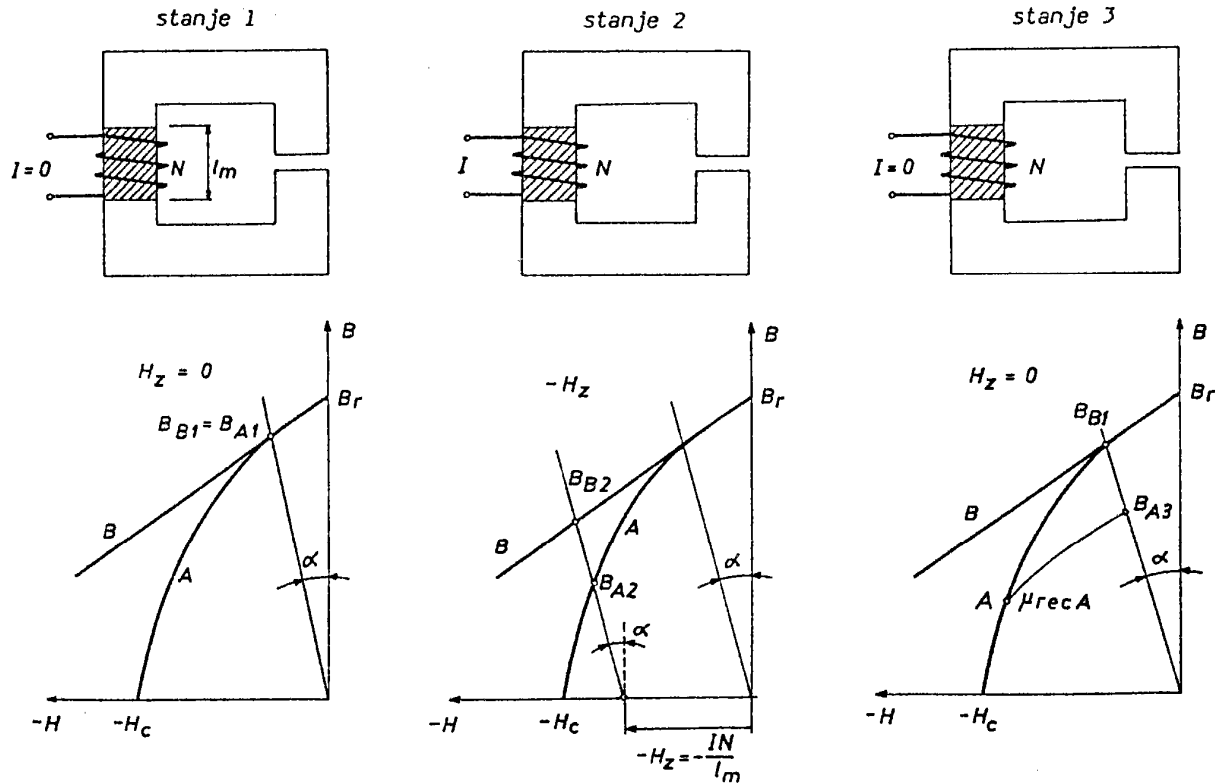
To povzroči pri $Hm_2 < Hm_1$ ustrezno podaljšanje magnetu, torej $l_{m2} > l_{m1}$ in zaradi $Bm_2 < Bm_1$ povečanje preseka magnetu $A_{m2} > A_{m1}$, ker je $V_m = A_m \cdot l_m$. Drugi magnet je torej večji.

2. Magnet naj bo čim manj občutljiv na razmagnetenje.

Ločimo med lastnim razmagnetenjem, ki ga povzroči **sprememba magnetne upornosti** zaradi zračne reže, in razmagnetenjem zaradi **vpliva zunanjega magnetnega polja**.



Lastno razmagnetenje zaradi spremembe reluktance magnetna.



Razmagnetenje z zunanjim magnetnim poljem.

Vsak pomik delovne točke preko kolena razmagnetilne krivulje povzroči ne glede na vzrok trajno razmagnetenje magneta.

