

1. MATERIJALI ZA IZRADU MAGNETSKIH KRUGOVA	2
1.1 FIZIKALNO OBJAŠNJENJE	2
1.2 PONAŠANJE PRI MAGNETIZIRANJU I RAZMAGNETIZIRANJU	4
1.2.1 Krivulja prvog magnetiziranja	4
1.2.2 Permeabilitet	4
1.2.3 Petlja histereze	5
1.2.4 Faktor izbocenosti	6
1.2.5 Faktor pravokutnosti	6
1.2.6 Gubici kod magnetiziranja	6
1.2.7 Magnetostrikcija	6
1.2.8 Magnetoelasticnost	6
1.2.9 Toplinska ovisnost krivulje magnetiziranja	7
1.2.10 Magnetska anizotropija	7
1.2.11 Ostala ponašanja	7
1.3 PODJELA	8
1.4 OSNOVNE PRIMJENE I ZAHTJEVI NA MATERIJALE	8
1.4.1 Mekomagnetske jezgre	8
1.4.2 Tvrdе magnetske jezgre	8
1.4.3 Izvedbe jezgri	9
1.5 PREGLED MATERIJALA	9
1.5.1 Osnovne grupe materijala	9
1.5.2 Materijali za meke magnete	9
1.5.2.1 Tehnicki cisto željezo i meki celici	9
1.5.2.2 Grupa ferosilicijskih legura	10
1.5.2.3 Grupa feronikalnih legura	10
1.5.2.4 Praškaste mekomagnetska jezgre	11
1.5.3 Materijali za tvrde magnete	12
1.5.3.1 Ugljicni i legirani celici	12
1.5.3.2 Disperzno kaljeni	13
1.5.3.3 Duktilni materijali	13
1.5.3.4 Kobalt - rijetke zemlje	13
1.5.3.5 Oksidni magneti	13

1. MATERIJALI ZA IZRADU MAGNETSKIH KRUGOVA

(MAGNETSKI MATERIJALI)

To su dijelovi električnih proizvoda, koji imaju osnovni zadatak da usmjereno vode magnetski tok i time omogućuju elektromagnetske pretvorbe na kojima se zasniva funkcija tih proizvoda. Koriste se materijali koji izrazito dobro vode magnetski tok. Praktički svi materijali su magnetski, ali su samo feromagnetski i ferimagnetski od praktičke važnosti u tehnologiji, jer se lako magnetiziraju relativno slabim poljem (H), pa ćemo na te materijale i misliti kad govorimo o magnetskim materijalima.

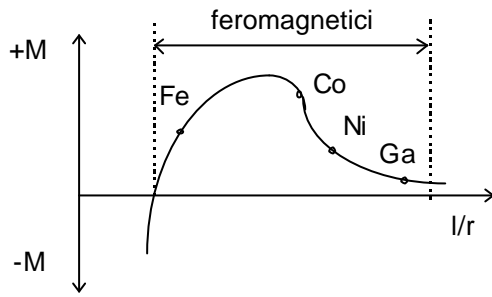
1.1 FIZIKALNO OBJAŠNJENJE

Koja je osnova nastanka magnetizma, gdje su mu korijeni? Dok je uspjelo razdvojiti negativan od pozitivnog naboja, kod magnetskih pojava nam to nije uspjelo. Naime i kod najmanjih velicina imamo uvijek prisutan kompletan magnetski krug, nema djeljivosti polova. Magnetske pojave su ustvari pojave, koje prate struju. Izvor magnetizma je u atomu. U objašnjenju se polazi od Bohrovog modela atoma, već spomenutom kod vodica. Jezgra se vrti oko svoje osi i to je prvi uzrok magnetskog momenta. Elektron se vrti oko jezgre to je drugi uzrok magnetskog momenta, te oko svoje osi (spin), što je treći uzrok magnetskog momenta. Spin je pozitivan ili negativan što ovisi o smjeru vrtnje. Kod atoma s višim rednim brojem (većim brojem elektrona) ljuske su podijeljene u podljuske, a popunjavanje elektronima se vrši tako da se prvo popunjavaju niži energetske nivou, to jest podljuske bliže jezgri. Ukoliko u atomu imamo potpuno popunjenu ljusku magnetski momenti su međusobno poništeni i takav atom prema van ne pokazuje magnetski moment. Kod atoma s nepotpuno popunjenim ljuskama magnetski momenti unutar atoma nisu potpuno kompenzirani, te takav atom pokazuje magnetski moment, ali je on relativno mali. Važna je činjenica da kod nekih elemenata dolazi do nepravilnog popunjavanja ljuski, to jest počnu se popunjavati viši energetske nivou (vanjske ljuske), dok niži (unutarnje ljuske), još nisu popunjene. To je slučaj s elementima željezo, kobalt i nikal što je prikazano u tablici. Kod njih je počelo popunjavanje četvrte ljuske, a treća još nije potpuno popunjena, tablica 1. Takovi atomi imaju znatne magnetske momente.

tablica 1 Raspored elektrona po ljuskama

ljuska	K			L			M			N			spin	nekompenzirani elektroni
	s	s	p	s	p	o	s	p	..					
popunjena	2	2	6	2	6	10	2							
Fe	1	1	3	1	3	5	1					+	4	
	1	1	3	1	3	1	1					-		
Co	1	1	3	1	3	5	1					+	3	
	1	1	3	1	3	2	1					-		
Ni	1	1	3	1	3	5	1					+	2	
	1	1	3	1	3	3	1					-		

Slijedeća važna činjenica je da se feromagnetizam pojavljuje samo u krutom agregatnom stanju, s kristalnom rešetkom gdje uglavnom dominira moment spina. U krutom agregatnom stanju su stalni razmaci među jezgrama atoma. te u određenim uvjetima dolazi do interakcije među atomima rešetke što ima za posljedicu pojavu spontanog magnetiziranja velikih grupa atoma. To se može dogoditi jedino uz uvjet da je omjer udaljenosti među atomima u rešetki (D) prema radijusu nepopunjene, vanjske ljuske (r) u određenim odnosima to jest >3 . To je upravo slučaj sa Fe (3.26), Co (3.64) i Ni (3.94) slika 1. Ukoliko se taj omjer zbog nekih razloga poremeti spontano magnetiziranje prestaje.



