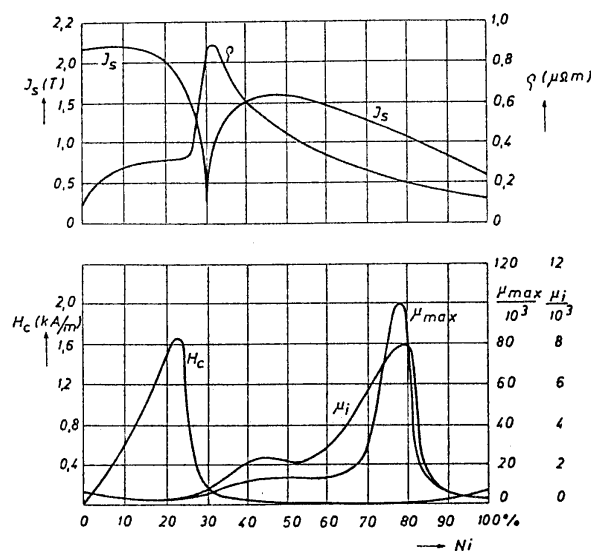


## 5.11.3 Zlitine FeNi

Te zlitine vsebujejo kot glavni legirni element železa nikelj, ostali elementi so dodani v manjših količinah. Danes veljajo za najmehkejše magnetne materiale z visokimi začetnimi in maksimalnimi permeabilnostmi in majhnimi koercitivnostmi. Omogočajo izdelavo materialov s pravokotnimi (Z), ozkimi (F) in okroglimi (R) histereznimi zankami. Lastnosti zlitine so v prvi vrsti odvisne od sestave zlitine (Slika 5.55).



Slika 5.55 Lastnosti Fe-Ni zlitin

Dokončne lastnosti so rezultat tehnološke obdelave, predvsem termičnih postopkov. FeNi zlitine tvorijo v področju od 20 do 100 % Ni homogene, ploskovno centrirane zmesne kristale.

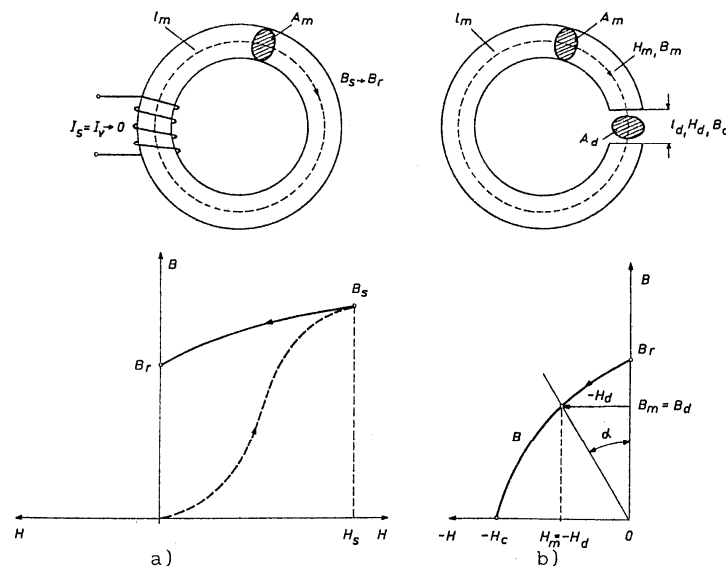
Zlitine FeNi (72-83%) imajo najvišje začetne permeabilnosti  $\mu_i$  in najmanjše  $H_c$ . Najbolj razširjen je t.i. mumetall (Ni75Fe18Cu5Cr2) z  $\mu_4 = 50000$ ,  $H_c = 1,2$  A/m,  $\mu_{maks} = 100000$  in  $B_s = 0,78$  T. Največjo začetno permeabilnost  $\mu_4 = 200000$  ima zlitina supermalloy.

Zlitine FeNi (54-68%) imajo kompromisne lastnosti. Tako lahko dobimo zelo široko paleto histereznih zank Z in F ter z najvišjimi gostotami magnetnega pretoka  $B_s$ .

Zliti nam FeNi (45-50%) se zelo spreminjajo lastnosti pod vplivom hladnega preoblikovanja in termičnih postopkov, s čimer lahko dobimo pri isti sestavi materiala zelo različne kristalne strukture in s tem širok izbor lastnosti. Zlitine FeNi (35-40%) so znane predvsem po relativno majhnih začetnih permeabilnosti in tudi po majhnih prirastkih permeabilnosti pri vzbujanju z zunanjim magnetnim poljem. Zlitine FeNi 30% imajo Curiejeve temperature  $T_c$  zelo nizke, med 30°C in 120°C, njihova  $B$ - $T$  karakteristika pa je linearna.

### 5.13 Trdomagnetni materiali

Trdomagnetni materiali s svojo notranjo magnetno energijo vzdržujejo magnetno potencialno polje v zračni reži. To notranjo magnetno energijo dovedemo magnetu pri magnetenju do nasičenja  $J_s$  oz.  $B_s$  (Slika 5.56).



Slika 5.56 Magnetne razmere v zaprtem (a) in v odprtem (b) magnetnem krogu.

Ko zunanje magnetilno polje umaknemo, vsebuje magnet remanenčno vrednost  $J_r$  oziroma  $B_r$ , če magnet nima nobene zračne reže. Takšne razmere vidimo na sliki 5.56a. Trajni magneti imajo smisel le, če jih odpremo oz. če napravimo zračno režo (Slika 5.56b). S tem posegom se poveča magnetna upornost medtem ko se pri istem magnetenju zmanjša gostota magnetnega pretoka v jedru. ( $B_d < B_r$ ). Če zanemarimo stresanje v zračni reži, je gostota  $B_d$  tista, ki jo mi izkoristimo in jo zato imenujemo delovna. V zračni reži so odvisnosti  $B$  in  $H$  linearne, zato lahko premici, ki povezuje  $B_d$  in izvor koordinatnega sistema pravimo tudi delovna premica magnetnega sistema. Polju  $H_d$  pravimo razmagnetilna (demagnetilna) poljska jakost ali lastno razmagnetenje, ker nam pove, kolikšno je razmagnetenje zaradi zračne reže oz. oblike magnetu. Čim večja je zračna reža, tem večje je razmagnetenje in premica dobiva vse večji kot  $\alpha$ ; največje razmagnetenje bi dosegli, če bi obroč povsem raztegnili v palico.