3. Magneti naj imajo čim večjo B_r

Če želimo povečanje gostote magnetnega pretoka v zračni reži, uporabimo metodo »**koncentracije magnetnega pretoka**«, to pomeni, da magnetne poti v področju zračne reže zožimo. Tako dobimo:

$$B_d = B_m \frac{A_m}{A_d}$$

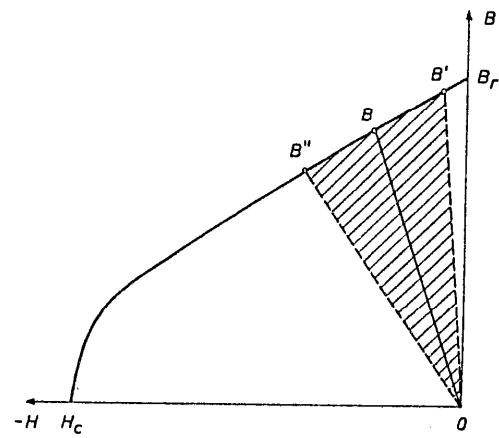
4. Magneti naj bodo termično čim bolj stabilni

$$T_u < T_c$$

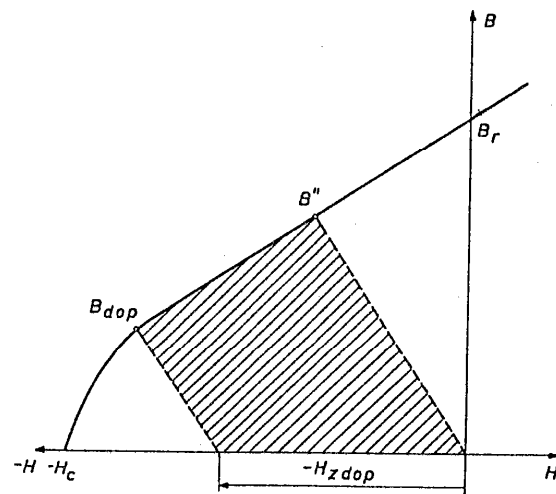
4. Druge pomembne lastnosti

- korozijska obstojnost,
- tehnološke sposobnosti,
- obstojnost na mehanske napetosti in udarce,
- nizka cena,
- v izmeničnih poljih, je pomembno, kolikšna je njegova električna upornost.