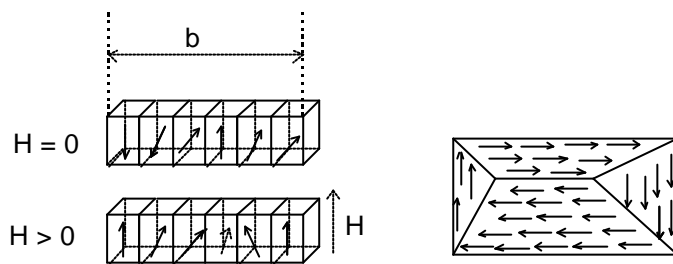
slika 1 Odnos udaljenosti atoma i radijusa nepotpuno zaposjednute ljuske

Dakle za pojavu feromagnetizma moraju istovremeno biti ispunjena tri uvjeta:

- postoji nepravilno popunjavanje energetskih nivoa u unutarnjoj nepopunjenoj ljusci postoje nekompenzirani spinovi elektrona
- atomi formiraju kristalnu rešetku s konstantom $D/r > 3$

Paralelno usmjeravanje spinova dolazi u određenim grupama, područjima. većim ili manjim, a ne u cijelom materijalu, te ta područja nazivamo elementarne ili Weissove domene. U samoj domeni materijal je spontano magnetiziran do zasićenja, ali su njihove orijentacije različite kada na materijal nije narinuto vanjsko polje. Između domena su prijelazna područja, takozvane Blochove stijene,

u kojima atomi nisu spontano magnetizirani, nego se samostalno ponašaju, slika 2. Njihova širina ovisi kako o vrsti kristala tako i o orijentiranosti dvije susjedne domene, jer njihova magnetska orijentacija postepeno prelazi od smjera jedne susjedne domene na smjer druge susjedne domene. Recimo ako je orijentiranost dvije susjedne domene 180° širina Blochove stijene je oko 200 nm, a ako je 90° onda je upola manja.



slika 2 Prikaz Blochovih stijena i Weissovih područja

Na osnovu ovih izlaganja, a sa stanovišta magnetske vodljivosti i ponašanja u magnetskom polju materijali se mogu podijeliti u slijedeće grupe:

- diamagnetski materijali
- paramagnetski materijali
- feromagnetski materijali
- ferimagnetski materijali
- antiferomagnetski materijali

tablica 2 Podjela materijala prema ponašanju u magnetskom polju

magnetski moment			postoje područja (domene)	simbol	naziv
jezgra	elektron				
	kruženje	spin	atom		
da	da	da	ne	o o o o o	diamagnetski
da	da	da	da	↑ → ↓ ← ↑	paramagnetski
da	da	da	da	↑↑↑↑↑↑	feromagnetski
da	da	da	da	↑↓↑↓↑↓	ferimagnetski
da	da	da	da	↑↓↑↓↑↓	antiferomagnetski

Prva dva tipa materijala prakticki nemaju nikakve važnosti kao magnetski materijali, jer se u magnetskom polju ponašaju gotovo kao vakuum odnosno zrak. Za te materijale relativni permeabilitet, koji uspoređuje određeni materijal s vakuumom, iznosi otprilike 1.

paramagnetski (Al, Mn, Mg, Na, K, Ca, Pt) relativni permeabilitet je nešto veći od 1

diamagnetski (Au, Ag, Cu, Cd, Pb, Sn, Zn) relativni permeabilitet je nešto manji od 1

Antiferomagnetski materijali, koji imaju sve elemente feromagnetika, isto tako nisu interesantni, jer zbog svoje grade, to jest međusobnog poništavanja magnetskog momenta susjednih domena, njihov magnetizam ne dolazi do izražaja.

Prema tome za nas su interesantni feromagnetski i ferimagnetski materijali, koji pokazuju veliku magnetsku vodljivost. Kada budemo govorili o magnetskim materijalima mislit ćemo upravo na njih, a ostale ćemo smatrati nemagnetskim materijalima. Njih karakterizira:

intenzivno magnetiziranje već relativno malim poljem (permeabilitet puno > 1)

nelinearna krivulja magnetiziranja (permeabilitet ovisi o jačini polja)

postoje Weissove domene i Blochove stijene

dolaze u zasićenje

Prirodni feromagnetski materijali su željezo, nikal, kobalt, gadolinij, od čistih elemenata, te neke legure koje mogu biti sastavljene i od elemenata koji nisu feromagnetici, ako prilikom njihovog rastajanja nastanu prije receni uvjeti za pojavu feromagnetizma.

1.2 PONAŠANJE PRI MAGNETIZIRANJU I RAZMAGNETIZIRANJU

(Ponašanje u magnetskom polju)

Vrijednost materijala za izradu magnetske jezgre ne mjerimo samo vodljivošću magnetskog toka nego i po cijelom nizu ostalih svojstava, kako ponašanja u magnetskom polju tako i ostalih (električkih, tehnoloških). Jedan od prvih kriterija je velicina magnetskog toka, koji taj materijal propusti pri određenom magnetskom polju (H). Uvodimo pojam magnetske indukcije (B), to jest gustoće magnetskog toka (Vs/m^2) ili (T - Tesla). Dok je kod zraka, paramagnetskih i diamagnetskih materijala taj odnos linearan, kod feromagnetskih materijala on to nažalost nije. Krivulja ovisnosti magnetske indukcije o veličini magnetskog polja naziva se krivulja magnetiziranja ili B/H karakteristika.

1.2.1 Krivulja prvog magnetiziranja

Krivulja prvog magnetiziranja kazuje način prvog magnetiziranja materijala, znači materijala koji dosada bio nenamagnetiziran i sada se prvi puta stavlja u magnetsko polje.



slika 3 Krivulje prvog magnetiziranja

Na krivulji prvog magnetiziranja, slika 3 vide se neki dijelovi i to: početni, strmi, koljeno i zasićenje.

Pocetni dio:

u tom dijelu je polje još malo, nedovoljno veliko za zakretanje Weissovih područja. U smjeru narinutog vanjskog polja zakreću se samo magnetski momenti atoma u Blochovim stijenama, koji pri tome privremeno povećavaju Weissova područja orijentirana u smjeru vanjskog polja, te je taj dio krivulje linearan. Ukoliko se materijal izvadi iz vanjskog polja atomi u Blochovim stijenama vraćaju se u prvobitnu orijentaciju, magnetska indukcija se vraća na početnu vrijednost. Na tom dijelu krivulje magnetiziranja i razmagnetiziranja vrši se po istom putu pa je taj dio krivulje magnetiziranja reverzibilan. Dužina i strmina tog dijela krivulje magnetiziranja jasno ovisi o vrsti materijala.