Razmagnetenje lahko opazujemo na dva načina:

- s pomočjo faktorja razmagnetjenja  $k_{dem} = -\frac{H_m}{M}$ , kjer je  $M$  magnetenje magnetu,  $k_{dem}$  pa lahko dosega le vrednosti  $k_{dem} < 1$ ,

- s pomočjo koeficienta permeance  $\text{ctg} \alpha = \frac{B_m}{\mu_0 \cdot H_m}$ , ki je definiran z naklonskim kotom delovne premice.

Če je presek magneta enak preseku zračne reže, lahko pišemo  $B_d = B_m$  in  $H_d = H_m$ , sicer moramo paziti na indekse. Če je magnet narejen v obliki tankega obroča, ali na način, da ima majhno zračno režo, kjer lahko stresanje zanemarimo, določimo delovno točko magnetne s pomočjo geometrije:

$$\text{ctg} \alpha = \frac{A_d \cdot l_m}{A_m \cdot l_d} \mu_0 \quad (5.84)$$

kjer so  $A_d$  in  $A_m$  presek zračne reže oz. magneta,  $l_d$  in  $l_m$  pa dolžina zračne reže oz. magneta. V tem primeru je delovna premica odvisna od geometrije magnetnega kroga.

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

$$W_d = B_m \cdot H_m \left( \frac{\text{J}}{\text{m}^3} = \frac{\text{Ws}}{\text{m}^3} \right) \quad (5.85)$$

To je torej prostorska gostota energije, ki jo ustvarja magnet v zračni reži. Če točke  $W_d$  med seboj povežemo, in prikažemo v odvisnosti od  $B$  (Slika 5.57), vidimo, da bo v neki točki A ta produkt največji – v točki A lahko odda magnet zračni reži največjo možno magnetno potencialno energijo –  $BH_{maks} = B_a \cdot H_a$ . Ta vrednost spada med osnovne podatke nekega magneta. Čim večji je  $BH_{maks}$  pri nekem magnetu, toliko manjši je lahko njegov volumen za opravljanje iste funkcije. Ker je mogoče na osnovi enačbe  $\oint_c Hdl = \sum I$  pri stanju  $I = 0$  zapisati, da je

$$H_m \cdot l_m - H_d \cdot l_d = 0, \quad (5.86)$$

kjer sta  $H_m$  in  $H_d$  magnetni poljski jakosti v magnetu in v zračni reži in če vzamemo, da je magnetni pretok konstanten, velja

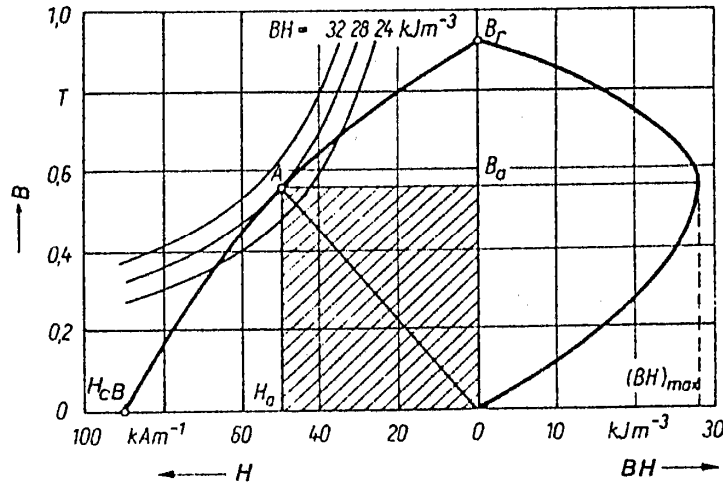
$$B_m \cdot H_m = B_d \cdot A_d = \Phi, \quad (5.87)$$

če smo stresanje magnetnega pretoka zanemarili.

Z množenjem enačb (5.86) in (5.87) dobimo volumen magneta, če vstavimo  $H_d = B_d/\mu_0$ :

$$V_m = \frac{B_d^2}{B_m \cdot H_m \cdot \mu_0} V_d, \quad (5.88)$$

kjer je  $V_d$  volumen zračne reže. Tem večji je zmnožek  $B_m \cdot H_m$ , tem manjši je potrebni volumen magneta pri isti gostoti magnetnega polja v zračni reži. Zato bomo težili delovno točko namestiti vedno na tisti del razmagnetilne krivulje, kjer je energijski produkt največji, torej  $B_m \rightarrow B_a$  in  $H_m \rightarrow H_a$ .



Slika 5.57 Razmagnetilna krivulja in energijski produkt (za AlNiCo magnet).

Čeprav so lastnosti, ki naj bi jih imel trajni magnet, zelo odvisne od konstrukcijske rešitve v magnetnem krogu, jih lahko strnemo v naslednjih točkah:

1. **Trajni magnet naj ima čim večji maksimalni energijski produkt**, s čimer je omogočena miniaturizacija (Enačba 5.88). Da bi to pojasnili, pogledjmo nek preprost magnetni krog na sliki 5.58. Trdi magnet 1, ki ga prikazuje šrafirano področje in ki 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  $V_d$ . Magnetni pretok vodimo od magneta v zračno režo po mehkomagnetnih polih, za katere zanemarimo padec magnetne napetosti. Torej ustvari trajni magnet 1 naslednje razmere:

$$H_{m1} \cdot l_{m1} = H_d \cdot l_d \quad \text{in} \quad (5.89)$$

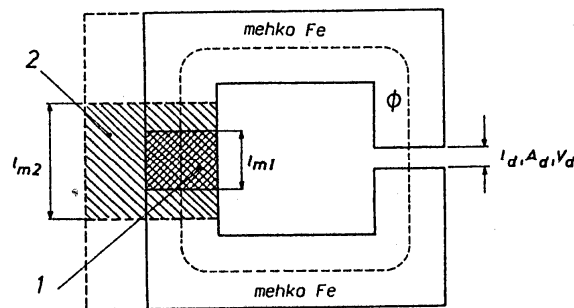
$$B_{m1} \cdot A_{m1} = B_d \cdot A_d = \Phi \quad (5.90)$$