Statični in dinamični magnetni sistemi

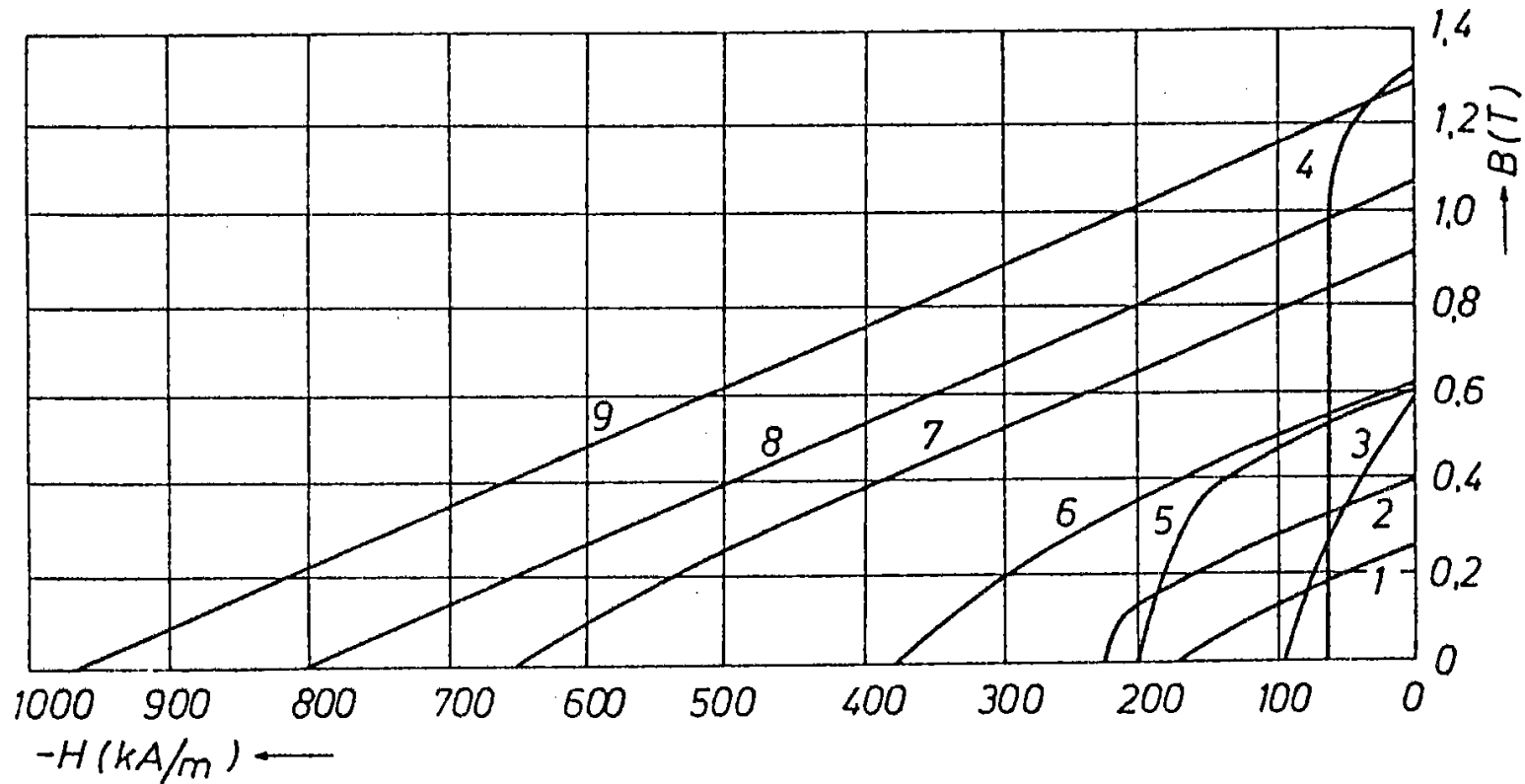


a.)



b.)

Razmagnetilne krivulje tipičnih predstavnikov današnjih magnetov



- 1 - izotropni ferit, 2 - anizotropni ferit,
- 3 - AlNiCo-16 izotropni, 4 - AlNiCo-56 anizotropni,
- 5 - MnAlC, 6 - Pt-Co,
- 7 - Sm-Co₅, 8 - Sm₂Co₁₇,
- 9 - FeNdB. Magneti od 5 do 9 so anizotropni.

Klasifikacija trdomagnetnih materialov

Trdomagnetni materiali	R - Trdomagnetne zlitine	R ₁ - Zlitine AlNiCoFeTi
		R ₂ - Zlitine PtCo
		R ₃ - Zlitine CoFeV
		R ₄ - Zlitine CuFeNi
		R ₅ - Zlitine redke zemlje - Co
		R ₆ - Zlitine NdFeB
	S – trdomagnetna keramika	S ₁ - Trdomagnetni feriti
	T – Ostali trdomagnetni materiali	T ₁ - Martenzitna jekla

Najpomembnejše skupine trajnih magnetov so:

- keramični magneti,
- kovinski magneti (AlNiCo),
- magneti na osnovi redkih zemelj (SmCo in NdFeB) in
- plastificirani ter gumirani magneti na osnovi enega od gornjih magnetih materialov.

Proizvajalci trajnih magnetov opisujejo svoje izdelke z naslednjimi parametri:

- remanenčna gostota magnetnega polja B_r (T),
- koercitivna magnetna poljska jakost H_c (kA/m),
- začetna magnetna poljska jakost H_{ci} (kA/m),
- največji energijski produkt $B \cdot H_{maks}$ in
- najvišjo priporočeno temperaturo uporabe T_{maks} (°C)

Vrsta	B_r (T)	H_c (kA/m)	H_{ci} (kA/m)	$B \cdot H_{max}$	T_{maks} (°C)
NdFeB	0,90-1,20	750-980	950-2400	180-318	150
SmCo	0,80-1,10	620-750	1000-2000	130-240	300
AlNiCo	0,70-1,25	30-120	30-120	9-60	540
keramični	0,30-0,45	170-350	190-360	20-40	300
plastomagnetni	0,13-0,27	85-190	130-230	3-14	100

Tipične vrednosti glavnih parametrov trajnih magnetov.

Keramični magneti

Keramični magneti izkazujejo visoko vrednost H_c in skoraj linearen potek $B-H$ krivulje v drugem kvadrantu, kar je zaželeno pri večini aplikacij, vključno z motorskimi.

