

VISOKOREMANENTNI Sr-HEKSAFERITI ZA MOTORSKE APLIKACIJE

Andrej Žnidaršič, Andrej Železnikar, Marjeta Limpel

Ključne besede: sr-heksaferiti, trajni magneti, magnetne lastnosti, remanenca, koercitivnost, magnetne izgube, temperaturne izgube, elektro-motorji

POVZETEK: Prikazan je vpliv osnovnih magnetnih lastnosti na kvaliteto anizotropnih stroncijevih heksaferitov s poudarkom na razmagnetilnih učinkih pri uporabi magnetov v motorjih. V skladu z zahtevami tržišča je bila razvita in v redno proizvodnjo vpeljana višja kvaliteta. Z ustreznim reciklažnim postopkom pa smo rešili ekonomski in ekološki problem izmeta.

HIGHREMANENCE Sr-HEXAFERRITES FOR MOTOR APPLICATIONS

Key Words: Sr-hexaferrites, Permanent Magnets, Magnetic Properties, Remanence, Coercivity, Magnetic Losses, Temperature Dependence, Electric Motors

ABSTRACT: We are presenting the influence of basic magnet properties on quality of anisotropic Sr-hexaferrites, specially the influence of demagnetisation factor on magnets in motors. In accordance with demand of market we developed and put into the regular production higher quality of magnets. We also solved the economical and ecological problem of trash with suitable recycling process.

UVOD

Oksidni magnetni materiali, znani pod imenom trajni keramični magneti, so izdelani iz zmesi magnetnih oksidov. Njihova kristalna struktura je heksagonalna z osnovno kemično formulo $\text{MeFe}_{12}\text{O}_{19}$ ($\text{Me} = \text{Ba}, \text{Pb}, \text{Sr}$). Njihova značilnost je, da ne ustvarjajo energije, pač pa zaradi visoke remanence in dovolj visoke koercitivnosti ohranjajo induktivnost in funkcionirajo kot pretvorniki energije, brez izgube lastne energije ob pretvorbi.

Trajne keramične magnetne materiale (Ba in Sr heksaferiti) so pričeli množično uporabljati v enosmernih motorjih manjših moči pred približno tridesetimi leti. Sprva zelo previdno, pozneje pa so vse pogostejše v proizvodnji enosmernih električnih motorjev nadomestili elektromotorje s klasičnim navitjem. Prednost letih pred klasičnimi motorji je v linearni karekteristiki hitrost/moment, so lažji in manjši od klasičnega motorja, praktično neuničljivi (pri njih ni možna okvara motorja zaradi pregrevanja ali naravnega staranja, saj s časom ne izgubljajo magnetne energije) - razen v primeru, da dožive kakšne nenadne spremembe (npr.: zaradi temperaturnega šoka lahko počijo). So izredno varni, saj v primeru kakršnih koli napak ne more priti do prekoračitve hitrosti. Poleg tega pa so motorji s keramičnimi trajnimi magneti v primerjavi z ostalimi elektromotorji najcenejši, njihova montaža pa je najenostavnejša (lahko jih lepimo, ali pa jih pritrjujemo na okrove motorja s posebnimi sponkami). Zaradi vseh naštetih lastnosti so se motorji s trajnimi magneti izredno uveljavili na vseh tistih področjih, kjer je potrebna množična proizvodnja in potrošnja motorjev. To velja predvsem za avtomobilsko industrijo, kjer lahko vgradijo več kot 25 različnih motorjev s trajnimi magneti v en sam avtomobil (od brisalcev za stekla, do motorjev za dvigovanje stekel, starterjev, ipd.). Naslednji veliki potrošnik teh motorjev je industrija, ki potrebuje

motorje za nadzor določenih količin v aparaturah, ki jih izdeluje. In seveda industrija gospodinskih aparatov, kjer potrebujejo visoko zanesljive motorje, ki morajo biti tudi ceneni zaradi cene končnega izdelka.

