

5.7.2 Izgubni faktor in kvaliteta

Kvaliteto jedra opišemo z izgubnim faktorjem:

$$\operatorname{tg} \delta_j = \frac{R_j}{\omega L} = \frac{1}{2\pi} (h \cdot H + v \cdot f + n) \quad (5.69)$$

kjer smo f v enačbi 5.67 zamenjali z $2 \cdot \pi \cdot f$. Z recipročno vrednostjo $\operatorname{tg} \delta_j$ dobimo podatek o kvaliteti (dobroti) magnetnega jedra:

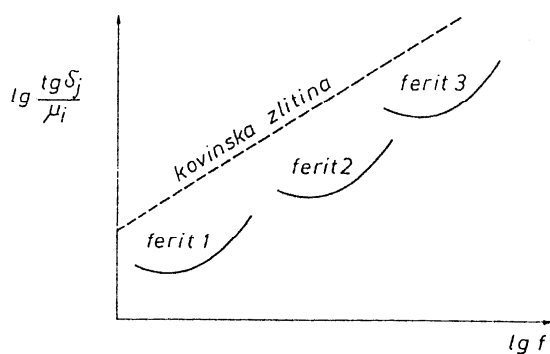
$$Q = \frac{1}{\operatorname{tg} \delta_j} = \frac{\omega L}{R_j} \quad (5.70)$$

Kvaliteta jedra je torej tem večja, čim manjša je izgubna upornost oz. izgube.

Izgubni faktor je odvisen od frekvence in od jakosti polja. Spremeni se (npr. zmanjša), če vodimo magnetni pretok nekega jedra preko zračne reže ali če režo še povečujemo. Ker se začetna permeabilnost μ_i spreminja tudi z zračno režo, dobimo s kvocientom:

$$\frac{\operatorname{tg} \delta_j}{\mu_i} = \operatorname{tg} \delta_{jr} \quad (5.71)$$

konstanto materiala, ki je neodvisna od oblike in nam omogoča medsebojno primerjavo različnih materialov. To konstanto materiala imenujemo tudi **relativni izgubni faktor**. Primer takšnih karakteristik vidimo na sliki 5.44. Če hočemo določeno kvaliteto jedra pri določeni frekvenci, moramo izbrati ustrezno vrsto ferita.



Slika 5.44 Odvisnost izgubnega faktorja od frekvence

V celotni tuljavi opisuje $\operatorname{tg} \delta_j$ jedra le en del izgubnega faktorja tuljave. Za popolno sliko izgub bi morali upoštevati še izgubni faktor navitja, ki zajema izgube v materialu navitja:

$$\operatorname{tg} \delta_c = \frac{R_c}{\omega L} \quad (5.72)$$

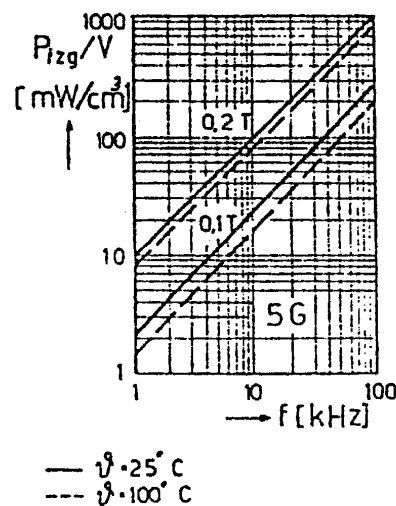
5.7.3 Specifične izgube premagnetjenja

Pod pojmom izgube med magnetenjem razumemo pretvorbo koristne elektromagnetne energije v energetskih napravah v neželeno in škodljivo toplotno energijo. Najnatančnejši postopek za določanje izgub zaradi premagnetjenja je kalorimetrični postopek, ki pa v tehniki ni običajen; praviloma uporabljamo razne vatmetrične metode.

Pri večjih gostotah magnetnega pretoka postanejo posledične izgube zanemarljivo majhne. Tako imamo opravka le še z izgubami zaradi vrtilčnih tokov in s histereznimi izgubami:

$$P_{izg} = P_v + P_h \quad (5.73)$$

Ker so izgube odvisne od frekvence, od temperature in od gostote magnetnega pretoka, moramo podatke o izgubah dopolniti s temi vrednostmi (Slika 5.45).



Slika 5.45 Specifične izgube Elvefer feritov tipa 5G

V napravah informacijske tehnike navajamo specifične izgube po enačbi 5.73 v mW/cm^3 , v energetskih napravah pa v W/kg . Za ločitev posameznih vrst izgub uporabljamo razne (običajno grafične) metode.

V energetiki nas največkrat zanimajo le skupne izgube. Tudi predpisi določajo, da se podajajo specifične izgube pri delovni frekvenci 50 Hz (60 Hz), pri gostotah magnetnega pretoka 1 T in 1,5 T in nosijo oznake P_{10} oz. P_{15} , ali še boljše $P_{10/50}$ oz. $P_{10/50}$ (ali $P_{10/60}$ oz. $P_{10/60}$).

V energetskih napravah pogosto uporabljamo magnetne pločevine. Na osnovi izkušenj izračunavamo za pločevinasta železna jedra specifične magnetne izgube s pomočjo približnih enačb:

- izgube zaradi vrtilnih tokov:

$$P_v \cong 0,26 \cdot \frac{d^2 \cdot f^2 \cdot \hat{B}^2 \cdot \lambda}{\rho} \quad \left[\frac{W}{kg} \right] \quad (5.74)$$

- histerezne izgube:

$$P_h \cong 0,004 \frac{f \cdot H_c \cdot \hat{B}}{\rho} \quad \left[\frac{W}{kg} \right] \quad (5.75)$$

kjer pomenijo:

d - debelina pločevine v cm,

f - frekvenca v Hz,

H_c - koercitivna jakost magnetnega polja,

\hat{B} - temenska gostota magnetnega pretoka v T,

λ - specifična prevodnost v S/m,

ρ - gostota v g/cm³.

Tudi za druge materiale in oblike veljajo podobne enačbe, tako da lahko na osnovi enačb 5.74 in 5.75 izvedemo nekatere splošne zaključke. Če torej želimo imeti pri določeni frekvenci in delovni točki čim manjše izgube, moramo:

- ⇒ zmanjšati specifično električno prevodnost (povečati električno upornost). Pri kovinskih materialih dosežemo to z legiranjem (Fe npr. legiramo s Si) ali z uporabo nekovinskih, keramičnih magnetnih materialov; feriti imajo npr. 10^6 do 10^{12} - krat večjo specifično upornost kot feromagnetne pločevine in imajo zanemarljive vrtilne izgube;
- ⇒ uporabiti prahasto tehnologijo. Material zdrobimo v droben prah, ki ga nato med seboj vežemo z izolacijskim materialom. S tem učinkovito zmanjšamo vrtilne tokove v prostoru in ne samo v dveh dimenzijah kot pri lameliranju;
- ⇒ lamele pločevine čim bolj stanjšati (tehnološke in ekonomske omejitve). V energetskih napravah so debeline pločevin običajno okrog 0,5 mm.
- ⇒ lamele med seboj izolirati;
- ⇒ uporabiti materiale s čim ožjo histerezno zanko;
- ⇒ vplivati na kristalno strukturo materiala.