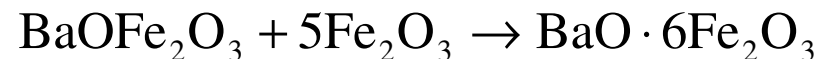
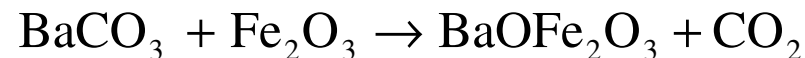
Keramične ali feritne trajne magnetne izdelujemo po postopku prahaste metalurgije: (glavna komponenta je oksid Fe_2O_3 .)

Osnovna sestava je običajno zapisana v obliki $X.Fe_{12}O_{19}$, kjer sta X običajno barij (Ba) ali stroncij (Sr). Funkcija X ionov je povezava sestavnih elementov v heksagonalno kristalno strukturo.

Postopek:

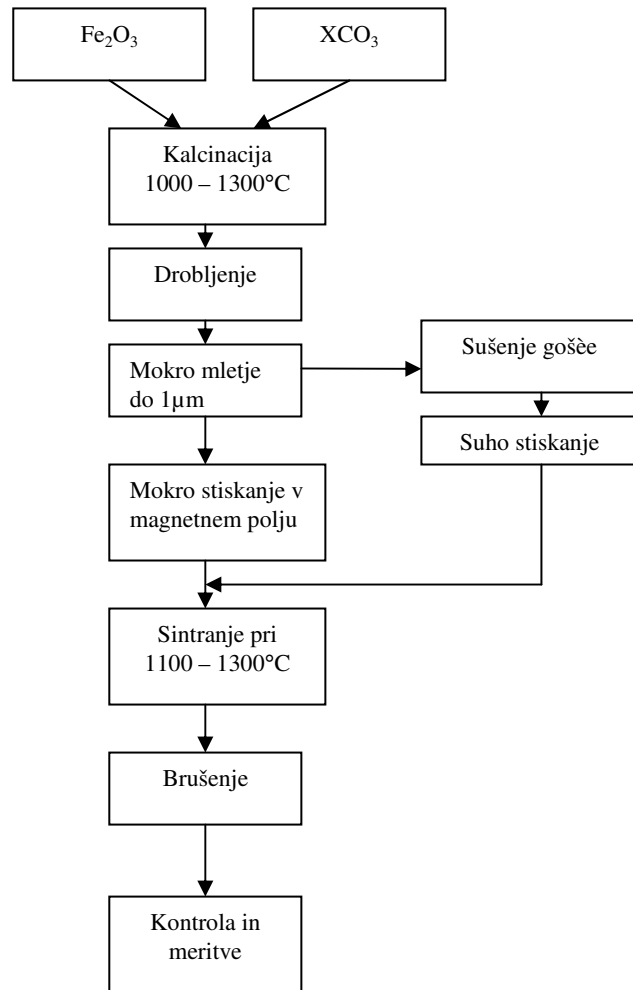
- mokro ali suho mešanje osnovne komponente Fe_2O_3 s karbonati barija ali stroncija, ki se pri temperaturi med 1000 in 1300°C povežejo med seboj.

Reakcija poteka v dveh stopnjah in ju opisujeta spodnji kemijski enačbi:



- Da bi dobili potrebno **anizotropijo**, je pomembno, da so premeri delcev okrog **enega μm** , kar je približno toliko kot merijo magnetne domene.
- Delci se v procesu oblikovanju magnetno usmerijo s pomočjo **zunanjega magnetnega polja**, ki ga proizvaja magnetilna naprava, ki je vgrajena v orodje za oblikovanje. Velikost delcev zagotavljamo v fazi mletja.
- Iz tako pridobljenega granulata oblikujemo surova magnetna jedra, ki jih v postopku **sintranja** pri temperaturi med 1100 in 1300°C termično obdelamo. Jedra se pri tem skrčijo za okoli 15%.
- Sintrane magnetne po potrebi še dodatno mehansko obdelamo. Postopek obdelave je običajno brušenje z diamantnimi brusi.

Shematski potek tehnološkega postopka izdelave keramičnih magnetov



AlNiCo magneti

Za AlNiCo magnete je značilno:

- visoka vrednost remanenčne gostote magnetnega polja B_r
- visoka temperatura uporabe
- nizka temperaturna odvisnost.

Najpogosteje se uporabljajo v magnetnih senzorjih, magnetnih stikalih, zvočnikih ter mikro-motorjih.