Če želimo zdaj zamenjati ta magnet s takšnim, ki bi imel slabši energijski produkt  $B_{m2} \cdot H_{m2} < B_{m1} \cdot H_{m1}$ , bi moral biti ta, v skladu z enačbo 5.88 ustrezno večji. Torej mora biti

$$H_{m2} \cdot l_{m2} = H_d \cdot l_d \quad \text{in} \quad (5.91)$$

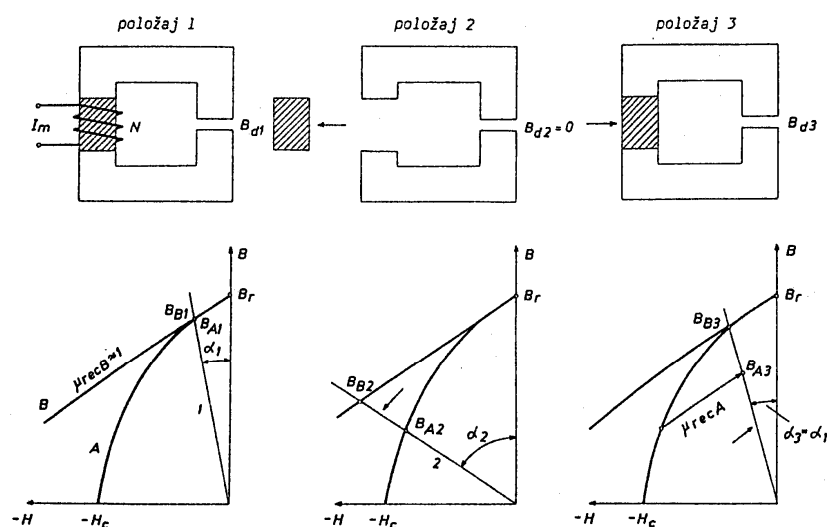
$$B_{m2} \cdot A_{m2} = B_d \cdot A_d = \Phi. \quad (5.92)$$

To povzroči pri  $H_{m2} < H_{m1}$  ustrezno podaljšanje magneta, torej  $l_{m2} > l_{m1}$  in zaradi  $B_{m2} < B_{m1}$  povečanje preseka magneta  $A_{m2} > A_{m1}$ , ker je  $V_m = A_m \cdot l_m$ . Drugi magnet je torej večji, glej črtkano vrisan magnetni krog na sliki 5.58 ( $V_{m2} > V_{m1}$ ). Seveda postopamo pri izbiri boljšega magneta obratno. Torej je vrisani magnet kar se da kratek, če je  $H_m$  (oziroma  $H_c$ ) tem večji in ima tem manjši presek čim večji je  $B_m$  oziroma  $B_r$ .



Slika 5.58 Magnetni krog s trajnim magnetom.

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 smo pravkar opisali v zvezi z ugotovitvijo delovne premice. Pri nekaterih magnetnih krogih in nekaterih magnetnih materialih lahko nastopijo določene težave. S slike 5.59 bomo skušali razložiti obnašanje dveh materialov pri istem problemu. Imamo magnetni krog po sliki 5.58, iz katerega izvlečemo najprej magnet A nato magnet B in potem oba vrnemo v prvotni položaj.



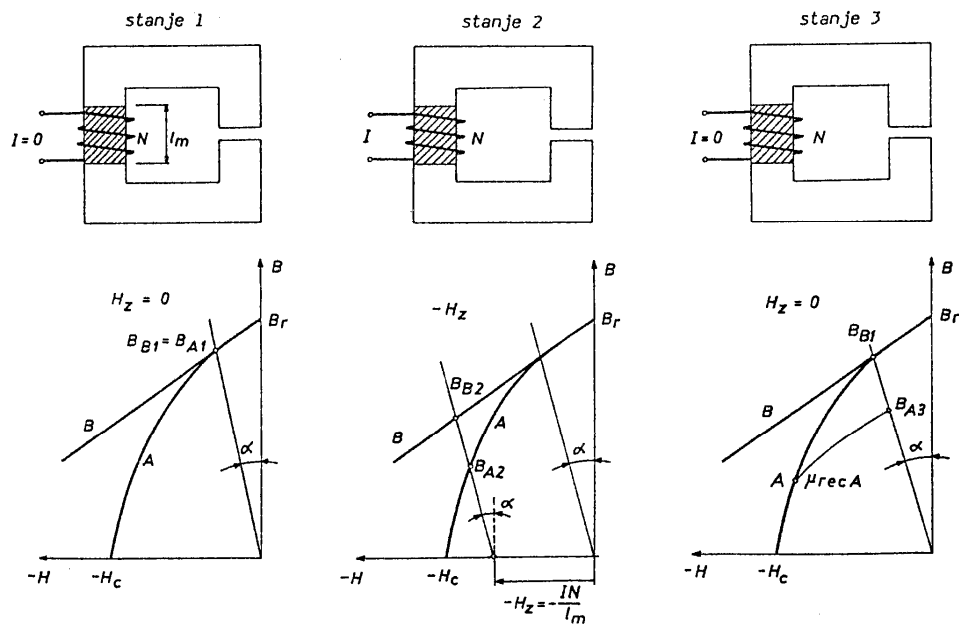
Slika 5.59 Lastno razmagnetenje zaradi spremembe reluktance magneta.

Magneta A in B naj imata enako vrednost  $B_r$ . V položaju 1 smo oba magneta namagnetili do nasičenja s pomočjo toka  $I_m$  in navitja N. Po magnetenju ( $I_m = 0$ ) imata obe zračni reži enako magnetno vsebino, ustrezno nagibu delovne premice, torej je  $B_{A1} = B_{B1}$ , saj sta v tem področju obe razmagnetilni krivulji še enaki. V položaju 2 smo magnet potegnili iz magnetnega kroga, s čimer se je magnetna upornost magneta in s tem lastno razmagnetenje močno povečalo, vendar za vsak magnet po njegovi razmagnetilni krivulji – izoblikujejo se v delovne točke, kot kaže slika 5.59. Ko potisnemo magneta nazaj v magnetni krog, se material A ustrezno permanentni permeabilnosti  $\mu_{recA}$  pojavi v točki  $B_{A3}$ , medtem ko se pri magnetu B pojavi tudi po montaži enaka delovna točka  $B_{B3} = B_{B2}$ . S premikom točk  $B_{A1} \rightarrow B_{A2}$  in  $B_{A2} \rightarrow B_{A3}$  se je izvršilo nepovratno (ireverzibilno) razmagnetenje. Iz zgornje razlage je mogoče ugotoviti, da je iz oblike razmagnetilne krivulje možno ugotoviti občutljivost na lastno razmagnetenje, tako da moramo biti pri montažah in demontažah magnetnih krogov ustrezno previdni. Magnetni krog je možno popraviti s poznejšim magnetenjem v magnetnem krogu. Nevarnost lastnega razmagnetjenja je pri istem magnetu toliko večja, kolikor je njegova površina  $A_m$  večja v primerjavi z njegovo dolžino  $l_m$ .

Kovinske zlitine kažejo tipične krivulje tipa A, medtem ko trdomagnetni feriti, zlitine redke zemlje – Co oziroma NdFeB kažejo B tip karakteristike.