Vsak izmed zgoraj omenjenih ukrepov predstavlja določeno podražitev. Konstruktor, ki izbira jedro, mora zato upoštevati tudi ekonomske faktorje in skupaj s tehničnimi in tehnološkimi faktorji najti optimalno rešitev.

5.7.4 Izgube v vrtilnem magnetnem polju

Magnetne izgube, o katerih smo govorili v prejšnjem poglavju, določamo v glavnem v izmeničnih poljih. Večinoma pa so materiali izpostavljeni vrtilnim magnetnim poljem. Kadar opazujemo material v vrtilnem magnetnem polju, opazimo, da se histerezne izgube obnašajo drugače kot v izmeničnih poljih. Pri nižjih gostotah magnetnega pretoka so histerezne izgube v vrtilnem magnetnem polju P_{vh} večje kot v izmeničnem, pri višjih gostotah pa manjše. Raziskave na magnetni pločevini Fe - Si s 3 % Si so pokazale, da je pri majhnih poljih razmerje $P_{vh} : P_h \cong 2 : 1$, pri gostotah nasičenja pa okrog 0,6 : 1. Pri konstruiranju npr. električnih strojev moramo te razlike upoštevati.

Ta pojav si razlagamo s tem, da je potrebno delo za premagnetenje manjše takrat, če se magnetni material vrti konstantnem polju, kot če se magneteno polje spreminja od največje vrednosti preko nič na nasprotno največjo vrednost.

5.7.5 Magnetna anizotropija

Kadar se magnetne lastnosti (npr. izgube, magnetenje, magnetostrikcija ipd.) spreminjajo v odvisnosti od smeri, govorimo, da je magnetni material anizotropen. Pogosto izzovemo anizotropijo sami z namenom, da bi magnetili v neki določeni, prednostni smeri; v drugih primerih je magnetna anizotropija neželena posledica nekega tehnološkega postopka. Anizotropija se lahko pojavi zaradi različnih vzrokov, npr. zaradi kristalne strukture, mehanske napetosti, oblike ipd. Pravimo, da je anizotropija kristalna, napetostna ipd.

Spremembo lastnosti v odvisnosti od smeri opazovanja lahko podajamo s pomočjo enačb, ki jih podajajo predpisi ali s pomočjo polarnih diagramov.

Najbolj pogosto nas zanimata anizotropija magnetenja (opazujemo μ) in izgubna anizotropija (opazujemo specifične izgube premagnetenja) v odvisnosti od smeri. Največkrat se zadovoljimo s primerjavo vzdolžne in prečne smeri. Tako izgubno anizotropijo, ki ji pravimo tudi izgubna tehnična anizotropija, kot jo določajo predpisi za pločevine, izračunamo s pomočjo enačbe:

$$A_i(\%) = \frac{P_p - P_v}{P_p + P_v} \cdot 100 \quad (5.76)$$

ali

$$A_i(\%) = \frac{P_{\max} - P_{\min}}{P_{\max} + P_{\min}} \cdot 100, \quad (5.77)$$

kjer so P_p in P_v specifične izgube premagnetenja v prečni smeri oz. vzdolžni smeri (t.j. v smeri valjanja). P_{max} in P_{min} pa so največje oz. najmanjše specifične izgube premagnetenja v neki smeri. Enačba (5.76) je v skladu s predpisi. Seveda ne smemo pozabiti povedati, pri kateri gostoti magnetnega pretoka jo določamo.

Magnetno tehnično anizotropijo pa dobimo iz enačbe:

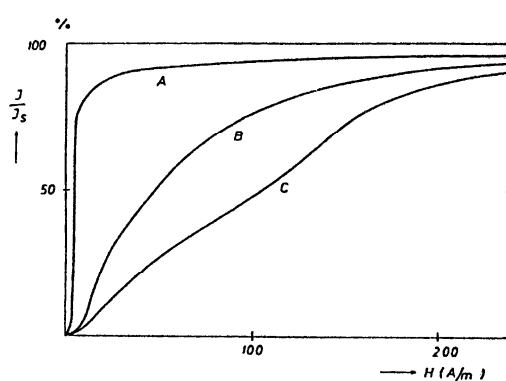
$$A_i(\%) = \frac{\mu_v - \mu_p}{\mu_v + \mu_p} \cdot 100 \quad (5.78)$$

ali

$$A_i(\%) = \frac{\mu_{max} - \mu_{min}}{\mu_{max} + \mu_{min}} \cdot 100 \quad (5.79)$$

če sta μ_v in μ_p relativna permeabilnost v vzdolžni oziroma prečni smeri, μ_{max} oz. μ_{min} pa največja oz. najmanjša relativna permeabilnost v neki smeri.

Magnetna anizotropija je največkrat zaželena. Ko jo skušamo umetno povečati, govorimo o inducirani magnetni anizotropiji. To dosežemo s hladnim preoblikovanjem kovin npr. z valjanjem - uvaljana inducirana magnetna anizotropija. Pri večini feromagnetnih zlitin povzročimo inducirano magnetno anizotropijo v eni osi, če žarimo material v magnetnem polju. Temu pojavu pravimo magnetni žarilni efekt. Mnogo večje anizotropije lahko dosežemo pri ohlajanju materiala, če je ta v točki fazne premene izpostavljen delovanju magnetnega polja. Da so razlike lahko znatne, vidimo iz slike 5.46, ki kaže vpliv ohlajevanja v magnetnem polju zlitine E1 sistema Fe - Ni z ozirom na vzdolžno smer, ki je bila predhodno pridobljena z žarjenjem.



Slika 5.46 Magnetne krivulje zlitin Fe_{12,5}Ni₈₇ (permalloy) ohlajane od 600 °C navzdol.

- magnetno polje je bilo v prednostni smeri,
- ohlajanje brez magnetnega polja.
- magnetno polje je bilo pravokotno na prednostno smer.

5.7.6 Spremenljivost magnetnih lastnosti

Magnetni materiali so mogoče bolj kot drugi podvrženi zunanjim vplivom. Na njihove lastnosti vplivajo pogosto mehanske napetosti, tuja magnetna polja, posebej pa toplota. Vplivi se kažejo pri spremembah B_r , H_c , permeabilnosti vseh vrst, izgubah ipd. V splošnem so te spremembe lahko (1) reverzibilne ali (2) ireverzibilne.

Me reverzibilne štejemo tiste, pri katerih se materialu samodejno povrnejo lastnosti, ki jih je material imel pred nastopom opazovanega zunanjega vpliva. Tipično spremembo te vrste opisuje temperaturni koeficient, ki nam pove, za kolikšno relativno vrednost se je pri določeni temperaturni spremembi spremenila neka lastnost, npr. B_r , H_c , μ ipd. V elektrotehniki je najbolj znan koeficient te vrste koeficient ohmske upornosti. Nekaj primerjav med magnetnimi in električnimi temperaturnimi spremembami lahko razberemo iz tabele 5.2.