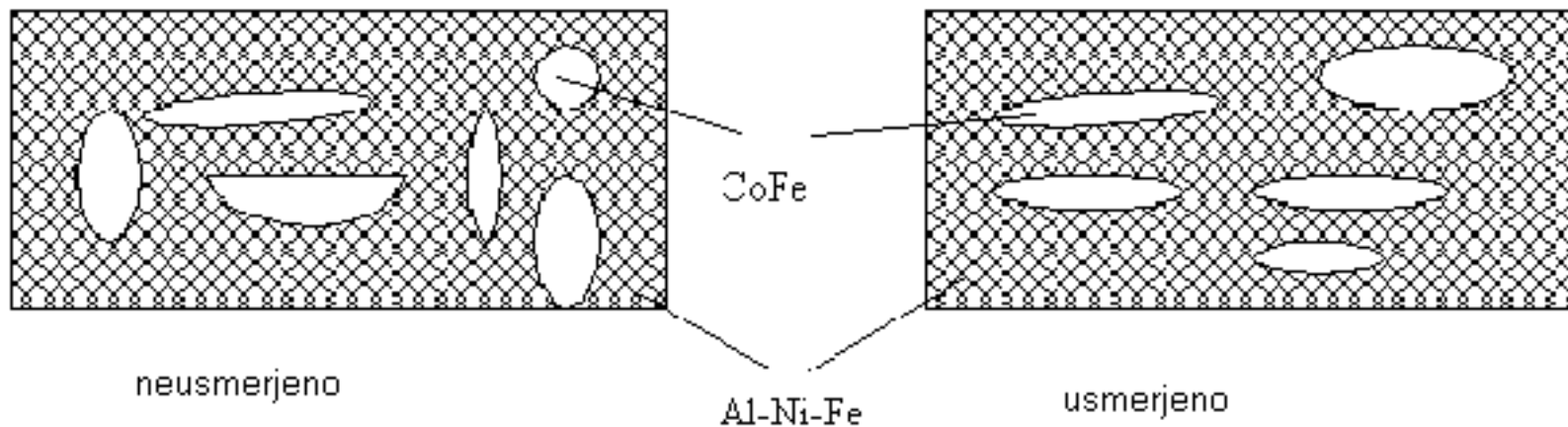
Liti AlNiCo magneti

Na magnetne lastnosti najbolj vpliva razmerje med posameznimi komponentami.

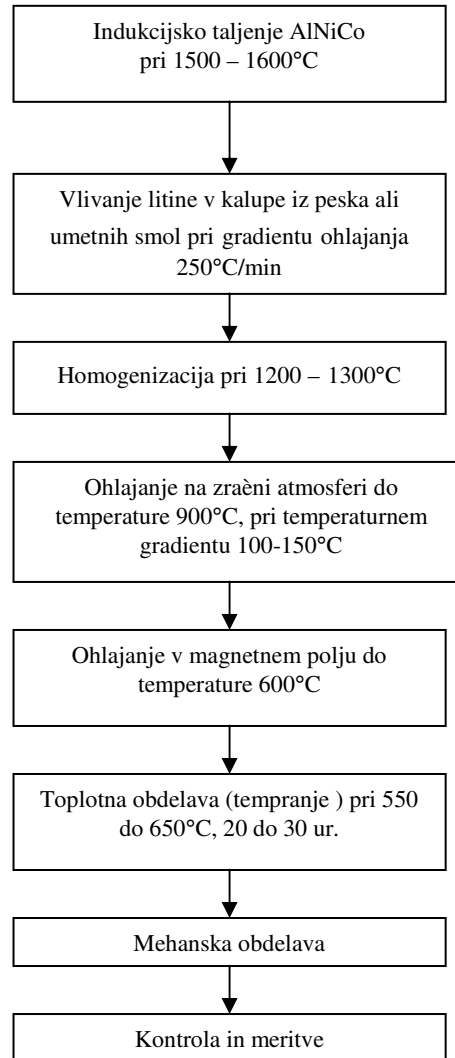
Tako na primer kobalt izboljšuje anizotropijo.

Za mikrostrukturo AlNiCo magnetov so značilni elipsasti delci Co-Fe, ki izkazujejo visoko stopnjo magnetne anizotropije,

Velikost elipsastih CoFe delcev je $40 \times 8 \times 8$ nm, z razmikom med delci okrog 20 nm.



Postopek izdelave AlNiCo magnetov



Prahasta tehnologija AlNiCo magnetov

Za oblikovanje manjših AlNiCo magnetov je primernejša prahasta tehnologija.