Ko magnet izpostavimo zunanjemu polju, je njegovo obnašanje odvisno prav od oblike razmagnetilne krivulje – gl. sl. 5.60. Tuje polje opazujemo s tokom tuljave, ki je navita preko magneta, in povzroči poljsko jakost  $H_2 = NI/l_m$ . To polje povzroči premik delovnih točk  $B_{A1}$  in  $B_{B1}$  v točki  $B_{A2}$  in  $B_{B2}$  po razmagnetilnih krivuljah. Po prenehanju zunanjega polja se magnet A znajde v delovni točki  $B_{A3}$ , kar pomeni, da smo magnet A razmagnetili, delovna točka magneta B pa se povrne v prvotno delovno točko.

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



Slika 5.60 Razmagnetenje z zunanjim magnetnim poljem.

To lahko popravimo, vendar le s ponovnim magnetenjem do  $B_s$ . Slika 5.60 kaže, da je na tuja magnetna polja bolj odporen tisti magnet, ki ima linearno razmagnetilno krivuljo in tem večji  $H_c$  ter s tem bolj oddaljeno koleno razmagnetilne krivulje. Popolno razmagnetenje magneta dosežemo šele v točki  $-H_c$ .

Težave v zvezi z razmagnetenjem zaradi tujega magnetnega polja nastopajo pri električnih strojih redno pri pojavu reakcije armature zaradi obremenilnega toka. Čim večji je ta tok, toliko večje je zunanje magnetno polje  $H_z$ . Da preprečimo razmagnetenje, moramo omejiti obremenilni tok. To nam omejuje možnost preobremenitve oz. dinamike obratovanja, ali pa moramo izbrati magnete z večjim  $H_c$  (bolj oddaljeno koleno razmagnetilne krivulje), ali povečati  $l_m$ , s čimer zmanjšamo  $H_z$  ali uporabiti posebne konstrukcijske prijeme (polovi čevlji, dvojni magneti, ipd.).

- Magneti naj imajo čim večjo  $B_r$ .** To nam olajša načrtovanje naprave, ker želimo v zračnih režah čim večjo gostoto magnetnega pretoka  $B_d$ . 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

$$B_d = B_m \frac{A_m}{A_d} \quad (5.93)$$

pri konstantnem magnetnem pretoku.

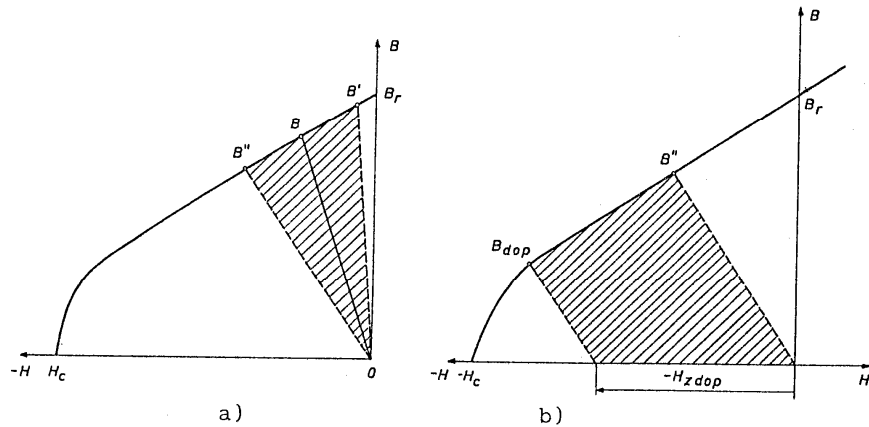
4. **Magneti naj bodo termično čim bolj stabilni.** Tu moramo opazovati dva pojava. Eden je Curiejeva temperatura  $T_c$ . Čeprav izgubi magnet vse svoje magnetne lastnosti šele v točki  $T_c$ , se njegova termična stabilnost zelo hitro spreminja že mnogo prej, tako da je temperatura uporabe  $T_u < T_c$ . Na splošno veljajo za bolj stabilne tisti magneti, ki imajo zelo visoke  $T_c$ . Te lastnosti so posebej pomembne pri tistih napravah, ki obratujejo pri višjih temperaturah ali tam, kjer naj polje ne bi bilo odvisno od temperature (merilni instrumenti).
5. Poleg omenjenih lastnosti želimo pri magnetnih materialih še nekaj dodatnih lastnosti, kot so korozijska obstojnost, tehnološke sposobnosti, obstojnost na mehanske napetosti in udarce, nizka cena ipd. Kadar deluje trajni magnet v izmeničnih poljih, je pomembno, kolikšna je njegova električna upornost. V masivnih trajnih magnetih, ki so izpostavljeni izmeničnim magnetnim poljem, se lahko inducirajo vrtilni tokovi, ki ne le slabšajo izkoristek naprave ampak jo tudi po nepotrebnem segrevajo. Če obstoji kakšna nevarnost, moramo izvajati enake ukrepe kot pri mehkomagnetnih materialih; električno upornost povečamo z vezanjem magnetnega prahu s plastičnimi smolami, s sintranjem prahu, z lameliranjem ipd.

Glede na način delovanja magneta v magnetnem krogu ločimo med naslednjimi sistemi:

- Statični magnetni sistemi so tisti, ki delujejo v pogojih šibkih razmagnetenj; zračne reže so majhne in tuja polja so šibka. Takšne razmere nastopajo v sistemih zvočnikov ali merilnih instrumentov. Pri takih krogih težimo vedno za tem, da bi bila delovna točka magneta čim bližje  $(BH)_{maks}$ ; vanje vgrajujemo načeloma ti. »visokoremanentne magnetne«, ki imajo visoke  $B_r$ , medtem ko so  $H_c$  majhne. V to vrsto spadajo danes že kar klasične zlitine AlNiCo.
- Dinamični magnetni sistemi s trajnimi magneti so tisti sistemi, ki dopuščajo velika zunanja magnetna polja ali večje spremembe magnetne upornosti. Pritezni magneti imajo povsem odprte, drugič pa povsem zaprte zračne reže, električnemu stroju se močno spreminja reluktanca v odvisnosti od lege rotorja ipd. (Slika 5.61a). Ti magnetni krogi so lahko izpostavljeni znatnim tujim poljem, ki jih skušajo razmagnetiti, pa tudi dodatno namagnetiti magnetni krog (Slika 5.61b). Da omogočimo normalno delovanje takšnih magnetnih krogov, moramo izbrati »visokokoercitivne« magnetne, pri katerih pa težimo, da delovno točko postavimo čim bližje točki  $B_r$ , zato da imamo tem več možnosti za reverzibilno razmagnetenje. Seveda smo s tem slabo izkoristili specifično energijo magneta, saj je delovna točka s tem