Material	Reverzibilni koeficient [%/K]
feriti	0,2 (magnetni)
Sm - Co magneti	0,05 (magnetni)
Nd - Fe - B magneti	0,15 (magnetni)
Cu	0,39 (električni)
Al	0,41 (električni)

Tabela 5.2 Magnetni in električni temperaturni koeficienti materialov

Med ireverzibilne spremembe lastnosti štejemo tiste, pri katerih ostane sprememba še po prenehanju zunanjega vpliva. Vendar tu ločimo tri vrste sprememb:

- a) popravljive,
- b) nepopravljive in
- c) stabilizacijske.

Popravljive ireverzibilne spremembe so tiste, ki jih lahko z nekim posegom, ponovnim magnetenjem, popravimo. Če smo magnet izpostavili prevelikemu zunanjemu polju ali previsoki temperaturi, se njegovo stanje namagnetnosti delno ali močno spremeni. S ponovnim magnetenjem lahko magnetu povrnemo njegovo prvotno magnetno stanje.

Nepopravljive ireverzibilne spremembe so tiste, ki nastanejo v sami strukturi materiala (metalurške spremembe); te spremembe povzročajo dejansko trajno staranje materiala in jih ni mogoče popraviti.

Stabilizacijske ireverzibilne spremembe so tiste, ki jih mi umetno izzovemo, da bi dosegli stabilnejše obratovanje magnetov. Običajno gre za izpostavljanje povišanim temperaturam – govorimo o umetnem staranju. Dejansko staranje pa poteka še naprej.

5.8 Razdelitev magnetnih materialov

5.8.1 Razdelitev po magnetnih lastnostih

Najbolj groba in običajna je razvrstitev magnetnih materialov na magnetno mehke in na magnetno trde materiale.

Magnetno mehki materiali (mehkomagnetni) so tisti, ki jih lahko magnetimo ali premagnetimo z malo energije; karakteristično je tudi premikanje Blochovih pregrad. Koercitivne poljske jakosti so majhne, največ do $1 \cdot 10^3$ A/m, torej so histerezne zanke ozke - tudi histerezne izgube so majhne. Običajno imajo tudi visoke permeabilnosti v šibkih in srednjih poljih.

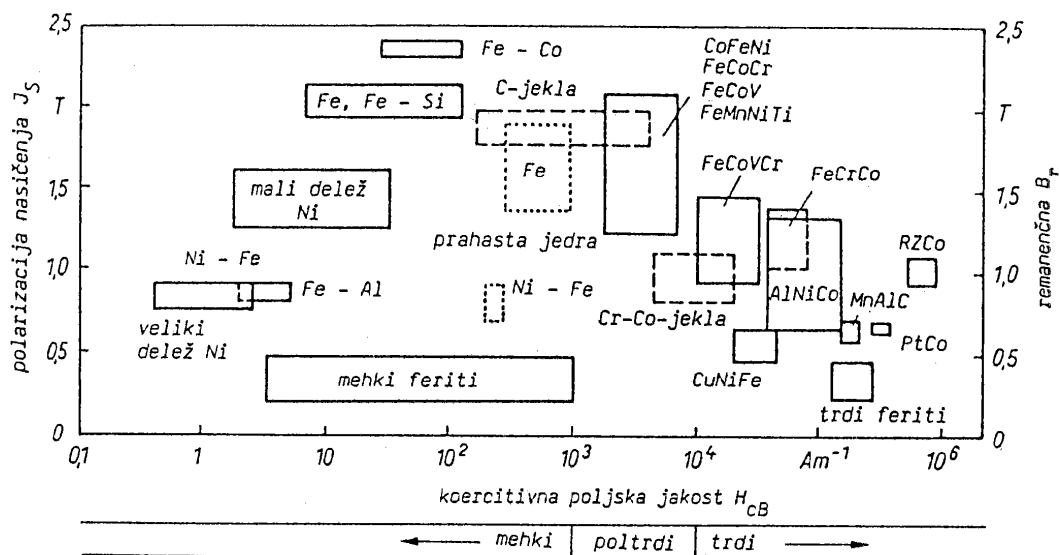
Magnetno trdi (trdomagnetni, permanentni, trajnomagnetni, večkrat kar magneti) materiali se dajo magnetiti ali premagnetiti le z veliko energije; karakteristično prevračanje Weissovih območij. Blochove pregrade se ne premikajo. Koercitivne poljske jakosti so večje od 1×10^4 A/m. Ko magnetimo trdomagnetne materiale, ostanejo namagneteni. Histerezne zanke so široke, izgube velike, zato jih le redko uporabljamo v izmeničnih poljih..

Začetno permeabilnost uporabljamo redkeje za razdelitev med mehkomagnetnimi in trdomagnetnimi materiali. Kljub temu lahko rečemo, da so vsi materiali, ki imajo $\mu_i > 100$, magnetno mehki in tisti, ki imajo $\mu_i < 10$, magnetno trdi.

Pri tem ne smemo vedno pričakovati, da bo mehkomagnetni material tudi mehansko mehki (keramični mehkomagnetni materiali so izredno trdi) in magnetno trdi material tudi mehansko trd (poznamo gume, ki imajo lastnosti trdega magnetov).

Če primerjamo koercitivne poljske jakosti mehkih in trdih magnetov med seboj, ugotovimo, da se razlikujejo med seboj tudi v velikostnem redu $1 : 10^7$. Če bi torej opazovali histerezno zanko mehkega magnetov in bi za njegov H_c vzeli merilo 1 cm, bi bila histerezna zanka trdega magnetov široka kar 100 km! Zato je primerjave mogoče opraviti le z logaritmskimi merili.

(Slika 5.47). V novejšem času se vse bolj uveljavlja skupina magnetnih materialov, ki leži med tipično mehкими in trdimi magnetnimi materiali. Pravimo jim poltrdi magnetni materiali. To so v glavnem zlitine FeCoNi, ki se uporabljajo pri gradnji zadrževalnih relejev. Grobo razdelitev magnetnih materialov z ozirom na H_c , B_r in J_s kaže slika 5.47.

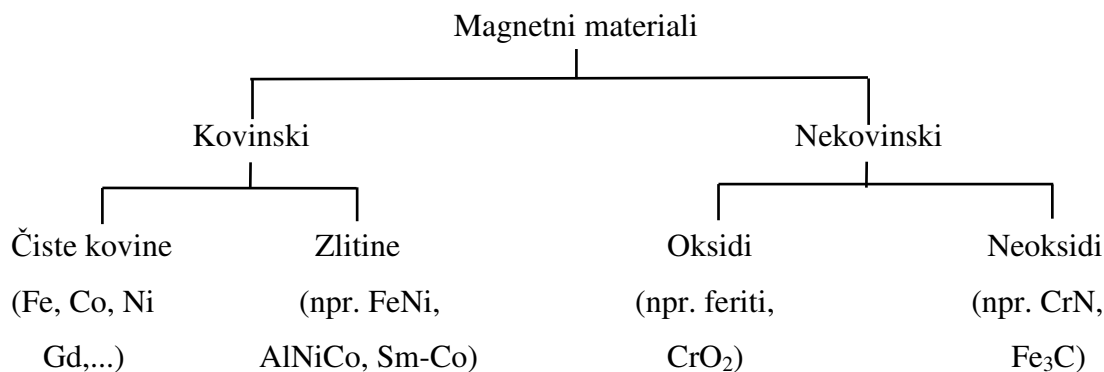


Slika 5.47 Pregled magnetnih materialov glede na H_{CB} , B_r in J_s . Za mehke magnete velja J_s za poltrde in trde pa B_r .