V zadnjem času so se na tržišču trajnih magnetov pojavili materiali (Nd-Fe-B), kjer obetajo občutno znižanje cene na enoto magnetne energije in bodo morda postali cenovno primerljivi s feritnimi materiali, vendar pa bo potrošnja motorjev s trajnimi keramičnimi magneti še nadalje naraščala, saj se odkrivajo novi načini za uporabo teh magnetov (brezkrtačni, elektronsko komutirani enosmerni motorji, razni magnetni filtri, uporaba v računalniški industriji - od zapisov do pogonov ipd).

SVETOVNI TRENDI

Vzporedno s širjenjem uporabe pa proizvajalci trajnih keramičnih magnetov izboljšujejo kvaliteto materialov tako, da imamo na tržišču dve prevladujoči kvaliteti:

- a) visokoremanentne materiale z $B_r > 420 \text{ mT}$
- b) visokokoercitivne materiale z $iH_c > 320 \text{ kA/m}$

Vidimo, da praktično vsi proizvajalci ponujajo tako visokokoercitivne materiale, kot tudi visokoremanentne materiale. Slednje danes uporabljajo pri visoko obremenjenih motorjih, kjer želimo iz motorjev iztisniti največjo moč, medtem ko visokokoercitivne materiale uporabljajo pri motorjih z visokimi zagonskimi tokovi. V ta trend svetovnega razvoja se vključuje tudi Iskra Feriti, s svojimi materiali Elveperm. Poleg intenzivnega razvoja v smeri visoke remanence in visoke koercitivnosti, že nudimo materiale Elveperm 40 kvalitete, ki so poleg izvoza na zahodno tržišče namenjeni tudi domačim kupcem.

Tabela 1: primerjava materialov nekaterih proizvajalcev v svetu - kataloške vrednosti

Material	Br (mT)	iHc (kA/m)	(BH) _{max} (kJ/m ³)
FXD 520 Philips	> 420	> 250	> 33
FXD 500 Philips	> 400	> 310	> 30
FXD 580 Philips	> 375	> 325	> 26
FXD 380 Philips	> 380	> 260	> 27
OXIT 420 Thyssen	> 420	> 250	> 33
OXIT 400 HC Thyssen	> 390	> 360	> 28
RBX 420 Bosch	> 420	> 260	> 33
RBX 400 HC Bosch	> 375	> 370	> 28
Spinalor 8H Ugimag	> 385	> 350	> 28
Spinalor 8B Ugimag	> 420	> 250	> 34
Spinalor 6H Ugimag	> 380	> 280	> 27
Elveperm 40 Iskra	> 380	> 260	> 27
Elveperm 450 Iskra	> 380	> 330	> 27

OSNOVNE LASTNOSTI TRAJNIH KERAMIČNIH MAGNETNIH MATERIALOV

Kot vsi ostali trajni magnetni materiali, imajo tudi keramični trajni magnetni materiali histerezno krivuljo. Le-to predstavimo z dvema grafoma:

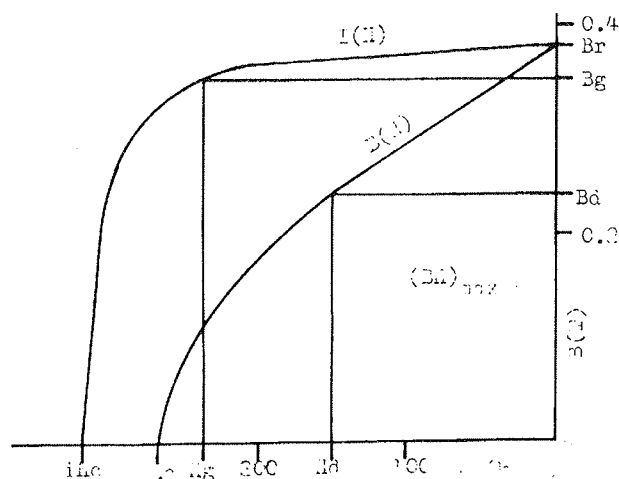
* grafom magnetizacije $I=f(H)$, ki nam dejansko predstavlja odziv materiala na spremembe zunanjega magnetnega polja

* in grafom magnetnega polja v materialu $B=f(H)$.