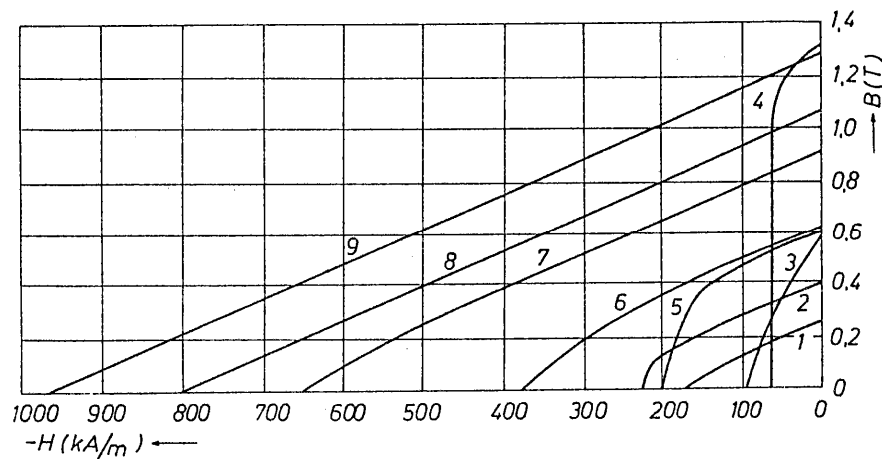


daleč od  $(BH)_{maks}$ . Med »visokokoercitivne« magnetne materiale spadajo danes predvsem trdomagnetni feriti, zlitine PtCo, zlitine redkih zemelj s Co in zlitine FeNdB.



Slika 5.61 Dinamični magnetni krog. a) Nihanje delovne točke zaradi spremembe reluktance magnetnega kroga, b) skrajna dopustna lega reverzibilnega razmagnetenja pri razmagnetenju s tujim poljem. Šrafirana področja kažejo področje reverzibilnega delovanja magneta.

Razmagnetilne krivulje tipičnih predstavnikov današnjih magnetov so predstavljene na sliki 5.62.



Slika 5.62 Razmagnetilne krivulje raznih trdomagnetnih materialov.

1 - izotropni ferit, 2 - anizotropni ferit, 3 - AlNiCo-16 izotropni, 4 - AlNiCo-56 anizotropni, 5 - MnAlC, 6 - Pt-Co, 7 - Sm-Co<sub>5</sub>, 8 - Sm<sub>2</sub>Co<sub>17</sub>, 9 - FeNdB. Magneti od 5 do 9 so anizotropni; za vse anizotropne materiale veljajo karakteristike v prednostni smeri magnetenja.

### 5.14 Klasifikacija trdomagnetnih materialov

V tabeli 5.6 so razporejeni trdomagnetni materiali po standardu IEC 404-1.

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

Tabela 5.6

### 5.15 Pregled najpomembnejših materialov za trajne magnete in njihove glavne značilnosti

Trajne magnete delimo na nekaj glavnih skupin, ki se razlikujejo po magnetnih lastnostih, po kemijski sestavi in po načinu izdelave.

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)

Tipične vrednosti za posamezno skupino trajnih magnetov so podane v Tabeli 5.7.

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

Tabela 5.7 Tipične vrednosti glavnih parametrov trajnih magnetov.

Velik razpon vrednosti za posamezni parameter je posledica dejstva, da posamezni proizvajalci znotraj ene skupine magnetnih materialov ponujajo več različic z različnimi vrednostmi. Praviloma se vrednosti za navedene parametre razlikujejo od proizvajalca do proizvajalca. Zato je smiselno obravnavati Tabelo 5.7 zgolj kot vodilo pri izbiri oziroma odločanju o vrsti magnetnega materiala.

Okvirna cenovna razmerja med gornjimi skupinami trajnih magnetov (informacija proizvajalcev Pro-Perftech Magnetics, Kitajska in Bakker Magnetics, Nizozemska, Berlin, junij 2002 ) so naslednja:

- najcenejši so keramični magneti, katerih cena se giblje med 3-7 SIT/g.
- sintrani NdFeB magneti so tri do štirikrat dražji od keramičnih magnetov,
- liti AlNiCo magneti so štiri do šestkrat dražji od keramičnih magnetov,
- najdražji so SmCo trajni magneti, katerih cena dosega desetkratno vrednost keramičnih magnetov,
- ceno plastificiranih in gumiranih magnetov je težko določiti, saj je v precejšnji meri odvisna od geometrijske zahtevnosti izdelka ter od osnovne vrste magnetnega materiala, ki nastopa v izdelku.

Cena trajnega magneta je načeloma odvisna od mehanske zahtevnosti izdelka (za nestandardne oblike so pogostokrat potrebna draga orodja za oblikovanje ali zahtevni postopki mehanske obdelave), od količine odjema ter od proizvajalca.

## 5.16 Osnovne značilnosti tehnološkega postopka izdelave trajnih magnetov

Za vsako od glavnih skupin trajnih magnetov je značilen svojstven način proizvodnje, ki v veliki meri vpliva na končne lastnosti trajnega magneta. V nadaljevanju tega poglavja so opisani tehnološki postopki izdelave pomembnejših vrst trajnih magnetov.

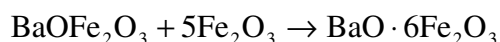
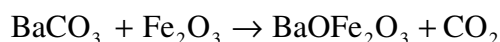
### 5.16.1 Keramični magneti

So najpogosteje uporabljeni trajni magneti. Rabimo jih za statorske segmente pri različnih vrstah enosmernih motorjev, za rotorske magnetne, pri zvočnikih, magnetnih sklopkih ter v številnih statičnih aplikacijah. Odlikuje jih tudi nizka cena v primerjavi z ostalimi vrstami trajnih magnetov.

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.