5.8.2 Razdelitev po vrsti materiala

Ločimo med kovinskimi in nekovinskimi materiali. Med kovinske spadajo bodisi čiste kovine ali zlitine. Magnetni materiali so lahko liti, izdelani iz prahu kovine ali zlitine; takrat jim pravimo prahasti magneti.

Nekovinske materiale delimo na oksidne (najobičajnejši so feriti) in na neoksidne (nitridi, sulfidi, karbidi, npr. CrN).



Slika 5.48 Razdelitev magnetnih materialov po njihovi sestavi

5.9 Postopki za izdelavo magnetnih materialov

Ti so prilagojeni surovini. Če so materiali kovinski, je tehnologija metalurška; pri keramičnih t.j. nekovinskih materialih pa uporabljamo keramiško tehnologijo.

5.9.1 Metalurška tehnologija

1. Taljenje in zlivanje

Za izhodišče so potrebne zelo čiste kovine ali zlitine in postopke je treba izvajati tako, da se čistost ohrani. Mnogi magneti (trdi) dobijo že pri ulivanju končno obliko.

2. Gnetenje

Pri magnetni pločevini poznamo hladno in vroče valjanje, pri palicah in profilih pa vlečenje. Če želimo po valjanju oz. vlečenju dobiti mehkomagnetni material, moramo pločevino žariti. Če valjamo pločevino hladno, dobimo teksturo, t. j. anizotropno pločevino, pri večjih deformacijah pa celo pravokotno histerezo zanko.

3. Termična obdelava

Pri večini primerov je to žarjenje, s katerim želimo izboljšati tehnološke lastnosti (npr. vmesno žarjenje pri valjanju), ali pa žarjenje, s katerim dosežemo končno kakovost materiala (končno žarjenje). Pri končnem žarjenju odpravljamo največkrat mehanske prenapetosti v materialu pri mehkih magnetih in izvršimo rekristalizacijo in odstranitev npr. ogljika (razogljichenje), če je potrebno tudi v posebni atmosferi (v vodni pari).

Žarimo lahko tudi iz nasprotnih nagibov. Material želimo napraviti čim trši - v njem napravimo mehanske napetosti (npr. pri Al - zlitinah). To rabimo pri trajnih magnetih. S termično obdelavo dosežemo tudi inducirano anizotropijo.

5.9.2 Izdelava prahastih magnetnih materialov

Nekatere magnetne materiale izdelujemo iz komponent, ki so v prahasti obliki. Kot surovina se uporablja kovina ali kovinski oksid v prahu. Poznamo vezane in sintrane prahaste materiale.

Vezane prahaste magnetne materiale (jedra) izdelamo v naslednjih korakih:

1. Izdelava prahu

Prah dobimo po kemični ali mehanski poti. Kemični postopek poteka s pomočjo elektrolize ali redukcije. Pri ti. karbonilnem postopku dobimo zrnca železa s pomočjo železovega petakarbonila: $\text{Fe}(\text{CO})_5 \rightarrow \text{Fe} + 5\text{CO}$. Poleg teh je poznanih tudi več mehanskih postopkov; kovino ali zlitino lahko tudi zmeljemo v prah, če je čista (npr. armco železo), ali če je zlitina

(npr. AlNiCo ali Permalloy). Velikost zrnca je odločilna za kakovost materiala. Pri trdih magnetih morajo biti zrnca čim manjša, da dobimo čim več pregrad in s tem težje premagnetenje.

2. Izoliranje

Delci prahu morajo biti med seboj izolirani. V ta namen uporabljamo posebne lake, s katerimi prevlečemo posamezne zrnca. Za izolacijo lahko uporabimo tudi plast oksida.

3. Predpriprava za stiskanje

Po izoliranju dodamo prahu vezivo. V ta namen se uporabljajo strjujoče se organske smole.

4. Stiskanje

Tako pripravljeno maso stiskamo. Pritisk je lahko precej velik npr. do $(2,6 \cdot 10^3 \text{ MPa})$. Odtiski dobijo pri tem končne oblike (cilindrične krožne, paličaste, lončaste). Permeabilnost je praviloma večja, če smo ga izdelali z večjim pritiskom. Če stiskamo npr. železov prah, dobimo s pritiskom 350 MPa $\mu_r = 70$, s pritiskom 2600 MPa pa $\mu_r = 150$. Stiskanje je lahko enostransko ali dvostransko oz. izostatično. Bolj enakomerno gostoto po vsem volumnu dobimo z dvostranskim ali z izostatičnim stiskanjem.

5. Strjevanje

Za strditev organskih veziv potrebujemo nek določen čas. Da ne držimo stiskalnic ves čas pod pritiskom, damo odtiske v peč, kjer se strdijo. Nato lahko opravimo tudi stabilizacijo. Veziva niso vedno mehansko trda, lahko so plastično mehka ali celo gumijasta. V tem primeru govorimo o plastomagnetih.

Prahasta jedra so zelo pomembna pri gradnji napajalnih tuljav; poleg TV in radijske tehnike jih najdemo še v dušilkah. V tabeli 5.3 so podane nekatere tipične lastnosti karbonilnih in Ni-Fe prahastih jeder; primerjana je tudi električna upornost s polno kocko dimenzij 1 cm^3 istih snovi.

Vrsta prahu	Srednja velikost prahu [μm]	Upornost materiala [$\Omega\text{mm}^2/\text{m}$]	Primerjalna upornost polnega jedra [$\Omega\text{mm}^2/\text{m}$]	Začetna permeabilnost (toroid) μ_i	Koercitivna poljska jakost [A/m]	Magnetna gostota nasičenja [T]
karbonilno železo	1...8 4...10	0,1	$1...10 \times 10^5$ $0,5...5 \times 10^4$	3...20 do 25	4...6 10...15	1,2...1,9
Ni-Fe z 78...80% Ni in 0...4% Mo	20...100	0,5	$0,5...5 \times 10^4$	20...300	≈ 3	0,7...1

Tabela 5.3 Primerjava prahastih jeder [6]

Pri izdelavi trajnih magnetov, posebej manjših dimenzij, uporabljamo največkrat drugačen postopek. V tem primeru ne uporabljamo organskih vezivnih sredstev, temveč prah po stiskanju sintramo (prahasta metalurgija). Izdelava sintranih prahastih magnetov ima naslednje korake:

1. Izdelava prahu
2. Mešanje

Posamezne komponente čistih kovin, ki so v obliki prahu, pomešamo med seboj v želenem razmerju.