Zveza med njima je linearna in sicer:

$$B = I \cdot \mu_0 H \quad (1)$$

Na sliki 1 je predstavljena tipična histerezna krivulja in sicer samo drugi kvadrant te krivulje. Ko namreč magnetni material namagnetimo z neko nasičeno poljsko gostoto, ga z nasprotno usmerjenim poljem poskušamo razmagnetiti.



Slika 1: histerezna krivulja

Remanenca Br

Iz slike je jasno razvidno, da ima keramični magnetni material svojo spontano magnetizacijo, saj ob izključenem zunanjem magnetnem polju vsebuje določeno

magnetizacijo. Imenujemo jo remanenca (Br) in nam dejansko pove, kako uspešno smo usmerili osnovne gradnike magnetnega materiala v neko določeno smer. Material je namreč sestavljen iz drobnih gradnikov (Weissove domene), ki imajo trajen magnetni moment in je njegova vrednost odvisna zgolj od fizikalno - kemijskih lastnosti materiala (s pomočjo spinskih enačb je mogoče natančno določiti trajni magnetni moment stronicijevega oksida). Splošno velja, da so domene povsem statistično porazdeljene po vsem prostorskem kotu v materialu in brez vpliva zunanjega magnetnega polja je material povsem nemagneten. Pod vplivom zunanjega magnetnega polja pa se določen del domen usmeri v smeri tega polja in posledica je magnetni material. Govorimo o izotropnih materialih, katerih tipične vrednosti remanence znašajo 220 mT. Če želimo te vrednosti izboljšati, moramo v procesu izdelave magnetnega materiala doseči, da se večina domen že usmeri v želeno smer. Postopek imenujemo mokro stiskanje v magnetnem polju, pri katerem oksidno = feritno goščo (predhodno pomleto na določeno velikost delcev) stiskamo ob prisotnosti močnega zunanjega magnetnega polja. Delci v gošči sicer niso enodomenski, vendar težimo k temu, da bi to dosegli. Ti delci se torej usmerijo v smeri zunanjega magnetnega polja, kako uspešno smo jih usmerjali pa nam pove relacija:

$$Br = p \cdot A \cdot Bs \quad (2)$$

kjer predstavlja p poroznost materiala, A anizotropijo materiala in Bs nasičeno poljsko gostoto, ki bi jo material imel, če bi imeli opravka z idealno kristalno strukturo. Ta se v primeru oksidnih keramičnih magnetov lahko teoretično določi in znaša za Sr heksaferit 470 mT. Ob predpostavki, da je poroznost materiala zelo majhna (in se torej p približuje vrednosti 1!), vidimo, da na remanenco materiala vpliva predvsem faktor A. Za določene enostavne kristalne rešetke (npr.: FCC ali BCC) se da izračunati, v splošnem pa se njegova vrednost giblje:

A = 0.5 za izotropne materiale

A = 0.8 za večino anizotropnih materialov

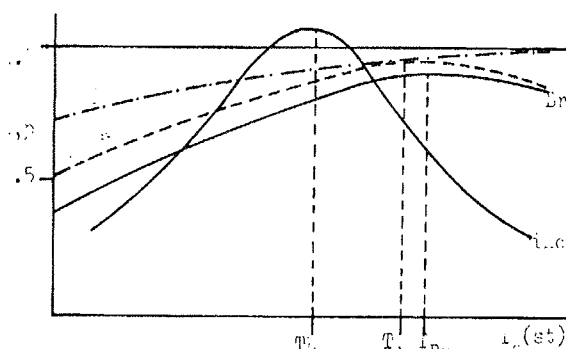
A = 0.9 za visokoremanentne anizotropne materiale

Tako odlično anizotropijo dosežemo ne samo s stiskanjem v močnem magnetnem polju, ampak je potrebno v osnovno sestavo dodati ustrezne kemične dodatke in sintrati material pri določeni temperaturi (slika 2).