Glavne značilnosti tehnološkega procesa lahko strnemo v naslednjih točkah [2]:

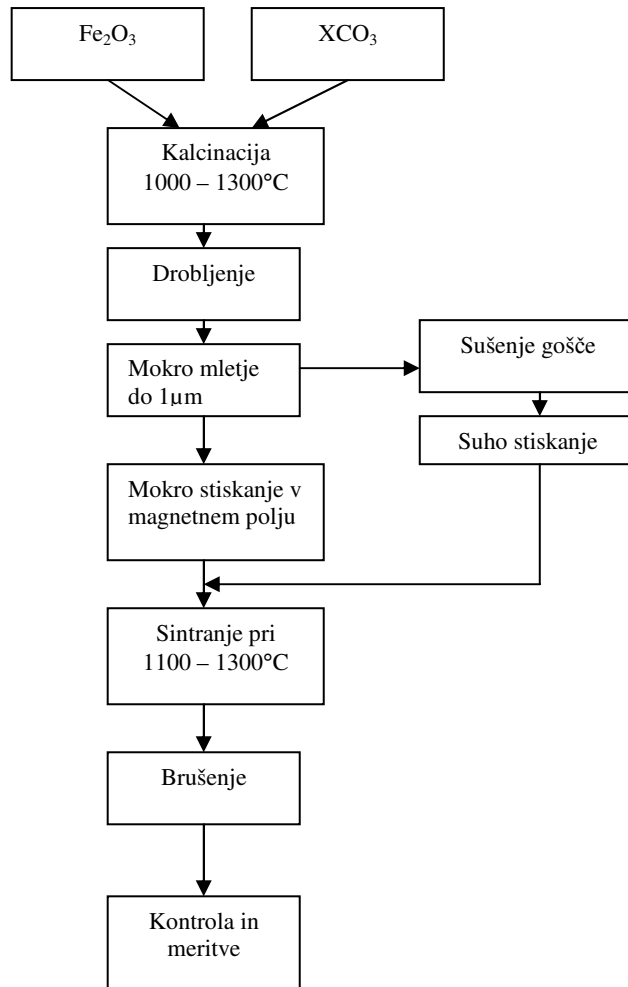
- Keramične ali feritne trajne magnetne izdelujemo po postopku prahaste metalurgije, kjer je glavna komponenta oksid  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Osnovna sestava je običajno zapisana v obliki  $\text{X.Fe}_{12}\text{O}_{19}$ , kjer sta X običajno barij (Ba) ali stroncij (Sr). Funkcija X ionov je povezava sestavnih elementov v heksagonalno kristalno strukturo.
- Za keramične magnetne je značilna heksagonalna kristalna struktura, ki izkazuje visoko stopnjo anizotropije.
- Granulat za izdelavo keramičnih magnetov dobimo z mokrim ali suhim mešanjem osnovne komponente  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  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  $\mu\text{m}$ , kar je približno toliko kot merijo magnetne domene. Delci se v procesu oblikovanju magnetno usmerijo s pomočjo zunanega 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 brusili.

Shematski potek tehnološkega postopka izdelave keramičnih magnetov kaže Slika 5.63.

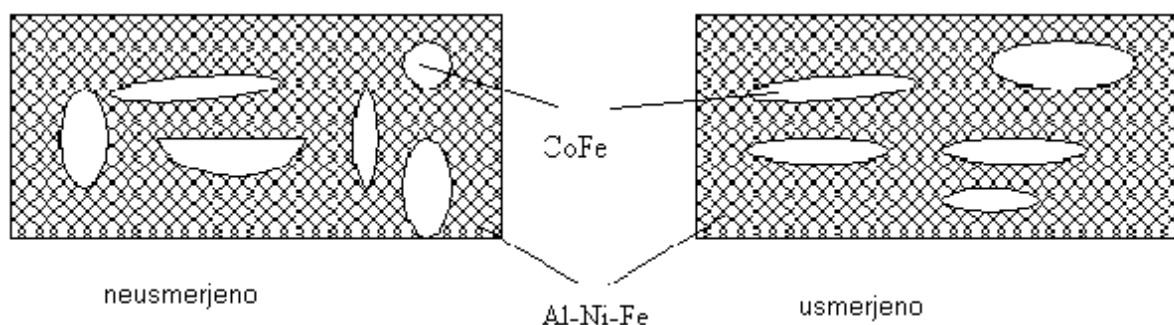


Slika 5.63 Tehnološki postopek izdelave keramičnih magnetov.

### 5.16.2 AlNiCo magneti

Za AlNiCo magnetne je značilna visoka vrednost remanentne gostote magnetnega polja  $B_r$ , visoka temperatura uporabe in nizka temperaturna odvisnost. Najpogosteje se uporabljajo v magnetnih senzorjih, magnetnih stikalih, zvočnikih ter mikro-motorjih.

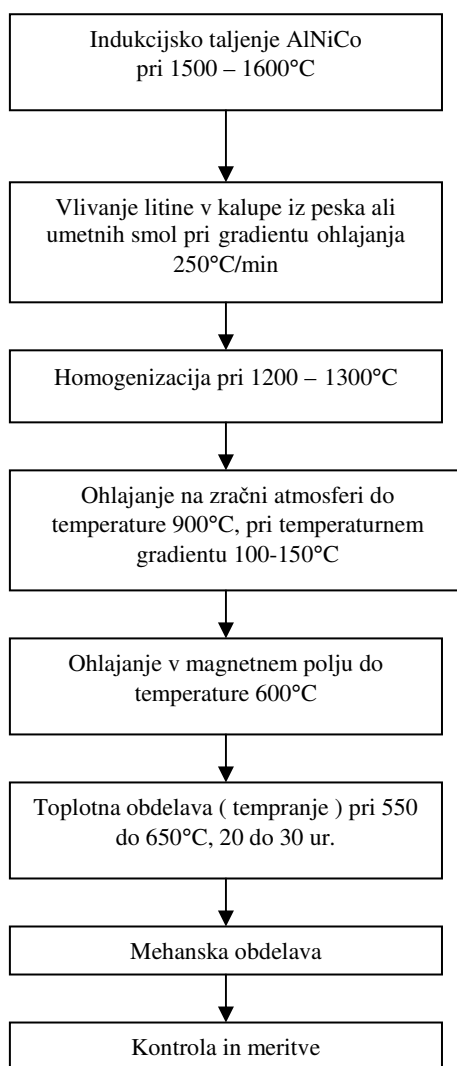
- Glavne značilnosti tehnološkega procesa izdelave AlNiCo magnetov so naslednje:
- Osnovne komponente za izdelavo magnetov so aluminij, nikelj, železo in kobalt. Najpogosteje se na trgu pojavljajo liti AlNiCo magneti.
- Na magnetne lastnosti najbolj vpliva razmerje med posameznimi komponentami. Tako na primer kobalt izboljšuje anizotropijo. Za mikrostrukturo AlNiCo magnetov so značilni elipsasti delci Co-Fe, ki izkazujejo visoko stopnjo magnetne anizotropije, kot to kaže Slika 5.64. Velikost elipsastih CoFe delcev je  $40 \times 8 \times 8$  nm, z razmikom med delci okrog 20 nm.



Slika 5.64 Mikrostruktura AlNiCo magnetov.