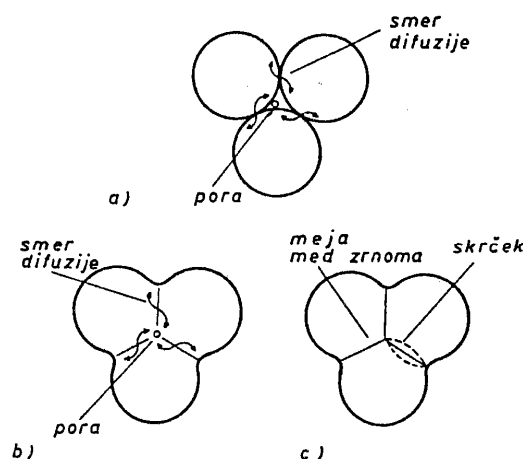
3. Stiskanje

To mešanico nato stisnemo. Pritisk niha z ozirom na kakovost materiala med 500 MPa in 1000 MPa.

4. Termična obdelava - sintranje

Sintranje je postopek, pri katerem zgoščujemo in mehansko utrjujemo bodisi čisti kovinski prah, ali nekovinski oksidni prah ali porozna telesa pri povišani temperaturi (toda pod temperaturo tališča). Oblikovanec iz prahu je pred žganjem sestavljen iz posameznih zrn (kristalov) gostota materiala je 40 – 74 % teoretične gostote vhodne snovi, odvisno od zrnatosti snovi in od metode oblikovanja.

Prahovi imajo relativno veliko površino in zato veliko površinsko energijo. Vsak sistem stremi za tem, da doseže najnižje energetske stanje, zato velja na splošno, da je težnja po znižanju površine gonilna sila sintranja. Na sliki 5.49 je shematsko prikazan sedaj sprejet koncept sintranja. Trije krogi predstavljajo kristalne delčke, ki se stikajo v točkah (a). Njihove proste površine v smeri središča določajo meje pore; površinska napetost hoče stisniti poro. V atomskem merilu se to zgodi s prenosom snovi iz meje med zrnji na mestu kontakta na notranjo površino pore.



Slika 5.49 Potek sintranja

Tako se centra dveh zrn zblížujeta, pora postaja manjša (b), površina kontakta med zrnji se poveča, na zunaj opazimo, da se vzorec krči. Pora izgine tako, da vrzeli, ki imajo svoj izvor v pori (defekte in luknje v kristalni mreži zrn) difundirajo po mejah med zrnji ali po kristalni mreži iz zrna in poniknejo na mejah med zrnji (c). Difuzijo vrzeli spremlja tok ionov, ki ima obratno smer. Da se izpolni pora s snovjo AB, difundirata v poro oba iona A in B in hitrost procesa sintranja je odvisna od hitrosti difuzije počasnejšega atoma.

V začetnem stadiju sintranja v trdem stanju je logaritem skrčka premo sorazmeren času in proces sintranja se tako izrazi z enačbo:

$$\frac{\Delta L}{L_0} = K \cdot t^n, \quad (5.80)$$

kjer je

$$K = K_1 \cdot \frac{\delta \cdot \Omega_0 \cdot D}{k \cdot T \cdot r^3}, \quad (5.81)$$

kjer je

$\Delta L / L_0$ – linearni skrčec,

δ – površinska napetost,

Ω_0 – atomski volumen,

D - difuzijska konstanta,

k - Boltzmanova konstanta,

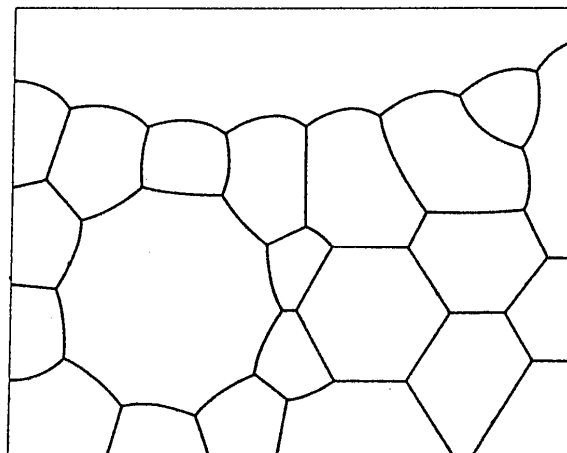
T - temperatura,

r - velikost zrn,

n - $1/3$ - $2/3$ (odvisno od mehanizma sintranja).

Običajno velja, da je temperatura sintranja tista temperatura, pri kateri doseže vzorec zaželeno gostoto, denimo 95 % teoretične gostote v 1 - 4 urah. Temperatura sintranja AlNiCo magnetov je od 1200 do 1300 °C, čas sintranja od 120 do 150 min, za čisto železo je 1000 do 1150 °C in čas od 30 do 45 min. Da preprečimo oksidacijo, sintramo v zaščitni atmosferi. Na proces sintranja vplivajo temperatura, čas in atmosfera sintranja, velikost delcev in gostota vzorca.

V večini primerov je zgoščevanje pred sintranjem združeno z zrastjo zrn in z izginjevanjem por. Pomembna za ta proces je prosta površinska energija, ki se med sintranjem zmanjšuje. Iz obrusa (Slika 5.50) vzorcev z enakomernimi zrn lahko vidimo, da se stikajo po tri zrna, kot med mejami zrn je 120°.



Slika 5.50

Ker imajo zrna veliko robov, je večina mej med zrn ukrivljena. Le zrna, ki imajo šest robov, imajo ravne meje. Kot je razvidno iz slike 5.50, so meje, ki imajo manj kot šest robov, konkavne, meje zrn, ki imajo več kot šest robov, pa so konveksne. Zaradi težnje po znižanju

površine, se bo meja med zrn gibala proti centru zakrivljenosti zrna. Zrna, ki imajo več kot šest robov, bodo zrastle na račun zrn, ki imajo manj kot šest robov. Hitrost gibanja meje zrna je obratno sorazmerna zakrivljenosti meje, zato bo poprečna hitrost rasti zrn obratno sorazmerna premeru zrn oz.:

$$\frac{dr}{dt} = \frac{1}{r} \quad \text{in} \quad r - r_0 = K \cdot \sqrt{t} \quad (5.82)$$

r je premer zrn, r_0 pa premer zrn pri $t = 0$.

Sledi krčenje odtiska od 6 do 10 %. Nato segrevanje v električni peči v magnetnem polju, s čimer dobimo zelene magnetne lastnosti (inducirana magnetna anizotropija).

Sintrani magneti imajo nasproti litim naslednje prednosti: imajo boljše mehanske lastnosti, so brez lunckerjev in imajo ožje tolerance. Poleg tega se dajo na le-te nasintrati tudi mehkoželezni deli. Vendar moramo poudariti, da postanejo pri večjih magnetih nad 150 – 200 g sintrani magneti neekonomični. Tudi serije morajo biti dovolj velike.