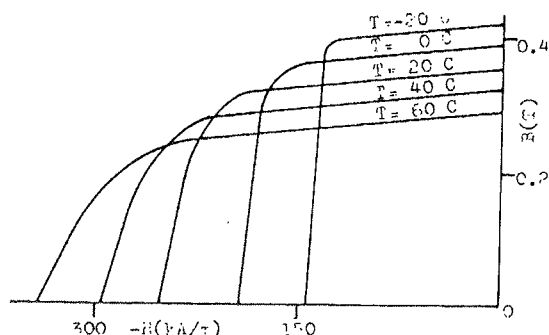
Najboljše vrednosti za Br dosežemo pri temperaturah, kjer faktor anizotropije že rahlo pada (največja vrednost produkta $p \cdot A$!).

Koercitivnost iHc

iHc je poleg remanence najpomembnejša količina pri trajnih magnetih, saj nam pove, kakšno zunanje polje potrebujemo, da magnet razmagnetimo. iHc je torej tista vrednost zunanjega polja, pri katerem je poljska gostota magneta enaka nič. Predstavlja energijo, ki je potrebna, da premaknemo prehodno območje (Blochova stena) med dvema Weissovima domenama. V tem prehodnem območju se orientacija trajnega magnetnega momenta enakomerno spreminja od 0° do 180° (v oksidnih mag-



Slika 2: odvisnost remanence od temperature sintranja (Ref.1)



Slika 3: odvisnost H_c od velikosti domen (Ref.1)

netnih materialih se sosednje domene orientirajo antiparalelno). Čim manjše so domene, tem več je prehodnih območij na enoto volumna, to pa pomeni, da moramo dovesti več energije, če želimo ta območja premikati. Iz slike 3 vidimo, da je za ustrezno visoke H_c potrebno izdelati material z drobnozrnato strukturo, kar pa povzroča težave v proizvodnji, saj je izredno težko stiskati silno drobne delce v magnetnem polju, ker se pojavi težava izločevanja vode iz takšne gošče. Poleg tega pri tako majhnih delcih obstaja nevarnost aglomeracije, kar pa lahko močno zniža vrednost remanence. Zato v redni proizvodnji stiskamo delce s povprečno velikostjo okoli $0.8 \mu m$ in se torej odločamo za kompromisno rešitev. Še enkrat se povrnimo k sliki 2, kjer je vrisan tudi potek spreminjanja H_c pri različnih temperaturah sintranja. Vidimo da vsako povečanje temperature nad T_h močno zniža H_c iz preprostega razloga, ker začno domene rasti.

V praksi izberemo takšen temperaturni režim sintranja in količino dodatkov nemagnetnega materiala, da ohrani-

mo ustrezno remanenco ali koercitivnost (odvisno od namena uporabe magnetov) - osenčeno področje na sl.2.

Energijski produkt (BH) max

Keramični oksidni magneti imajo shranjeno magnetno energijo, ki je tem večja, čim višja sta remanenca in koercitivnost. Določimo jo tako, da poiščemo maksimalno površino pod krivuljo $B(H)$ na sliki 1 (odvod funkcije enak nič). Teoretično bi bilo možno v oksidne magnetne shraniti energijsko gostoto $55 kJ/m^3$, vendar pa je ta v praksi dosti nižja in dosega vrednost $25 kJ/m^3$ v redni proizvodnji, oz. $35 kJ/m^3$ pri visokoremanentnih materialih. Energijski produkt nam definira delovno točko magnetov (H_d, B_d), ki je pomembna za razvijalce motorjev pri njihovem načrtovanju motorjev. Skupaj s točko (H_g, B_g) na sliki 1 nam energijski produkt poda informacijo o razmagnetilni krivulji, ki je zelo važen faktor pri delovanju motorjev s trajnimi magneti.