- Pogoj za rast elipsastih Co-Fe delcev je šibka struktura AlNiFe delcev.
- Velikost elipsastih delcev reguliramo v fazi tempranja. To je ena najpomembnejših tehnoloških faz v procesu izdelave AlNiCo magnetov, ki poteka 20 do 30 ur pri temperaturi 550 do 650°C. V fazi tempranja se namreč oblikujejo elipsasti CoFe delci, katerih oblikovna anizotropija (ang. Shape Anisotropy) je bistveno večja od magnetokristalne anizotropije (ang. Magnetocrystalline Anisotropy).
- Orientacijo dipolov dosežemo ob prisotnosti zunanega magnetnega polja, v fazi ohlajanja, ki poteka pri temperaturi med 600 do 900°C.
- Magnetne mehansko grobo obdelamo še pred fazo tempranja. Končna obdelava sledi po končanem tempranju.

Shematski potek tehnološkega postopka izdelave AlNiCo magnetov kaže Slika 5.65. **Error!**



Slika 5.65 Shematski potek tehnološkega postopka izdelave 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.

### 5.16.3 Magnetni materiali na osnovi elementov redkih zemelj

Gre za vrsto magnetnih materialov, ki so delno sestavljeni iz elementov redkih zemelj.

V želji, da bi prišli do magnetnih materialov z linearnim potekom histerezne krivulje v drugem kvadrantu, so znanstveniki v začetku 80. let začeli eksperimentirati z elementi redkih zemelj. Glede na njihove atomske lastnosti so sklepali, da bi v povezavi z ostalimi, že

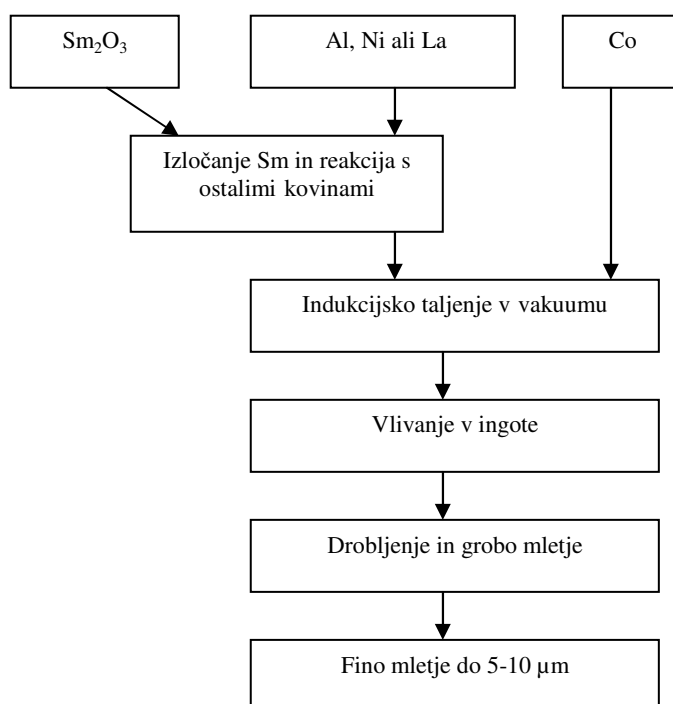
poznanimi kovinami (Fe, Ni, Co), lahko prišli do mikrostrukture z močno izraženo magneto-kristalno anizotropijo. Skupino redkih zemelj tvorijo elementi z atomskimi števili od 58 do 71. Običajne spojine, ki se uporabljajo v magnetnih materialih, so v oblikah  $\text{RCO}_5$ ,  $\text{R}_2\text{Co}_{17}$ ,  $\text{R}_2\text{Co}_7$ ,  $\text{R}_5\text{Co}_{19}$  ali  $\text{RCO}_3$ , kjer je R lahko kateri od elementov skupine redkih zemelj kot na primer lantan (La), cerij (Ce), prazeodij (Pr), samarij (Sm) ali itrij (Y).

Optimizacija magnetnih materialov gre v smeri uporabe v naravi pogostejših elementov redkih zemelj kot sta cerij in prazeodij, ali v uporabi v naravi obstoječih sestavin pod imenom »lahke redke zemlje« (Y, La, Ce, Pr oziroma Nd).

#### 5.16.4 SmCo magneti

Visoka koercitivnost, visok energijski produkt in odpornost proti koroziji so glavne lastnosti zaradi katerih se SmCo magneti čedalje pogosteje pojavljajo v vžigalnih tuljavah motorjev, magnetnih resonatorjih, mikro motorjih ter v magnetnih separatorjih. Trenutno imajo najboljše razmerje med teoretično izračunanim energijskim produktom in v praksi doseženim energijskim produktom.

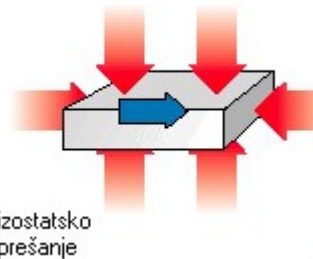
Za njihov tehnološki proces je značilen predvsem proces priprave granulata, ki ga kaže slika 5.66 V fazi mletja, ki gre v primeru keramičnih magnetov do velikosti domen, se proces ustavi pri velikosti delcev 5 do 10  $\mu\text{m}$ .



Slika 5.66 Proces priprave SmCo granulata.



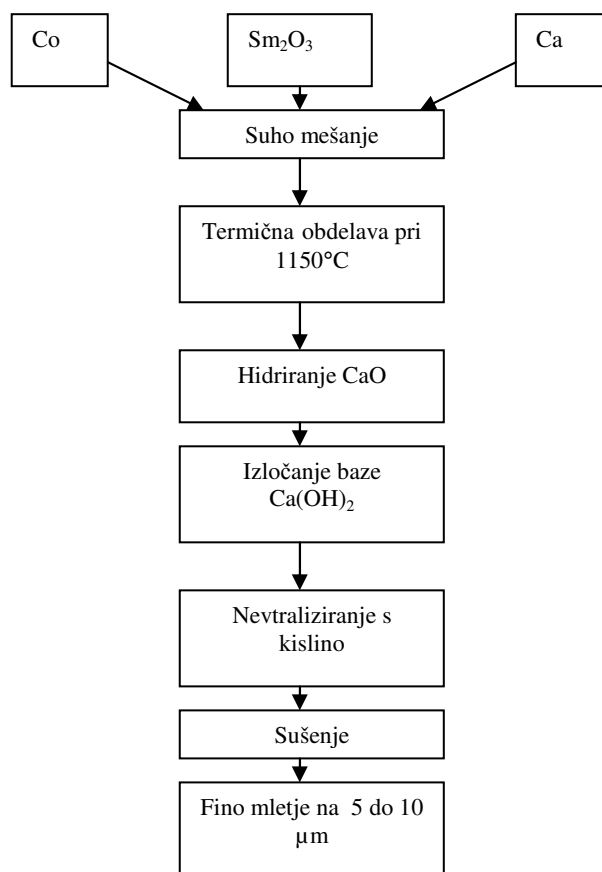
Ugotovili so namreč, da je gibljivost domen (njihova velikost je okrog  $0,002 \mu\text{m}$ ) pri SmCo magnetih boljša, če so delci večji. Pripravljeni granulati se nato obdeluje po klasični prahasti tehnologiji. Oblikovanje je lahko klasično s sintranjem v naslednji fazi ali pa izostatsko (Slika 5.67).