Strmi dio:

polje je već dovoljno veliko da dolazi do zakretanja Weissovih područja, čija je masa velika, a isto tako i magnetski moment, pa je i porast magnetske indukcije velik. Nakon izlaska iz magnetskog polja Weissova područja se tek dijelom vraćaju u prvotni položaj, a dijelom ostaju u smjeru ranije narinutog vanjskog polja. Osim toga Weissova područja, koja su, u trenutku kada je narinuto vanjsko polje, već bila u smjeru toga polja porasla su na račun drugacije orijentiranih područja. U materijalu su nastale trajne promjene, on ostaje trajno namagnetiziran. Taj dio krivulje je ireverzibilan.

Koljeno:

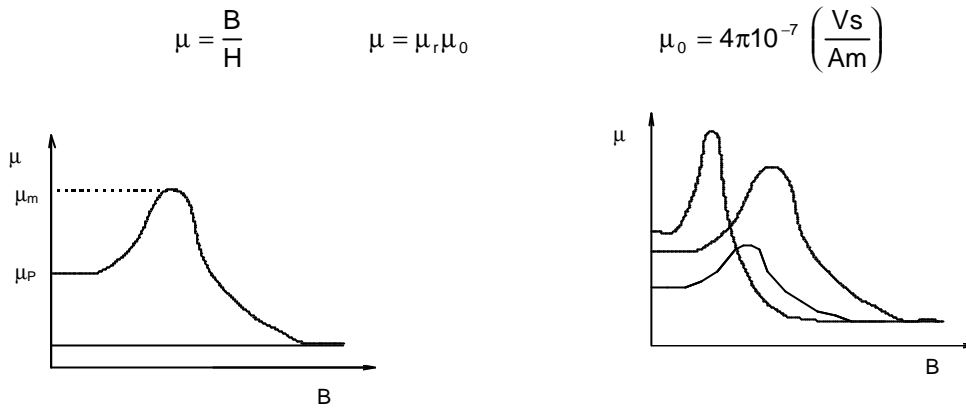
sva područja su sada orijentirana u smjeru vanjskog polja i ulazimo u područje zasićenja

Zasićenje

ovaj dio krivulje je linearan, i paralelan s pravcima magnetiziranja nemagnetskih materijala. Sva Weissova područja i Blochove stijene su usmjerene u smjeru vanjskog polja i dalje povećanje polja ima vrlo mali učinak. Materijal se dalje ponaša kao paramagnetski materijal. Magnetski materijal je dospio u zasićenje, govorimo o indukciji zasićenja B_m ili B_z . Indukciji zasićenja je u praksi vrlo važno svojstvo materijala

1.2.2 Permeabilitet

Permeabilitet (μ) je ustvari magnetska vodljivost, a definiran je kao odnos magnetske indukcije i magnetskog polja



slika 4 Ovisnost permeabiliteta o magnetskoj indukciji

Uvedena je velicina relativni permeabilitet (μ_r), koji nam ustvari kaže koliko neki materijal bolje vodi magnetski tok od zraka odnosno vakuuma. Kako je krivulja magnetiziranja nelinearna, tako je i permeabilitet, slika 4, promjenjiva velicina, pri čemu su za nas narocito interesantne dvije velicine i to:

pocetni permeabilitet (μ_p) određen pocetnim nagibom krivulje magnetiziranja (mjeri se kod vrlo malog polja reda velicine 10^{-5} A/m) te

maksimalni permeabilitet (μ_m) određen maksimalnim nagibom krivulje magnetiziranja

diferencijalni permeabilitet određen je strminom krivulje magnetiziranja u bilo kojoj tocki

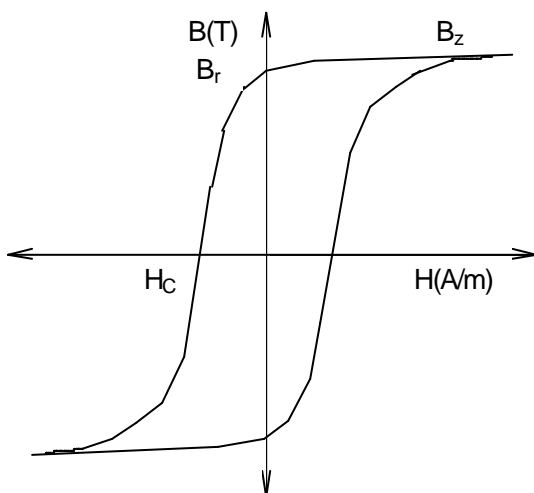
$$\mu_d = \frac{dB}{dH}$$

Iz svega do sada navedenog vidljivo je da permeabilitet ovisi o:

- vrsti feromagnetika
- stupnju magnetiziranja
- stanju strukture
- temperaturi

1.2.3 Petlja histereze

Kako je krivulja magnetiziranja ireverzibilna magnetiziranje i razmagnetiziranje ne ide istim putem. Ukoliko bi izvršili cijeli krug magnetiziranja što znaci: materijal namagnetizirati do zasicenja, razmagnetizirati ga, namagnetizirati ga u suprotnom smjeru do zasicenja te ga ponovo razmagnetizirati dobili bi petlju histereze, slika 5.



slika 5 Petlja histereze

Karakteristicne tocke na krivulji su:

B_m (B_z) indukcija zasicenja, maksimalna indukcija do koje se može materijal namagnetizirati

B_r remanencija, gustoca magnetskog toka koja ostane u materijalu koji je, nakon magnetiziranja do zasicenja, izvadjen iz polja

H_c koercitivna sila, jakost polja suprotnog smjera potrebna da se materijal, magnetiziran do zasicenja, razmagnetizira.

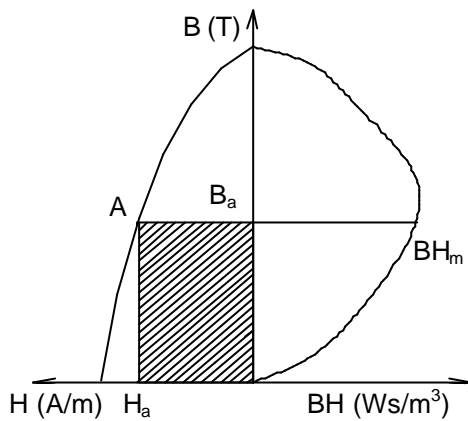
Površina obuhvacena histerezom znaci ustvari akumuliranu energiju magnetiziranja, koja je zadržana u materijalu, a to su ustvari gubici magnetiziranja.