Izgube v oksidnih magnetih pri obratovanju motorja

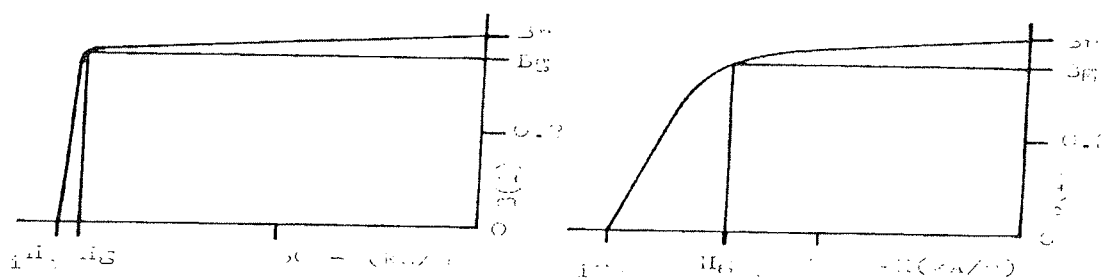
Pri obratovanju motorjev prihaja do razmagnetilnih učinkov na magnetih, ki so nameščeni kot statorji v motorju. To lahko statično predstavimo, kot da bi magnet poskušali razmagnetiti z nekim nasprotnim poljem. Na sliki 1 vidimo, da razmagnetilni tokovi do H_g praktično nič ne vplivajo na magnetno polje magnetov (ali le zelo neznatno). Pri tokovih, večjih od H_g pa nastopi razmagnetitev materiala, česar v motorjih seveda ne smemo dopustiti. Problem je sedaj, kako določiti H_g , da do izgub v magnetih ne bi prihajalo. V literaturi se podaja faktor:

$$b = H_g / H_c \quad (3)$$

ki predstavlja nekakšen indikator za pravokotnost histereznih krivulj. Če je namreč b blizu 1, to pomeni, da se H_g malo razlikuje od H_c , to pa zopet pomeni, da do H_c praktično nimamo razmagnetitja (slika 4).

V primeru slike 4b vidimo, da je do delnega razmagnetitja prišlo že pri nižjih vrednostih H , to pa pomeni, da takega magnetov ne smemo vzbujati s tako visokimi tokovi, saj bo prišlo do razmagnetitja.

Potrebno je poudariti, da z večjo debelino magnetov delno nevtraliziramo učinke razmagnetitja in je sprememba magnetnega pretoka zaradi razmagnetitja manjša (glej sliko 5), tako da praktično ni razmagnetitja, četudi je b samo 0.8.

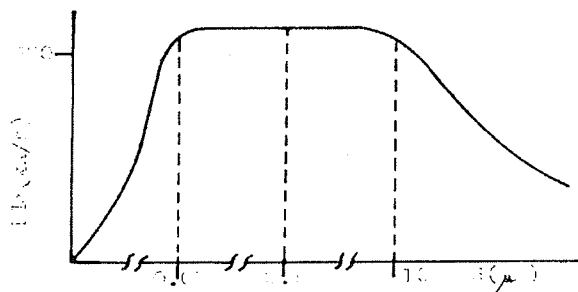


Slika 4: primerjava histereznih krivulj z a) $b=0.99$ in b) $b=0.7$

Vendar debeline magnetov ne moremo poljubno povečevati, saj smo omejeni z dimenzijami motorja. Praktično izdelujejo statorske segmente debelin (5 mm - 8 mm), ker so to dimenzije, ki so ekonomsko najbolj upravičene.

Temperaturna odvisnost oksidnih magnetov

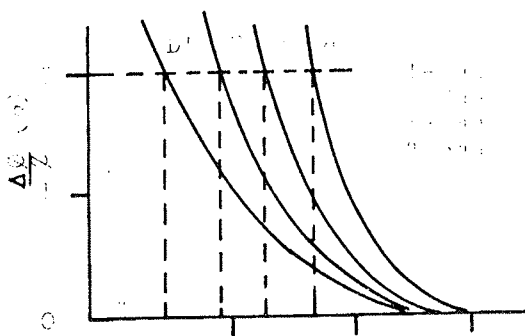
Magnetne lastnosti trajnih keramičnih magnetov so močno odvisne od temperature, pri kateri uporabljamo te magnetne. Na sliki 6 vidimo tipične demagnetizacijske krivulje za nekaj temperatur. Opazimo, da koercitivnost