5.9.3 Keramiška tehnologija

Izhodiščne komponente so v splošnem nemagnetne. Zato je potrebna med njimi kemična reakcija, po kateri dobijo spojine magnetne lastnosti (običajno ferimagnetne). Tehnologija je pri vseh podobna, za vzorec pa izberimo izdelavo feritov.

Kot osnovni materiali uporabljamo Fe_2O_3 (železov ferit), MnO (manganov oksid) ali MnCO_3 (manganov karbonat), ZnO (cinkov oksid), MgO (magnezijev oksid) ali NiO (nikljev oksid) v prahu. Izdelava teče v naslednjih korakih:

1. Mešanje

Pri tem postopku mešamo (homogeniziramo) prahove oksidov v posebnih napravah v suhem stanju ali z vodo. V glavnem uporabljamo suho mešanje, ker je ekonomičnejše. Pri mokrem mešanju sušimo mešanico v obliki suspenzije v razpršilnem sušilniku, ali jo kot pasto damo na termično predobdelavo v rotacijsko kalcinacijo.

2. Peletiranje

Homogeno zmešane prahove dovajamo v peletirni stroj, ki nam s pomočjo vode izdeluje kroglice s premerom od 3 do 6 mm; tem pravimo pelete.

3. Termična predobdelava

Mešanico pražimo ali kalciniramo pri cca 950 °C. Pri tej temperaturi steče reakcija med oksidi oz. karbonati, tvori se ferit, ki ima že osnovne ferimagnetne lastnosti. Omenjeni proces imenujemo tudi feritizacija. Kalciniranje ni tipičen postopek za feritizacijo in ga pri izdelavi nekaterih feritov ne uporabljamo. Kalciniranje opravlja naslednje funkcije:

- razkraja karbonate ali okside višjega reda ter s tem zmanjšuje tvorbo plinov pri končni termični obdelavi – sintranju,
- pomaga homogenizirati material in zmanjšuje skrček pri sintranju.

V ta namen uporabljamo v masovni proizvodnji rotacijske cevne peči, kjer so cevi nagnjene za okrog 5° glede na horizontalo. Prah prihaja v peč pri višjem koncu in se ob počasnem vrtenju cevi ob premetavanju pomika proti spodnjemu koncu.

4. Drobljenje in mletje

Tako sintetizirane magnetne materiale zdrobimo (čeljustni drobilnik, kroglični, vibracijski mlin) v prah enakomernih dimenzij (kristalov) do velikosti 1 do 2 μm. Povprečna velikost zrn oz. granul ima pomemben vpliv na končne magnetne lastnosti feritov (podobno kot pri prahastih magnetih).

Tak material lahko večemo s plastičnimi materiali tudi v plastomagnete, ki so končni izdelki, ali pa nadaljujemo postopek v smeri sintranja. Če nadaljujemo v smeri sintranja, dodamo temu prahu organska veziva in maziva zaradi lažjega oblikovanja v naslednji fazi. Vrsta veziva je odvisna od tega, ali bo oblikovanje izvedeno s stiskanjem ali z ekstrudiranjem in od potrebne trdnosti oblikovancev.

5. Oblikovanje in stiskanje

Pred sintranjem oblikujemo materiale s stiskanjem ali z ekstrudiranjem. Stiskanje je lahko mokro ali suho. Pri suhem postopku izdelujemo izotropne materiale na ta način, da stisnemo suhi prah v želene oblike. Pri mokrem postopku izdelujemo anizotropne materiale. Prah, pomešan z vodo v pastozno maso oblikujemo v stiskalnicah v želene oblike v prisotnosti magnetnega polja. Tudi tu poznamo enostransko, dvostransko ter izostatično stiskanje (pri tem stiskamo material z vseh strani). Boljše rezultate daje izostatično stiskanje.

Ekstrudiranje uporabljamo za izdelavo feritnih palic ali cevi. Prah spremenimo v pastozno maso, ki jo damo v cilinder ekstrudirnega stroja. Ta iztiska maso skozi matrico določene oblike. Postopek poteka kontinuirano. Palice oziroma cevke režemo na določene dolžine in jih polagamo na palete.

Vse izdelke, ki so izdelani po mokrem postopku, moramo pred nadaljnjim korakom posušiti. Dimenzije oblikovancev so za toliko večje, za kolikor so predvideni skrčki pri sintranju.

6. Sintranje

Ta je proces žganja materiala pri temperaturah med 1200 in 1400 °C. Pred tem pride v fazi segrevanja do odstranitve veziv in maziv, ki so bila potrebna samo za oblikovanje in stiskanje. V nekaterih primerih moramo sintrati jedra v zaščitni atmosferi. Zgoščevanje povzroči tudi rast zrn, ki imajo zdaj velikost med 5 in 40 µm. Skrčki so relativno veliki - med 10 in 25 %. Pri keramičnih magnetih je končni izdelek zelo trd in ga lahko naknadno obdelujemo le še z brušenjem, kar pa bistveno podraži izdelek.

Če imamo opraviti s trdomagnetnimi feriti, jih moramo po potrebi namagnetiti. Končni izdelek je potrebno prekontrolirati. Tipičnemu feritnemu jedru moramo izmeriti okrog sedem parametrov.

Področja uporabe različnih tipov feritov so prikazana v spodnji tabeli:

Vrsta ferita	Frekvenca	Permeabilnost	Uporaba
Mn-Zn	do 100 kHz	3000 - 6000	Miniaturne dušilke, impulzni transformatorji
Mn-Zn	10 - 1000 kHz	1000 - 2500	Filtri, magnetofonske glave
Ni - Zn	100 - 2000 kHz	400 - 1200	Odklonske dušilke pri TV, jedra za uglaševalna vezja
Ni - Zn	500 - 5000 kHz	200	Antenske palice, VF dušilke
Ni - Zn	1 - 15 MHz	100	Antenske palice, lončasta jedra za nihajne kroge
Ni - Zn	5 - 25 MHz	50	Lončasta jedra za nihajne kroge, VF dušilke, paličasta jedra
Ni	preko 25 MHz	15	VF dušilke
Mg - Mn	impulzi	50	Magnetni preklopniki, magnetni ojačevalniki
Mg - Mn	mikrovalovi	-	Vezja za fazni premik

Tabela 5.4 Feritni materiali

5.10 IEC klasifikacija mehkomagnetnih materialov

Da bi poenotili terminologijo in vrste mehkomagnetnih materialov, je IEC sprejel klasifikacijo, ki jo kaže tabela 5.5.

V praksi seveda vseh spodaj navedenih materialov ne srečamo enako pogosto. V nadaljnjih poglavjih bomo obravnavali le nekatere materiale iz zgornje množice, tiste, ki jih v praksi največkrat srečamo.