Osim staticke postoji i dinamička petlja histereze. Razlika je u tome što dinamička petlja histereze obuhvaca i dodatne gubitke zbog magnetske tromosti materijala. Viša frekvencija - šira petlja histereze.

Ove velicine su za razne materijale veoma razlicite, od vrlo malih do vrlo velikih. Indukcija zasicenja

(B_m) može biti od nekoliko dijelova Tesla pa do preko 2 Tesla, isto tako i remanencija (B_r), a koercitivna sila (H_c) se kreće od nekoliko desetinki A/m pa do stotinjak kA/m. Koercitivna sila je ujedno velicina po kojoj se magnetski materijali u primjeni dijele na meke, koji imaju male koercitivne sile i tvrde koji imaju velike koercitivne sile.

1.2.4 Faktor izbocenosti



slika 6 Energetski produkt

Kod trajnih magneta (tvrdi magnetski materijali) koristi se drugi kvadrant petlje histereze, koji je za nas interesantan. On ustvari predstavlja akumuliranu energiju u magnetskom materijalu. S tim u vezi važan je faktor izbocenosti, slika 6, (f_i) definiran kao:

$$f_i = \frac{(BH)_m}{B_r H_c}$$

gdje je:

$(BH)_m$ = maksimalni energetski produkt

B_r = remanentna magnetska indukcija

H_c = koercitivna sila

Želja je radnu točku uvijek smjestiti na mjesto maksimalnog energetskog produkta.

1.2.5 Faktor pravokutnosti

Faktor pravokutnosti definiran je kao omjer remanentne indukcije i indukcije zasícenja

$$f_p = \frac{B_r}{B_z}$$

1.2.6 Gubici kod magnetiziranja

Gubici magnetiziranja dijele se u dva dijela, i to gubitke histereze i gubitke vrtložnih struja. Gubici histereze ovise o magnetskim svojstvima materijala (širina petlje histereze, permeabilitet, magnetsko kašnjenje), a gubici vrtložnih struja ovise o električkim svojstvima materijala (specifični električni otpor). gubici histereze

$$N_h = \eta f B_m^2$$

gubici vrtložnih struja

$$N_v = \sigma f^2 B_m^2 \quad \sigma = \kappa \frac{a^2}{\rho}$$

gdje je

η , σ i κ konstante materijala

B_m = maksimalna indukcija do koje je izvršeno magnetiziranje

f = frekvencija struje magnetiziranja

a = površina kroz koju se zatvaraju vrtložne struje

ρ = specifični električni otpor

sveukupni gubici magnetiziranja su znaci

$$N = N_h + N_v = \eta f B_m^2 + \sigma f^2 B_m^2$$

Iz ovih formula je vidljivo da su gubici vrtložnih struja narocito opasni kod visokih frekvencija, jer rastu s kvadratom frekvencije. Ujedno je vidljivi i nacin borbe protiv njih, a to su smanjenje površine kroz koju se zatvaraju vrtložne struje (lameliranje jezgre) te povecanje specifičnog otpora (upotreba legura).

1.2.7 Magnetostrikcija

Magnetostrikcija je promjena dimenzije magnetskog materijala pod utjecajem i u ritmu narinutog magnetskog polja

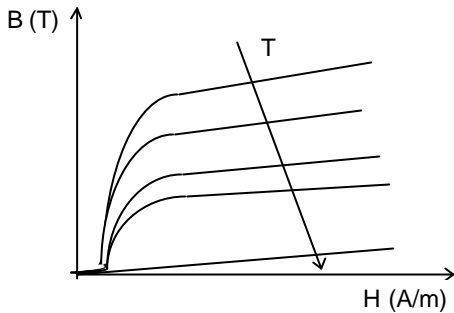
$$\frac{\Delta l}{l} = f(H)$$

1.2.8 Magnetoelasticnost

Magnetoelasticnost je svojstvo magnetskog materijala da pod utjecajem mehanickih sila mijenja svoja magnetska svojstva (permeabilitet, indukciju zasicenja)

$$B_m = f(p)$$

1.2.9 Toplinska ovisnost krivulje magnetiziranja



Porastom temperature slabe magnetska svojstva materijala. Indukcija zasicenja pada, krivulja se linearizira, slika 7, da bi pri određenoj temperaturi prerasla u pravac, te se materijal počeo ponašati kao paramagnetski materijali. Taj proces je reverzibilan, jasno ako materijal nije prethodno termicki obraden, kako bi se dobila neka specijalna struktura u svrhu poboljšanja magnetskih svojstava, te nakon hladenja materijal poprima svoja prethodna svojstva. Ukoliko je materijal bio prethodno termicki obraden, trajno gubi svojstva postignuta tom obradom.

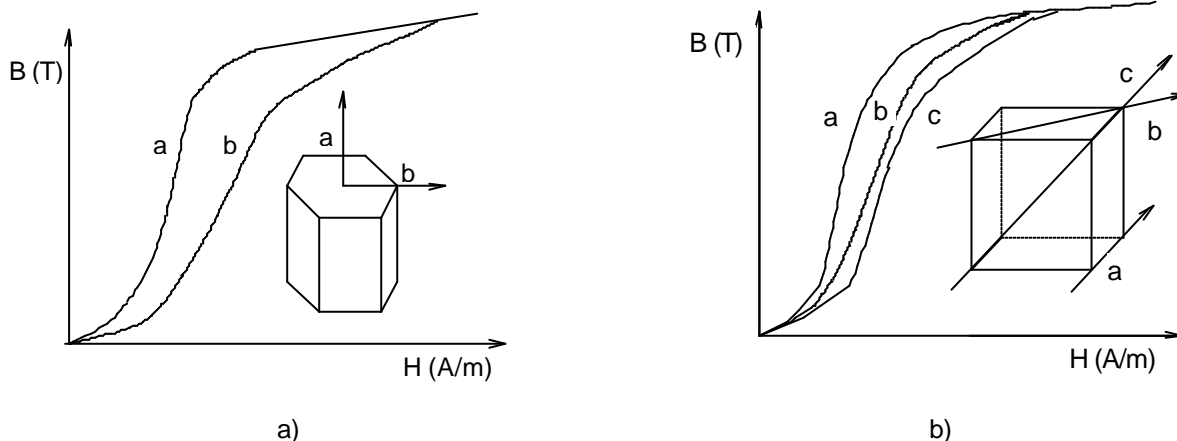
Temperatura kod koje se feromagnetski materijal počeo ponašati kao paramagnetski naziva se Curieva točka ili Curieva temperatura a za pojedine feromagnetske elemente iznosi kako je pokazano u tablici 3.