Slika 5: odvisnost magnetnega pretoka od debeline magnetov (Ref.2)

s temperaturo narašča, remanenca pa pada. To pomeni, da je magnet pri višjih temperaturah bolj odporen na demagnetizacijske učinke (seveda mora imeti ustrezen magnetni pretok!), kot pri nizkih temperaturah. Odvisnost lahko ponazorimo z relacijo:

$$H_m(T) < (b \cdot iH_c(T) - (d \cdot Br(T)) / (\mu_0 \cdot D)) \quad (4)$$



Slika 6: odvisnost razmagnetilnih krivulj od delovnih temperatur

H_m s temperaturo hitreje narašča kot iH_c , kako hitro pa je odvisno od razmerja d/D

ki predstavlja razmerje med režo v motorju in debelino segmenta. Ker je slednja omejena, moramo torej imeti čim manjšo režo med statorskim in rotorskim delom motorja, sicer se nam lahko zgodi, da bo pri nizkih temperaturah prišlo do premočnega razmagnetjenja magnetov v statorju, saj bo H_m s temperaturo premočno padala. To je še posebno pomembno pri motorjih z visokimi zagonskimi tokovi (avtomobilski starterji), saj pri njih lahko pride do močnih razmagnetenj pri nizkih temperaturah. V primeru statorskih magnetnih segmen-

tov moramo torej imeti zelo pravokotno razmagnetilno krivuljo in seveda ustrezno visok iH_c , kar pa je izredno težko doseči, saj imajo visokokoercitivni materiali nižje vrednosti b . Rešitev v tem primeru iščemo v dvokomponentnih motorskih segmentih ali v povsem novih oblikah segmentov, vse z namenom, da se izognemo razmagnetjenju.

EKSPERIMENTALNI DEL IN REZULTATI

Na podlagi rezultatov, dobljenih na ravni razvoja, oz. pilotske proizvodnje, smo brez investicijskega vlaganja v obstoječo proizvodno linijo začeli s prenosom 40 kvalitete v redno proizvodnjo. S spremenjeno recepturo pogoji mešanja, kalciniranja in sintranja, smo pripravili več proizvodnih sarž, z uporabo domačih in uvoženih reciklažnih Fe_2O_3 , uvoženega kalcinata in dodatkov CaO , SiO_2 , $SrCO_3$ in B_2O_3 . Pripravljeni kalcinati so bili pomleti v kombinaciji predmetlja v periodičnih artritirjih ter končnega mletja v kontiartirirju. Pred stiskanjem v magnetnem polju je bila gošča starana, shomogenizirana in dekantirana na vsebnost vode 38-39%. Sintranje je potekalo vzporedno v proizvodnih pečeh, komorni in laboratorijski peči, sledilo je planparalelno brušenje vzorcev in merjenje magnetnih lastnosti na histerezo grafu Walker Scientific. Rezultati, dobljeni na pilotskih in proizvodnih saržah, kažejo, da je poleg optimalne sestave, mešanja, kalciniranja in mletja, sintranje odločilno pri doseganju stabilne 40 kvalitete. Pri sintranju se delci, ki so anizotropni že po svoji naravi, med preurejanjem uredijo tako, da se usmerjenost delno že usmerjene matrice še poveča. Pri kratkih časih sintranja dobimo dokaj enakomerno zrnato strukturo. V primerih daljšega časa sintranja pa prično zrna neenakomerno rasti, kar povzroči zmanjšanje koercitivne sile, ki je tesno povezana z velikostjo magnetnih zrn danega materiala.

Pri pravilnem sintranju, kjer je zelo pomembna enakomerna polnitev in obremenitev peči, lahko pri določenem atmosferskem in temperaturnem profilu izkoristimo vse možnosti, ki jih omogoča sestava in mikrostruktura danega materiala.