Mehkomagnetni materiali		
A - Železa		
B - Mehka jekla z majhno vsebino ogljika (nelegirana jekla)		
C - Silicijeva jekla	C ₁ Masivni material C ₂ - Pločevina	C ₂₁ Izotropna jekla C ₂₂ Anizotropna jekla C ₂₃ Tanko Si - jeklo
D - Ostala jekla	D ₁ - Masivni material D ₂ - Pločevina	
E - Zlitine Ni - Fe	E ₁ 72 - 83 Ni E ₂ 54 - 68 Ni E ₃ 45 - 50 Ni E ₄ 35 - 40 Ni E ₅ cca. 30 Ni	Izotropne, anizotropne
F - Zlitine Fe - Co	F ₁ 47 - 50 Co F ₂ 35 Co F ₃ 23 - 27 Co	Izotropne, anizotropne
G - Zlitine	G ₁ Zlitine Fe - Al G ₂ Zlitine Al - Si - Fe	
H - Mehkomag. keramika	H ₁ Mehkomagnetni feriti	

Tabela 5.5 IEC klasifikacija mehkomagnetnih materialov

5.11 Mehkomagnetni materiali v napravah močnostne elektrotehnike

V to skupino spadajo magnetni materiali, ki jih uporabljamo v električnih strojih, transformatorjih, energetskih merilnih pretvornikih, dušilkah ipd. Osnovno frekvenčno območje je med 0 in 100 Hz, pri tem pa je najbolj pogosta raba pri $f = 0$ in pri $f = 50$ Hz oz. 60 Hz.

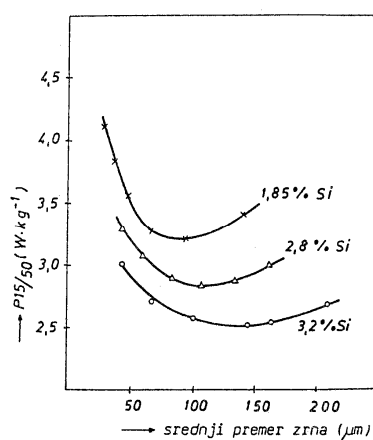
Osnovni material je vedno železo, ki ga po potrebi legiramo s Si, Al, Ni, Co. V enosmernih poljih lahko uporabimo masivne materiale, v ostalih pa v obliki pločevine.

5.11.1 Železa in nelegirana jekla

Nelegirano železo se zaradi dobre električne prevodnosti praviloma uporablja le v enosmernih magnetnih poljih, pri enosmernih magnetih, relejih in polovih čevljevih električnih strojev. Pri tem razlikujemo med »čistim železom« in med tehniško čistim železom. Popolnoma čistega železa ni. V laboratorijih je doseglo čisto železo z vsebnostjo 0,002 % C in 0,002 % O $\mu_{maks.} = 220000$, brez kisika pa $\mu_{maks.} = 500000$. Pri vsebini ogljika 0,01 % se je $\mu_{maks.}$ znižal na vrednost 20000, kar kaže na izreden vpliv teh dveh elementov na magnetne lastnosti železa. Na monokristalu čistega železa je bila izmerjena $\mu_{maks.} = 1430000$; torej ima železo izredne magnetne sposobnosti. Pri najbolj čistih železih je bila izmerjena maksimalna gostota magnetnega pretoka okrog 2,2 T.

Pri tehniško čistih železih se gibljejo permeabilnosti med $\mu_{maks.} = 3000$ do 50000, $B_s = 2,15$ T, $B_r = 0,8 - 1$ T, H_{cB} , (statična) = 6 do 100 A/m, $\rho = 0,1$ do $0,13 \times 10^{-6}$ Ωm .

Novejša tehnologija je uporabo nelegiranih železnih materialov – jekel razširila tudi na področje izmeničnih magnetnih polj. Ugotovljeno je namreč, da z rastjo kristalnega zrna železa (ferita) izgube premagnetjenja hitro padajo (Slika 5.51).

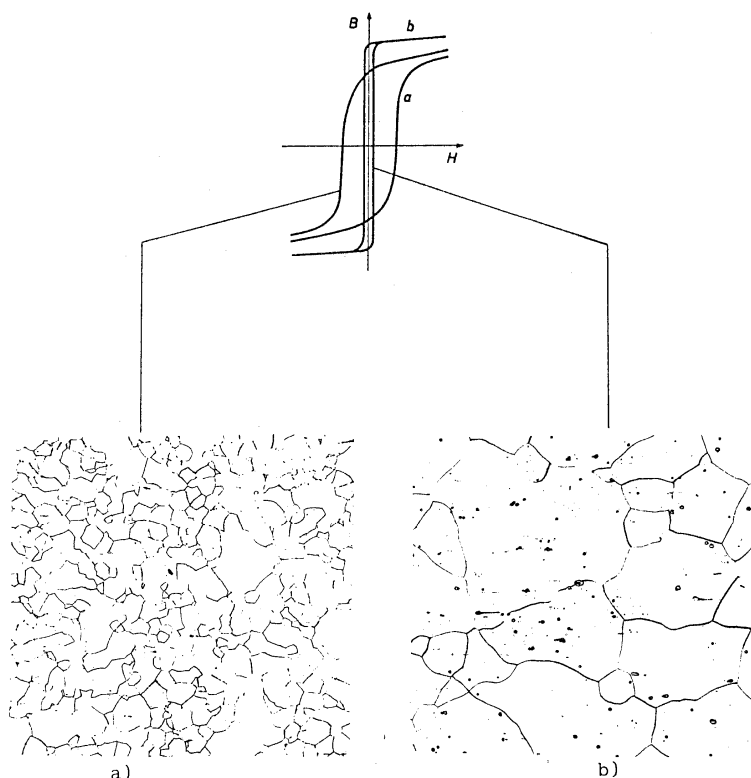


Slika 5.51 Sprememba histereznih izgub v odvisnosti od srednjega premera zrna železa ($B = 1,5$ T, $f = 50$ Hz)

Običajno pospešujemo rast zrna s pomočjo elementov, kot sta Si ali P z ustrezno termično obdelavo – žarjenjem. Z novejšo tehnologijo hladnega preoblikovanja dosežemo rast zrn brez prisotnosti omenjenih elementov, mogoče le z majhnim dodatkom obeh, včasih samo P. Optimalna velikost zrna je med 50 in 120 μm . Problem vrtilnih tokov rešujemo z lameliranjem – torej s pločevino.

Na tržišču dobimo skoraj navadno (polgotovo) jekleno pločevino, ki jo nato mehansko obdelamo v oblike, kakršne zahteva električni stroj. Nato je pločevina izpostavljena še posebnemu termičnemu postopku – rekristalizaciji s katerim dosežemo rast kristalnih zrn. Magnetilne lastnosti pločevine povečamo z odstranitvijo ogljika (razogljichenje). Na koncu postopka prevlečemo zunanjo površino pločevine s tanko plastjo oksida, ki zaradi velike električne upornosti preprečuje vrtilne tokove med lamelami pločevine. Takšno pločevino imenujemo »gotova nelegirana magnetna pločevina«. Na sliki 5.52 je prikazana sprememba histerezne zanke po termični obdelavi nasproti »polgotovi«, t.j. jekleni pločevini. Prikazani so tudi metalografski posnetki preseka pločevine.