tablica 3 Curieve temperature

Element	Željezo (Fe)	Kobalt (Co)	Nikal (Ni)	Gadolinij (Gd)
Temperatura (°C)	769	1125	356	16

Iz navedenih temperatura je vidljivo zašto gadolinij pri normalnim temperaturama slabo pokazuje feromagnetski efekt, i ima malu prakticnu vrijednost

1.2.10 Magnetska anizotropija



slika 8 Magnetska anizotropija za kobalt (a) i željezo (b)

Magnetska anizotropija je ovisnost magnetskih svojstava magnetskog materijala ovisno o smjeru djelovanja magnetskog polja na njegovu os. Tako možemo vidjeti da kristal kobalta, slika 8 a, ima heksagonalnu kristalnu rešetku i dva karakteristica smjera magnetiziranja, te kristal željeza koji ima kubnu kristalnu rešetku i tri karakteristica smjera magnetiziranja slika 8 b

1.2.11 Ostala ponašanja

Toplinska postojanost je razlicit pojam od temperaturene ovisnosti, a vezana je uz trajna magnetska svojstva, koja mogu nestati kao posljedica povišenih temperatura ili promjene temperatura koja izazivaju promjene u strukturi.

Kemijska otpornost je otpornost prema raznim kemijskim i tehnoklimatskim utjecajima.

Postojanost magnetskih svojstava prema drugim vanjskim utjecajima: udarci, vibracije takoder mogu mijenjati strukturu, a time i svojstva.

Tehnološka sposobnost je sposobnost oblikovanja limova i raznih oblika jezgara.

Osnovna primjena magnetskih materijala proizlazi iz elektromagnetskih pojava, koje se dešavaju u materijalu a to su:

- potjecanje struje prati magnetsko polje
- promjena polja inducira napon
- u izmjenicnom krugu javlja se induktivni otpor
- dolazi do mehanickog privlacenja magnetiziranih dijelova pod utjecajem polja

1.3 PODJELA

Magnetske materijale, odnosno magnetske jezgre sa stanovišta ponašanja pri magnetiziranju i razmagnetiziranju dijelimo na meke i tvrde magnetske materijale.

Nema precizne granice, ali u osnovi:

mekim magnetskim materijalima smatramo one u kojima vec veoma malo vanjsko magnetiziranje stvara veliki magnetski tok, a kad vanjsko polje nestane tok se gubi ili je zanemariv. Idealno bi bilo da nema histereze.

Tvrdim magnetskim materijalima smatramo one u kojima nakon magnetiziranja i uklanjanja vanjskog polja zaostane znacajan magnetski tok, pri cemu za tvrdocu nije bitno kako veliko magnetiziranje smo trebali da stvorimo taj tok.

U tvrdima magnetskim materijalima ostane znacajna akumulirana energija. Tok postoji i kad nema vanjskog uzbudnog polja. Idealno što šira histereza.

Razlika je dakle u:

- strmini krivulje magnetiziranja
- širini petlje histereze

a to znaci u μ i H_c . Razlika se može vidjeti vec po samom H_c (granica $\cong 1000$ A/m).

B_z i B_r nisu odlucujuci, odnosno nisu karakteristika po kojoj se može prepoznati meki od tvrdog magnetskog materijala.

μ i H_c su fizikalne velicine koje zavise jedna od druge i obrnuto su proporcionalne.

Zato meki magnetski materijali imaju veliki μ , i mali H_c , pri cemu je oboje važno za praksu, a tvrdi magnetski materijali imaju veliki H_c i mali μ koji nije važan za praksu.

1.4 OSNOVNE PRIMJENE I ZAHTJEVI NA MATERIJALE

1.4.1 Mekomagnetske jezgre

Upotrebljavaju se u istosmjernim i izmjenicnim magnetskim krugovima, raznih frekvencija, za transformaciju struje i napona, kao induktivni elementi:

- transformatori svih vrsta
- vecina elektricnih strojeva
- vecina releja
- elektromagneti
- polni nastavci

Zahtjevi na materijal su:

- strma krivulja magnetiziranja, veliki μ obavezno
- uska petlja, mali H_c obavezno
- veliki B_z , B_r poželjno
- mala temperaturna ovisnost
- dobra toplinska postojanost
- dobre tehnološke sposobnosti

ponekad: pravokutnost, linearnost, anizotropija

te za izmjenicne struje još i veliki ρ zbog vrtložnih struja

Pod tehnološkim sposobnostima smatramo mogućnost izrade lmove, tehnologiju praha, mogućnost lijevanja, štancanja, rezanja, dobro izoliranje

1.4.2 Tvrde magnetske jezgre

(Permanentni magneti)

Služe za trajne izvore magnetskog polja, bez vanjskog magnetiziranja kao što su

- zvucnici
- mali elektricni strojevi (dinamo, alternator)
- neki releji i slicno
- magnetski zapisi (trake)
- mjerni instrumenti

Zahtjevi na materijal su:

- široka petlja, veliki H_c obavezno
- veliki energetska produkt obavezno
- veliki faktor izbocenosti obavezno
- veliki B_z , B , poželjno
- mala temperaturna ovisnost
- velika toplinska postojanost
- anizotropija (ponekad)
- tehnološke sposobnosti, obicno su tvrdi, lijevanje, prah

Po svojim svojstvima materijal nije savršen, nego je bliže jednom ili drugom, a granica je velicina koercitivne sile otprilike 1000 A/m (U praksi su one mnogo veće ili mnogo manje)

1.4.3 Izvedbe jezgri

Obzirom na primjenu te na frekventno područje upotrebe magnetske jezgre se izvode u više izvedbi i to kao:

Masivne (kompaktne, pune), koje se izrađuju iz metala ili metalnih smjesa (legure, sinterizirani). Izrađuju se u potrebne oblike: lijevanjem, kovanjem, sinteriranjem

Primjena: mekomagnetske jezgre za istosmjerno magnetiziranje te tvrdomagnetske jezgre (permanentne magnete)

Lamelirane, limovi i trake debljine 0,02 do 1 mm, mogu biti paketirane ili motane

Primjena: mekomagnetske jezgre za izmjenicne frekvencije (od industrijskih 50 Hz do 100 kHz) moraju biti izolirane: papir, lak, oksidi, fosfati i drugi anorganski kemijski spojevi.