Dosežene elektromagnetne lastnosti pilotskih in proizvodnih sarž v odvisnosti od pogojev sintranja so prikazani v tabeli.

Poleg uspešnega prenosa višje kvalitete v proizvodnjo, smo veliko pozornosti posvetili tudi boljšemu izkoristku vhodnih surovin. Izmet, ki se pojavlja po proizvodnih fazah kot posledica raznih napak in okrušitev, smo z ustreznim drobljenjem začeli vračati v proizvodni proces. Proizvodne sarže smo sestavili tako, da smo ustrezni količini svežega kalcinata dodali drobljene sintrane odpadke z optimizirano količino dodatkov. Po mletju v periodičnih artritirjih in kočnem mletju v kontiartirirju smo izdelali material, ki po vseh parametrih ustreza 40 kvaliteti.

$$Br = 380 - 395 \text{ mT}$$

UPORABLJENE SUROVINE	PILOTSKE SARŽE	PROIZVODNE SARŽE
Fe ₂ O ₃ Banja Luka	Br = 385 - 395 mT	Br = 380 - 395 mT
	iHc = 270 - 300 kA/m	iHc = 270 - 295 kA/m
	(BH)max = 27 - 29 kJ/m ³	(BH)max = 27 - 28,5 kJ/m ³
Fe ₂ O ₃ Sidmar	Br = 390 - 405 mT	Br = 385 - 400 mT
	iHc = 270 - 290 kA/m	iHc = 265 - 290 kA/m
	(BH)max = 28 - 31 kJ/m ³	(BH)max = 27,5 - 30,5 kJ/m ³
Uvožen kalcinat	Br = 395 - 405 mT	Br = 390 - 405 mT
	iHc = 260 - 270 kA/m	iHc = 260 - 280 kA/m
	(BH)max = 28 - 31 kJ/m ³	(BH)max = 28 - 30,5 kJ/m ³

$$iHc = 275 - 295 \text{ kA/m}$$

$$(BH)_{\max} = 27,0 - 29,5 \text{ kJ/m}^3$$

Iz rezultatov je razvidno, da izmet, ki nastaja po proizvodnih fazah, lahko uspešno vračamo nazaj v proizvodni proces.

ZAKLJUČEK

Poleg vpeljave nove kvalitete Sr haksferita v redno proizvodnjo, s katero smo prodrli na zahtevno zahodnonemško tržišče, nadaljujemo razvojno delo:

- * v smeri zvišanja remanence $Br > 420 \text{ mT}$
- * v smeri zvišanja koercitivnosti $iHc > 340 \text{ kA/m}$

Pričakujemo, da bomo z optimiranjem kemijske sestave in tehnološkega procesa, kmalu lahko ponudili nove kvalitete domačim in tujim kupcem.

LITERATURA

1. A. Mohr: The Significance of the Rectangular Form of the Demagnetisation Characteristic in the Design of Magnets for Small Motors; Magnets in your future, nov 1986 p 12-20
2. A. Mohr, V.König: The Effect of Remanence and Coercivity on the Power to Volume Ratio and Efficiency of Small Permanent Magnet Motors; Magnets in your future, okt 1986 p 6-18
3. A. Mohr: Influence of the Direction - Dependent Transverse Stability of Ferrite Permanent Magnet Materials on the Design of Highly Loaded Electric Motors, Magnets in your future, okt 1986 p 19-26
4. H. Zijlstra: Application of Permanent Magnets in Electromechanical Power Converters
5. F.J.A. Den Broeder, P.E.C. Franken: The Microstructure of Sintered Strontium Hexaferrite with Silica Addition, investigated by ESCA and TEM; ADV CE Vol. 13, p 494-501

Andrej Žnidaršič, dipl.ing.kem
Andrej Železnikar, dipl.ing.fiz.
Mag.Marjeta Limpel, dipl.ing.kem.
 ISKRA ELEMENTI - FERITI
 Stegne 19
 Ljubljana

Prispelo: 09.05.1989 Sprejeto: 02.06.1989