Z dodatkom P okrog 0,1 % dosežemo povečanje specifične upornosti na $\rho = 0,15$ do $0,17 \times 10^{-6} \Omega\text{m}$.



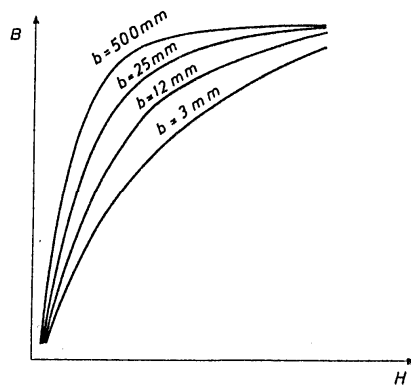
Slika 5.52 Primerjava histerezne zanke in zrnatosti »polgotove« pločevine pred žarjenjem (a) in po njem (b). Metalografski posnetek je 100 x povečava. [6].

5.11.2 Silicijeva jekla

Iz teh izdelujemo večino današnjih magnetnih pločevin pri transformatorjih, električnih strojih in merilnih pretvornikih. Z dodajanjem silicija in z izdelavo primerne teksture lahko pridobimo izredne lastnosti. Za primerjavo naj takoj povemo, da dosežajo polgotove nelegirane pločevine v najboljšem primeru le srednje lastnosti Fe-Si pločevine in je zato njihova uporaba omejena le na področje manj zahtevnih električnih strojev. Vpliv silicija na lastnosti železa lahko grobo označimo takole: vsak odstotek Si v Fe poveča specifično upornost za približno dvakrat, zmanjša pa gostoto magnetnega pretoka nasičenja za približno 0,05 T. Mehanske lastnosti železa se z dodajanjem Si spreminjajo v smeri povečanja krhkosti, kar omejuje tehnološke možnosti. Tako je zgornja meja Si omejena na 5 % pri vroče valjanih pločevinah in na okrog 3 % pri hladno valjanih pločevinah. Pri hladnem valjanju se pojavi tekstura, s pomočjo katere lahko dodatno spreminjamo lastnosti pločevine (Slika 5.23 in 5.24). S teksturo dosežemo anizotropne lastnosti, ki so odvisne od položaja elementarne celice nasproti smeri magnetenja. Najboljše lastnosti dosežemo v smeri valjanja.

Pri strojih, ki obratujejo v vrtilnih magnetnih poljih, magnetna anizotropija ni zaželena. V tem primeru mora biti hladno valjana pločevina podvžena posebnemu termičnemu postopku, s katerim skušamo anizotropijo zmanjšati tako, da dosežemo mešano kristalno strukturo. V praksi pravimo takšni pločevini »neorientirana« hladno valjana pločevina. Pri vroče valjani pločevini anizotropnih lastnosti ne opazimo, saj jo valjamo pri temperaturah, ki so višje od rekristalizacijskih.

Magnetne lastnosti pločevine se spreminjajo tudi z mehansko obdelavo. Tako ugotavljamo, da vsaka dodatna obdelava, kot npr. prebijanje, rezanje, zvijanje, upogibanje, stiskanje, segrevanje ipd. poslabša njene lastnosti. Najbolj izrazit negativni učinek izkazuje t.i. robni efekt, ki nastane pri prebijanju oz. rezanju pločevine. Ob robu, torej tam, kjer smo nasilno razrušili kristalna zrna, in povzročili notranje napetosti, se magnetne lastnosti najbolj poslabšajo: permeabilnost pade, izgube narastejo, saj se je histerezna zanka ob robu bistveno razširila. Ta vpliv se čuti nekje do širine 1 mm od roba pločevine. Zato opazimo znatno slabšanje lastnosti šele pri ožjih magnetnih poteh, nekako pod 25 mm širine, kar je pomembno pri manjših električnih strojih in pri transformatorjih. Ta občutljivost Fe-Si pločevine na mehanske vplive (strese) pa ni linearna. Odvisna je predvsem od jakosti magnetnega polja in od smeri magnetenja. Primer izsledkov neke raziskave je možno razbrati iz slike 5.54. Najbolj prizadeto je vedno koleno magnetilne krivulje. Najboljše rezultate mehanskih stresov kažejo polgotove Fe-Si pločevine, saj se notranje napetosti odpravijo pri dokončni termični obdelavi.



Slika 5.54 Vpliv robnega efekta na magnetilno krivuljo (b je širina traku)

Z dodajanjem Si dosežemo namreč povečanje električne specifične upornosti (pri 3 % Si na okrog $0,40 \times 10^{-6} \Omega\text{m}$) kar zmanjšuje vrtnične izgube v istem razmerju, poleg tega pa še pripomore k rasti kristalnih zrn.

Na splošno opazamo, da so izgube in permeabilnost pri magnetnih materialih povezane: manjšim izgubam ustreza večja permeabilnost in obratno. Zato so magnetni materiali, ki jih uporabljamo v energetiki, urejeni po izgubah.

Pri gradnji močnostnih transformatorjev uporabljamo danes skoraj izključno silicijevo jeklo s 3 % Si, s čim večjo anizotropijo in z debelino pločevine med 0,2 in 0,5 mm. Zato govorimo tudi o anizotropni ali »orientirani« ali transformatorski pločevini. Ker so ti transformatorji grajeni vedno tako, da je pločevina izrabljena le v smeri valjanja, veljajo le lastnosti, ki jih imajo ti materiali v tej smeri: $P_{15/50} \leq 1 \text{ W/kg}$, $\mu_4 \leq 2000$ in $\mu_{maks} \leq 35000$, $H_{CB} \geq 10 \text{ A/m}$ in $B_s \leq 2,03 \text{ T}$, magnetilna krivulja je skoraj stopničasta, saj doseže npr pri $H = 1000 \text{ A/m}$ že $B \approx 1,9 \text{ T}$. Razvoj teh materialov še ni končan, posebej poteka v smeri zmanjšanja izgub, kar je zelo pomembno, saj so ti transformatorji trajno priključeni na omrežje in bistveno vplivajo na izkoristek elektroenergetskega omrežja.

Zaradi zgoraj omenjenih lastnosti ne najdemo teh materialov le pri gradnji močnostnih transformatorjev, temveč tudi v dušilkah, polovih čevljih, merilnih sistemih, ipd.

V rotacijskih strojih je vsaka anizotropija motilna, zato uporabljamo »neorientirane« magnetne pločevine. Po stopnji silicija v njih jih delimo na pločevine brez silicija (nelegirana jekla), na tiste z malo silicija ($\text{Si} < 1,5 \%$). Njihove lastnosti se s količino silicija izboljšujejo, tako da so izgube $P_{15/50} = 2 \dots 10 \text{ W/kg}$, $\mu_{maks} \leq 6000$, $H_{CB} \geq 200 \text{ A/m}$ in $B_s = 2,15 \text{ T}$ in za dosego gostote $B = 1,9 \text{ T}$ rabimo kar $H \approx 10000 \text{ A/m}$. Uporablja se predvsem pločevina debeline 0,5 in 0,63 mm.