Praškaste, prividno masivne jezgre izradene iz smjese metalni prah + vezivo (nemagnetni materijal)

Primjena: mekomagnetske jezgre za visokofrekventnu tehniku, te kao permanentni magnetski materijali

1.5 PREGLED MATERIJALA

Iz prethodnog razmatranja je vidljivo da su to feromagnetski i ferimagnetski (feriti, oksidni magneti keramicki materijali). Katkada trebamo i nemagnetske materijale.

Cisti: Željezo (Fe), Nikal (Ni), Kobalt (Co) i Gadolinij (Gd) (spada u rijetke zemlje).

Upotrebljavaju se rijetko, jer ne daju optimalne rezultate.

Smjese metala (legure i sinterirani), upotrebljavaju se najviše i daju optimalne rezultate. Pri tome koristimo

- medusobne smjese feromagnetskih elemenata
- smjese feromagnetskih i ostalih
- smjese ostalih koje daju feromagnetske efekte

Feritni materijali, oksidi i drugi kemijski spojevi niza feromagnetskih i neferomagnetskih elemenata (suvremena rješenja)

1.5.1 Osnovne grupe materijala

Za meke magnetske materijale upotrebljavaju se:

- Tehnicki cisto željezo i meki celici
- Grupa ferosilicijskih legura
- Grupa feronikalnih legura
- Metalni i feritni materijali za praškaste jezgre

Za tvrde magnetske materijale upotrebljavaju se:

- Ugljicni i legirani celici
- Disperziono kaljene legure željeza
- Duktilne legure
- Specijalne legure (rijetke zemlje)
- Oksidni keramicki materijali

1.5.2 Materijali za meke magnete

1.5.2.1 Tehnicki cisto željezo i meki celici

Željezo treba biti kemijski što čistije (99.9%). Meki celici (0.05 do 0.1% C). Upotrebljavaju se specijalne vrste kao što su:

- ARMCO (dobiva se elektricnim taljenjem),
- ELEKTROLITSKO, elektrolizom,

KARBONILNO, u obliku sitnih kuglica (prah promjera 10μ), koji se dalje može sinterizirati.

Svojstva: $B_z = 2.16$ T, $H_c \cong 100$ A/m, $\mu_m \cong 6000$, $\mu_p \cong 300$

Upotreba samo kod istosmjernog magnetiziranja, zbog malog specifičnog otpora $\rho \cong 0.1$ $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$, releji, polni nastavci

Nikal i kobalt se čisti ne upotrebljavaju, nego kao jedna od komponenti u legurama.

1.5.2.2 Grupa ferosilicijskih legura

To je vrlo raširena grupa mekomagnetskih materijala naročito primjenjivih u području industrijskih frekvencija (50 odnosno 60 Hz). Kako je već prije receno borba protiv gubitaka zbog vrtložnih struja vodi se na dva načina, povećanjem specifičnog otpora i smanjenjem dimenzija (upotreba limova).

Utjecaj silicija (Si) na željezo je višestruk i to:

povećava specifični otpor ρ (5% Si povećava ρ s 0.1 na 0.65 $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$)

povećava permeabilitet μ

smanjuje koercitivnu silu H_c

smanjuje indukciju zasićenja B_m (s 2.16 na 1.9 T)

smanjuje gubitke magnetiziranja (gubitke vrtložnih struja zbog povećanog ρ , a gubitke histereze zbog manje H_c i većeg μ)

povećava krhkost, čime smanjuje obradivost (to je i uzrok ograničenja gornje granice dodatka Si.)

Vidimo i na ovom primjeru kako pri tehničkim rješenjima činimo kompromise. U cilju poboljšanja nekih bitnih svojstava slabimo neka druga svojstva. Ovdje smo smanjili gubitke magnetiziranja ali smo to platili manjom indukcijom zasićenja i težom obradom, pri čemu je prvi učinak daleko veći. U praksi imamo toplovaljane (do 4.5% Si) i hladnovaljane (do 3.5% Si) limove. Toplovaljani znači da su valjani na povišenoj temperaturi pa je zato i dozvoljen veći postotak silicija. Hladnovaljani limovi mogu biti neorijentirani (izotropni) i orijentirani (anizotropni), a toplovaljani su izotropni. Izotropni lim ima ista magnetska svojstva bez obzira na smjer valjanja, a anizotropni lim ima različita svojstva u odnosu na smjer valjanja. Naime hladnim valjanjem može se postići usmjerenost kristala u smjeru valjanja, pa će takav lim biti magnetski najmekši u tom smjeru, a magnetski će biti najtvrdi pod kutom od 45° stupnjeva na smjer valjanja. Takvi limovi će se upotrijebiti samo tamo gdje smo sigurni da magnetski tok uvijek ide u smjeru valjanja (transformatori). Inače izotropni hladnovaljani limovi imaju pred toplovaljanim slijedeće prednosti: površina im je glatka pa ih je lakše izolirati, a tanji sloj izolacije znači bolji faktor ispušne, što opet znači manja dimenzija za istu snagu.

Izolacija limova je različito izvedena. Najstarije izolacije su papirne, a novije izvedbe su lak te oksidi i sulfidi.

Debljine limova su: 0.3, 0.35, 0.5, 0.65 i 1 mm.

Gubici magnetskih limova daju se u W/kg pri indukciji 1 Tesla i 1.5 Tesla.

tablica 4 Usporedba hladno i toplo valjanih FeSi limova

lim	gubici 1 T (W/kg)	gubici 1.5 T (W/kg)	H_c (A/m)	B_m (T)	μ_p	μ_m
toplovaljani	$\cong 0.8 - 0.9$	$\cong 2$	$\cong 80$	$\cong 1.9$	$\cong 400 - 600$	$\cong 15000 - 20000$
hladnovaljani	$\cong 0.5$	$\cong 1$	$\cong 50$	$\cong 1.9$	$\cong 1500$	$\cong 40000 - 60000$

Slično područje upotrebe imaju i legure Fe/Si/Al (jako su krhke), Fe/Al (tanki limovi, legura otporna na habanje, mala B_m), Fe/Co (valjanje do nekoliko μ tek uz dodatak vanadija).