V tem primeru osnovne sestavine suho zmešamo in potem stisnemo v želeno obliko.

Pri sintranju se oblikovanci skrčijo za okrog 15%.

V primerjavi z litimi magneti imajo sintrani izdelki nekoliko nižjo gostoto, vendar so mehansko močnejši.

Magnetni materiali na osnovi elementov redkih zemelj

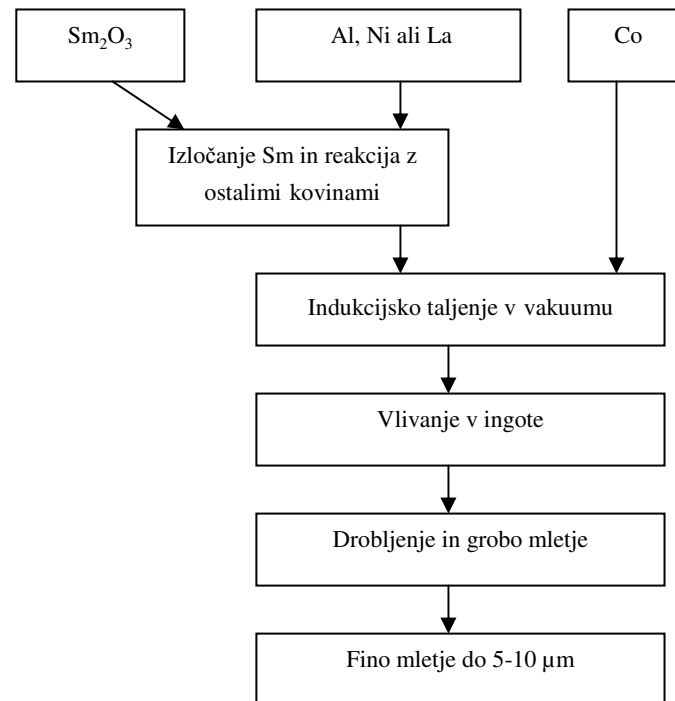
Skupino redkih zemelj tvorijo elementi z atomskimi števili od 58 do 71.

Običajne spojine, ki se uporabljajo v magnetnih materialih, so v oblikah RCo_5 , R_2Co_{17} , R_2Co_7 , R_5Co_{19} ali RCo_3

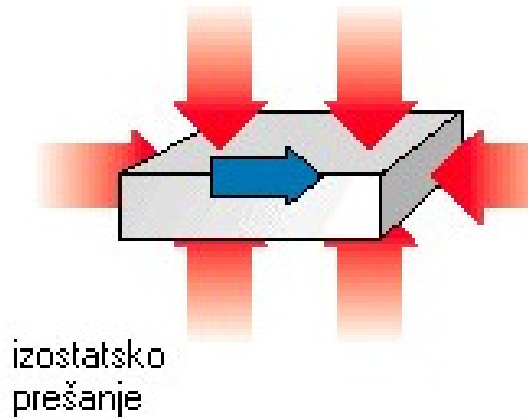
R je lahko kateri od elementov skupine redkih zemelj (lantan (La), cerij (Ce), prazeodij (Pr), samarij (Sm), neodim (Nd) ali itrij (Y)).

SmCo magneti

Proces priprave SmCo granulata:



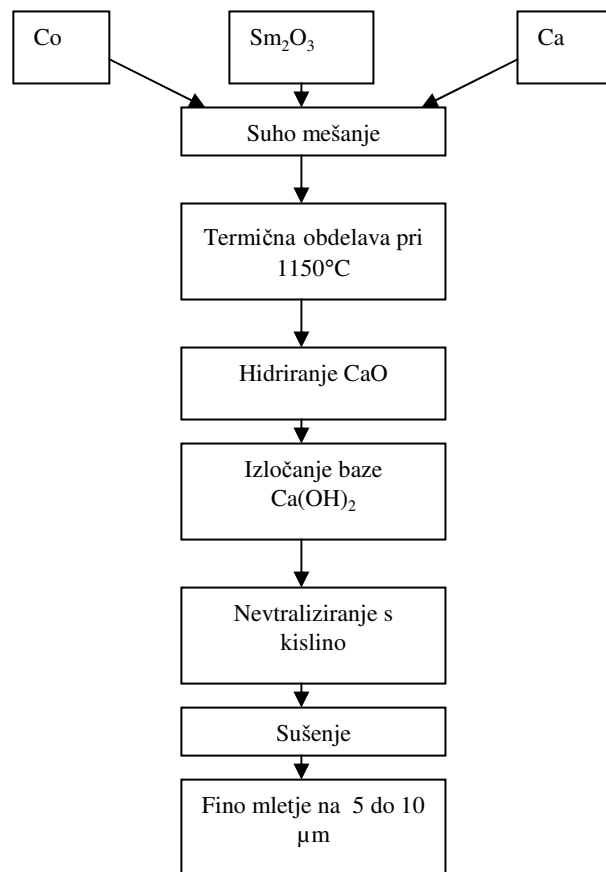
Pripravljeni granulati se nato obdelujejo po klasični prahasti tehnologiji.