Slika 5.67 Prikaz izostatskega prešanja.

Sintranje poteka pri  $1100^{\circ}\text{C}$ . Za izboljšanje magnetnih lastnosti in za zmanjšanje temperaturne odvisnosti se izvaja tudi temperaturna stabilizacija magnetnih jeder pri temperaturi okrog  $900^{\circ}\text{C}$ .

V zadnjem času se za izdelavo granulata uporablja tako imenovani redukcijsko-talilni postopek, ki je ekonomsko boljši od prvotno opisanega. Potek redukcijsko-talilnega postopka priprave SmCo granulata kaže Slika 5.68. Opisani način priprave granulata se uporablja tudi pri izdelavi granulotov za NdFeB magnetne.



Slika 5.68 Redukcijsko-talilni način priprave SmCo granulata.

### 5.16.5. NdFeB magneti

Izmed vseh vrst trdomagnetnih materialov izkazujejo NdFeB magnetni materiali najvišji energijski produkt. Zaradi omejenih zalog osnovnih surovin za izdelavo SmCo magnetov je šel razvoj v smeri iskanja cenejših in magnetno boljših materialov. Tako so po letu 1980 odkrili, da izkazuje zlitina s sestavo  $R_2Fe_{14}B$  in tetragonalno kristalno zgradbo, zelo močno magneto-kristalno anizotropijo [2].

Tudi Curie-jeva temperatura je pri teh zlitinah za 200 do 300°C višja kot pri zlitinah  $R_2Fe_{17}$ . Poleg tega so ugotovili, da daje zlitina  $R_2Fe_{14}B$  najvišjo magnetizacijo nasičenja  $M_s$ . Pomembno je tudi, da je neodima (Nd) v naravi bistveno več kot samarija (Sm). V povezavi neodima z železom pa se je pocenil tudi proces izdelave granulata.

Priprava granulata je lahko 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  $Nd_2Fe_{14}B$  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  $\text{kJ/m}^3$ .

#### 5.16.6 Vezani magneti

Slaba lastnost magnetov s specifično gostoto blizu teoretični (npr. pri keramičnih magnetih) je njihova mehanska krhkost. To lahko povzroči težave pri mehanski obdelavi ali v fazi vgradnje magnetov. Zato je šel razvoj v smeri izdelave magnetnih jeder, kjer so magnetni delci medsebojno povezani z različnimi vezivi kot so smole, plastični materiali, guma in podobno. Najpogostejši metodi oblikovanja t.i. vezanih (ang. bonded) [2] magnetov sta ekstrudiranje in brizganje.

Odstotek veziva seveda vpliva na nižjo vsebnost magnetnega materiala v magnetnem jedru. Okvirna razmerja vsebnosti magnetnega materiala v primerjavi z vsebnostjo veziv ali drugih nemagnetnih materialov so prikazana v Tabeli 5.8.

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

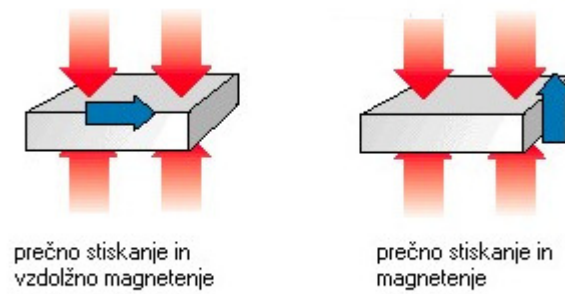
Tabela 5.8 Vsebnost magnetnega materiala pri vezanih magnetih

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 (Slika 5.69). V tem primeru se magnetni delci lažje orientirajo, kar pripomore k višjemu  $BH$  produktu. Že

oblikovane izdelke, bodisi stiskane v magnetnem polju ali nenamagnetene, lahko magnetimo še dodatno.



Slika 5.69 Oblikovanje magnetnih jeder v magnetnem polju.

V fazi brizganja lahko v gnezdo vstavimo različne dele kot na primer rotorske osi ter jih nato zapolnimo s plastificirano magnetno maso. Pri tem je treba upoštevati, da so orodja za brizganje in ostala strojna oprema, bistveno dražji od klasičnih stiskalnic in orodij za prahasto stiskanje. Pri dražjih in zahtevnejših aplikacijah pride v poštev tudi plastificiranje magnetnih materialov iz redkih zemelj.

Literatura:

- [1] Božidar Hribnik: "Materiali v elektrotehniki" (Modul: kovinski materiali), Zapiski predavanj, Univerza v Mariboru, 1997.
- [2] Božidar Hribnik: "Uvod v magnetne materiale", Univerza v Mariboru, 1991.
- [3] Richard Boll: "Soft Magnetic Materials", Vakuumschmelze GmbH, Hanau, 1977.
- [4] J., Smit, H. P. J. Wijn, "Ferrites", Philips Technical Library, Eindhoven, 1959.
- [5] P. Campbell, "Permanent Magnet Materials and their Application", Cambridge University Press, 1994.
- [6] E. Steingroever, G. Ross, "Magnetization, Demagnetisation and Calibration of Permanent Magnet Systems", Magnet-Physik, Köln, 1997.
- [7] Vladimir Bek: "Tehnologija elektromaterijala", Elektrotehnički fakultet Zagreb, 1987.
- [8] Gerhard Fasching, "Werkstoffe für die Elektrotechnik", Springer Verlag, Wien, 1984.
- [9] Manfred Kahle, "Elektrische Isoliertechnik" VEB Verlag, Berlin, 1988.
- [10] Carl H. Hamann, Andrew Hamnett, Wolf Vielstich, "Electrochemistry", Wiley-VCH, Weinheim, 1998.
- [11] Harry Conrad, Reinhold Krampitz, "Electrotechnology", VEB Verlag Technik, Berlin, 1983.
- [12] Michaeli, Greif, Wolters, Vossebürger, "Technologie der Kunststoffe", Carl Hanser Verlag München, 1998.