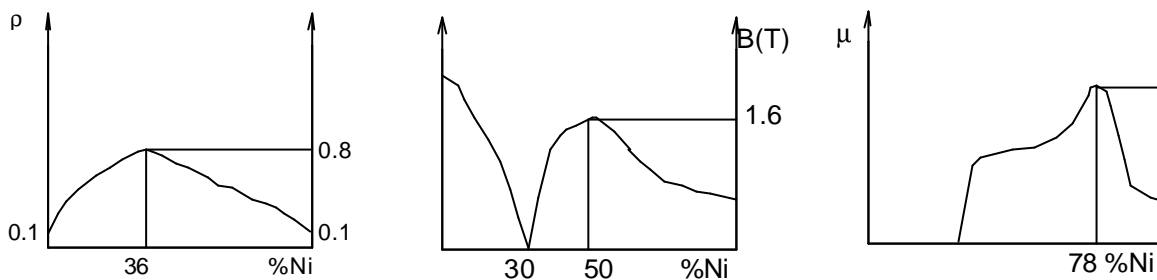
1.5.2.3 Grupa feronikalnih legura

Feronikalne legure spadaju među najpoznatije mekomagnetske legure. Kako se željezo i nikal mogu miješati u svim omjerima, slika 9, tako na raspolaganju imamo veliki izbor tih legura vrlo različitih svojstava. Ipak sve one spadaju među magnetski najmekše materijale. Naime nikal se i dodaje željezu prvenstveno zbog magnetskog omekšanja. Te legure osim toga imaju odlična tehnološka svojstva, te se iz njih daju valjati vrlo tanki limovi debljine do 0.02 mm. Kako se mogu dobiti tako male debljine, te legure imaju šire frekventno područje upotrebe, pa se mogu upotrijebiti sve do 100 kHz. Pri višim frekvencijama i u njima su preveliki gubici pa se za više frekvencije upotrebljavaju druga rješenja (prašaste jezgre). Izvanredna svojstva tih legura postižu se tek određenom toplinskom obradom, čime se zadržava određena struktura materijala. Zato su te legure osjetljivije na povišene temperature nego ferosilicijske. Ta ovisnost svojstava o toplinskoj obradi naziva se permaloj efekt i izraženiji kod legura koje imaju više nikla. Te legure su također osjetljive i na mehanicka naprezanja, o čemu treba voditi računa. Jezgre iz tih legura su često motane izvedbe. One se tek nakon konačnog oblikovanja toplinski obrađuju i to u magnetskom polju. Zato ako ih pokušamo preraditi gotovo sigurno ćemo im uništiti strukturu i na taj

nacin im pokvariti svojstva. Iako se željezo i nikal daju miješati u svim omjerima u praksi se upotrebljavaju tri grupe legura 36% Ni, 50% Ni i 78% Ni. Legure s manje od 30% Ni su jako nestabilne pa se ne upotrebljavaju. U grupi legura 78% Ni imamo i višestruku leguru uz dodatke (Mo, Cr, Co, Cu) koja se naziva supermaloj i ona je jedna od uopće magnetskih najmekših legura. Okvirni pregled svojstava dan je u tablici 5.

tablica 5 Okvirni pregled svojstava FeNi legura

sastav (% Ni)	ρ ($\Omega\text{mm}^2/\text{m}$)	H_c (A/m)	B_m (T)	μ_p	μ_m
36	$\cong 0.8$	$\cong 30$	$\cong 1.2$	$\cong 2000$	$\cong 10000$
50	$\cong 0.45$	$\cong 20$	$\cong 1.6$	$\cong 3000$	$\cong 35000$
78	$\cong 0.16$	$\cong 4$	$\cong 1$	$\cong 10000$	$\cong 100000$
supermaloj	$\cong 0.5$	$\cong 0.3$	$\cong 0.8$	$\cong 100000$	$\cong 1000000$



slika 9 Feronikalne legure: specifični otpori, indukcije i permeabiliteti

Uspoređujući međusobno ferosilicijske i feronikalne legure dobijemo sljedeće odnose dane u tabeli 6, pri čemu (+) za nas znači poželjnije (bolje), a (-) nepoželjnije (lošije) svojstvo

tablica 6 Medusobna usporedba ferosilicijskih i feronikalnih legura

legura	ρ ($\Omega\text{mm}^2/\text{m}$)	H_c (A/m)	B_m (T)	μ_p	μ_p	gubici	obrადivost	cijena
Fe/Si	manji -	veća -	viša +	manji -	manji -	veći -	lošija -	niža +
Fe/Ni	veći +	manja +	niža -	veći +	veći +	manji +	bolja +	viša -

Opet vidimo da biramo kompromisna rješenja. Kod velikih objekata, kao što su energetske transformatori i strojevi, a koji rade na niskim frekvencijama, prvenstveno su nam važni magnetska indukcija (zbog količine materijala) i cijena, te za to područje prednost dajemo ferosilicijskim materijalima, a kod viših frekvencija najveći problem su gubici zbog vrtložnih struja i tu prednost imaju feronikalne legure.

1.5.2.4 Praškaste mekomagnetska jezgre

Iznad 100 kHz, znači na najvišim frekvencijama daleko najveći problem predstavljaju gubici vrtložnih struja, te za to područje isključivo upotrebljavamo praškaste jezgre. Pri tome imamo dvije grupe praškastih jezgri

- metalne praškaste jezgre
- feritne (magneto keramičke) jezgre

Metalne praškaste jezgre

One su načinjene od mješavine metalnog feromagnetskog praha i veziva kao nemagnetskog materijala. Feromagnetski materijal se samelje u sitan prah, kuglice dimenzije nekoliko mikrona. Vezivo je termostabilna smola, koja je po svojim električkim svojstvima izolacijski materijal. Metalni prah miješamo s vezivom i tu smjesu oblikujemo u potrebne oblike, te nakon toga pečemo da smola polimerizira. Na taj način smo postigli to, da se vrtložne struje zatvaraju kroz vrlo male površine, ali smo istovremeno drastično smanjili permeabilitete i indukcije zasícenja. Permeabilitet se istovremeno linearizira i u slučaju metalnih praškastih jezgri govorimo o efektivnom permeabilitetu, koji ovisi jednom o izabranom materijalu te drugi puta o sastavu smjese, to jest odnosu količine veziva i metala.

pojednostavljena formula za efektivni permeabilitet dana je kao:

$$\mu_e = \frac{1}{\frac{1}{\mu} + \frac{\alpha}{3}}$$

α = postotak veziva

μ = permeabilitet feromagnetskog materijala

uz minimalnu količinu veziva od 2% (a u praksi ga uvijek mora biti više), te beskonacni permeabilitet, što također nije, nego je manji, efektivni permeabilitet bi iznosio 150. U praksi su efektivni permeabiliteti od 1.5 do 50.