Sintranje poteka pri 1100°C.

Za izboljšanje magnetnih lastnosti in za zmanjšanje temperaturne odvisnosti se izvaja tudi temperaturna stabilizacija magnetnih jeder pri temperaturi okrog 900°C.

Redukcijsko-talilni postopek za izdelavo granulata



NdFeB magneti

NdFeB magnetni materiali imajo najvišji energijski produkt

Zlitina s sestavo $R_2Fe_{14}B$ in tetragonalno kristalno zgradbo ima zelo močno magneto-kristalno anizotropijo (Leto 1980)

Curie-jeva temperatura je pri teh zlitinah za 200 do 300°C višja kot pri zlitinah R_2Fe_{17} .

$R_2Fe_{14}B$ ima najvišjo magnetizacijo nasičenja M_s neodima (Nd) je v naravi bistveno več kot samarija (Sm).

Priprava granulata lahko poteka po že omenjenem **redukcijsko-talilnem postopku**, ki ga v zadnjem času vedno bolj nadomešča postopek **rotacijskega taljenja (melt spinning)** ali **hitrega ohlajanja (rapid quenching)**.

Pri slednjem tekočo litino $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ v zaščitni atmosferi (Ar – argon) skozi šobo majhnega premera vodimo na površino vodno hlajenega kovinskega valja. Pri tem dobimo tanek trak.

S hitrostjo ohlajanja traku in s količino dovajane litine na valj vplivamo na magnetne lastnosti materiala. Trak, ki je običajno širok od 1 do 3 mm ter debel okrog $35\ \mu\text{m}$, zmeljemo v granule, ki so paličaste oblike.

S postopkom vročega stiskanja granulata se poveča magnetna usmerjenost posameznih delcev. Tako lahko bistveno povečamo energijski produkt, ki doseže tudi do $30\ \text{kJ/m}^3$.

Vezani magneti

Magnetni delci so medsebojno povezani z različnimi vezivi kot so smole, plastični materiali, guma in podobno.

Najpogostejši metodi oblikovanja t.i. vezanih (ang. bonded) magnetov sta ekstrudiranje in brizganje.

Višji odstotek veziva vpliva na nižjo vsebnost magnetnega materiala v magnetnem jedru.

	Klasično stiskanje	Brizganje	Ekstruzija
Nazivna vsebnost magnetnega materiala	80%	60%	55%
Optimalna vsebnost magnetnega materiala	85%	65%	60%

Vsebnost magnetnega materiala pri vezanih magnetih

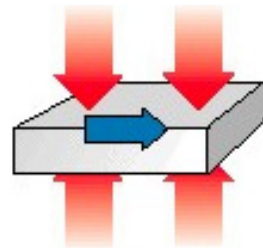
V praksi se je izkazalo, da vrednost energijskega produkta BH pada s kvadratom vsebnosti magnetnega materiala v vezanih magnetih.

Največ se uporabljajo vezani keramični magneti.

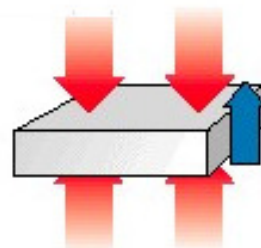
Sintrano spojino $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ je treba zmleti do velikosti delcev okrog $1\ \mu\text{m}$, ki se jim doda vezivo. Mešanico nato poljubno oblikujemo.

Na magnetne lastnosti izdelkov lahko vplivamo poleg procesa priprave granulata tudi v fazi stiskanja in magnetenja.

Oblikovanje magnetnih izdelkov lahko poteka v magnetnem polju:



prečno stiskanje in
vzdolžno magnetenje



prečno stiskanje in
magnetenje