Feritne (magneto keramičke) jezgre

Napravljene su od feritnih materijala, a to su razni oksidi. Ti materijali su u novije vrijeme gotovo potpuno potisnuli metalne praškaste jezgre. Pošto se radi o nemetalima ti materijali sami po sebi imaju velike specifične otpore reda 10^{12} veće od metala, pa su im i gubici vrtložnih struja daleko manji, tako da se mogu upotrebljavati i pri najvišim frekvencijama. Njihova opća formula je $MO * Fe_2O_3$, to jest smjesa željeznog oksida i oksida nekog dvovalentnog metala (MnO, CuO, MgO, CoO). To su takozvani jednostruki ili jednostavni feriti i njihovi permeabiliteti su oko 250 a B_m oko 0.7 T. Višestruki ili složeni feriti imaju permeabiliteete oko 6000 a B_m oko 0.4 T.

Izrađuju se tako da se razni oksidi samelju, smiješaju i sinteriziraju. Nakon toga se ponovo melju i oblikuju uz termičku obradu. svojstva osim o materijalima u velikoj mjeri ovise i o tehnološkom procesu proizvodnje (pritisci, temperature). Prednost pred metalnim praškastim jezgrama im je u: većem permeabilitetu, većem otporu i boljoj kompaktnosti.

Vidljivo je da cim imamo više frekvencije, veći je problem vrtložnih struja i sve veću važnost pri izboru materijala ima njegov otpor, i tom svojstvu podređujemo sva ostala svojstva.

1.5.3 Materijali za tvrde magnete

(Permanentni magneti)

Rekli smo da tvrdi magnetski materijali za svoj rad koriste akumuliranu energiju, koju je u njima preostala nakon magnetiziranja. Zbog toga želimo da je njihova petlja histereze cim šira, to znaci da im je koercitivna sila cim veća. Akumulirana energija magneta koristi u zračnom rasporu pa nam je za tvrde magnetske materijale interesantan drugi kvadrant krivulje magnetiziranja

$$HI + H_0 l_0 = 0 \quad H_0 = -\frac{HI}{l_0}$$

H = polje u materijalu, l = dužina materijala, H_0 = polje u zračnom zazoru a l_0 = duljina zračnog zazora
Velicine koje su interesantne kod permanentnih magnetskih materijala su B_r , H_c , $(BH)_m$ i f_i (faktor izbočenosti)

tablica 7 Interesantne velicine kod permanentnih magnetskih materijala

vrsta	H_c (kA/m)	B_r (T)	$(BH)_m$ (kWs/m ³)	f_i	H magnetiziranje (kA/m)
ugljični celici	4 - 20	$\cong 1$	1 - 8	0.4	64
disperzno kaljeni	10 - 50	0.5 - 1.2	10 - 50	0.9	240
duktilni	40 - 60	0.3 - 0.5	3 - 7	0.4	300
Co - rijetke zemlje	700	0.9	160	0.4	5000
oksidni	150	0.2 - 0.4	7 - 8	0.2	400

U tablici 7 su dane najvažnije grupe legura za permanentne magnete s orijentacijskim interesantnim vrijednostima.

1.5.3.1 Ugljični i legirani celici

To su najstariji permanentni magneti, relativno jeftini, ali male koercitivne sile pa su nestabilni i osjetljivi na vanjske utjecaje. Upotrebljavaju se kao zakaljeni materijali. Prije kaljenja se dobro obrađuju. Zbog male H_c moraju biti dugacki, a zbog malog energetskog produkta su za određenu akumuliranu energiju veliki. Osjetljivi su na povišene temperature, kada trajno gube svojstva.

1.5.3.2 Disperzno kaljeni

To su višestruke legure bez ugljika poznate pod trgovačkim nazivima ALNI (Al, Ni i Fe), ALNIKO (Al, Ni, Co i Fe), ALNIKOKU (Al, Ni, Co, Cu i Fe). To su suvremene legure veoma dobrih svojstava i trenutno su najraširenije u upotrebi. Tražena struktura i svojstva dobivaju se određenim termičkim postupcima, ali je ta struktura stabilna, pa su postojani na povišene temperature. Zbog dodatka aluminija su lakše, i otporne su na koroziju. Tvrdе su i krhke, obrađuju se lijevanjem, sinteriranjem i lijepljenjem njihovog praha nekim ljevilom. U tom slučaju gube nešto na svojim svojstvima.

1.5.3.3 Duktilni materijali

To su mehanicki najmekši permanentni magneti. Glavna prednost su im dobre tehnološke sposobnosti, pa se iz njih izrađuju proizvodi valjanjem, rezanjem štancanjem i to tanki limovi i žice. Poznati su pod nazivima KUNIKO, KUNIFE što pokazuje i njihov sastav (Cu, Ni, Co odnosno Cu, Ni, Fe)

1.5.3.4 Kobalt - rijetke zemlje

To su najsuvremeniji materijali čija je primjena u velikoj ekspanziji. Vec sada su to najkvalitetniji materijali, što se tice magnetskih svojstava, a još se na tom području vrše mnoga ispitivanja i poboljšanja. Ocita rezerva krije se u malom faktoru izobocenosti, koji se nastoji povećati. Po svojim tehnološkim svojstvima slične su disperzno kaljenim legurama ali su još krutije i osjetljivije na udarce. Obraduju se lijevanjem, sinteriranjem i lijepljenjem, pri čemu je najaktualnije sinteriranje. U tom području dolazi se svakodnevno do novih rješenja. Rijetke zemlje su lantanidi (Mendeljeva tablica od rednog broja 57 do 71). Ovi magneti se upotrebljavaju za male magnete, mjerne instrumente, u svemirskoj tehnici, kao magnetski ležajevi i sl.

1.5.3.5 Oksidni magneti

(Feriti, Keramicki magneti)

To su mješavine raznih oksida sa željeznim oksidom. Prednost im je veliki otpor i mala težina, a nedostatak toplinska osjetljivost. Upotrebljavaju se za magnetske zapise nanese na neki nosac.

Osim ovih grupa postoji još citav niz permanentnih magnetskih materijala, kao što su: Co Pt za minijaturne magnete zatim Hessler-ove legure (Mn, Al) ili (Mn, Bi, Cu) koje kako vidimo nemaju ni jedan feromagnetski element, te mnoge druge.

Važno je voditi računa o tome da prilikom magnetiziranja trajnih magneta moramo ici duboko u zasićenje što znaci da nam H_m (maksimalno polje magnetiziranja) mora biti $\cong 5 H_c$