A XIII-a Conferinţă Naţională multidisciplinară – cu participare internaţională,
"Profesorul Dorin PAVEL – fondatorul hidroenergeticii româneşti",
SEBEŞ, 2013

APLICAŢII ALE MAGNEŢILOR PERMANENŢI ÎN INDUSTRIE. MAGNETUL PERMANENT. ALEGERE. STABILITATE

Dragoş POPA, Dragoş NĂSTASE

APPLICATIONS OF PERMANENT MAGNETS IN THE INDUSTRY. PERMANENT MAGNET. CHOICE. STABILITY

These second papers try to describe the behaviour of permanent magnets in front of the influence of different perturbation against them, and few methods to limitate or eliminate their effect. We've talked about magnetic stability and we tryed to plot the behaviour in time of permanent magnets for different work temperature.

Cuvinte cheie: magneți permanenți, temperatură de lucru, pământuri rare, performanțe
Keywords: permanent magnets, working temperature, rare earths, performing

1. Introducere

Unul dintre factorii importanţi în alegerea unui magnet permanent pentru a fi utilizat în industria aeronautică este temperatura de lucru. In acest sens cercetarile şi experimentările întreprinse în ICPE în domeniul magnetilor NdFeB pentru îmbunătăţirea stabilităţii cu temperatura a caracteristicilor magnetice au evidenţiat faptul că, prin selectarea şi controlul corespunzator al nivelului substituţiei Fe cu Co şi

Al, precum şi a adaosului de Dy[4], se pot obţine magneţi cu câmp coercitiv ridicat, Hci = 1280 kA/m, ce asigură magneţilor energii specifice mari, (BH)max = 260 kJ/m^3, precum şi stabilitate termică ridicată, respectiv coeficient reversibil de temperatură al inductiei (B) = -0,10 (%/ ºC). Rolul Co este de a determina creşterea temperaturii Curie, a Al de a compresa scăderea câmpului coercitiv datorată prezenţei Co, iar Dy contribuie de asemenea la creşterea câmpului coercitiv prin creşterea câmpului de anizotropie al fazei magnetice tetragonale. Aceste contribuţii combinate au permis obţinerea de magneţi în sistemul NdDyFeCoAlB cu stabilitate termică ridicată şi temperaturi de utilizare mari, în jurul a 150 ºC.

În tabelul 1 sunt prezentate caracteristicile magnetice, precum şi pierderile ireversibile pentru câteva tipuri de magneţi NdFeB realizaţi în ICPE.

Tabelul 1

Compoziţia	B_r [T]	H_c [kA/m]	H_{ci} [kA/m]	(BH) max kJ/m^3	p_{irev} la 100 ºC, l/d =0,5 [%]
$Nd_{15}Fe_{77}B_8$	1,26	660	740	300	23
$Nd_{15}Fe_{61,5}Co_{16}Al_4B_{9,5}$	1,18	460	660	190	6
$Nd_{15}Fe_{70}Co_5Al_4B_6$	1,15	550	680	200	8
$(NdDy)_{16,5}Fe_{77,5}B_6$	1,08	750	880	230	9
$(NdDy)_{16,5}Fe_{68,5}Co_5Al_4B_6$	1,14	900	1080	260	2
$Nd_{13,5}Dy_{2,5}Fe_{71,5}V_{5,5}B_9$	1,10	750	1400	230	2

2. Efectul temperaturii asupra magneţilor permanenţi cu pământuri rare

La temperaturi ridicate, caracteristicile magneţilor permanenţi se modifică, temperatura având ca efect pierderi ale fluxului magnetic. În general, se pot distinge următoarele tipuri de pierderi:

- *pierderi reversibile ale inducţiei* datorate dependenţei de temperatură a magnetizaţiei (M) la saturaţie (în general prin analogie se calculează coeficientul reversibil al inducţiei remanente dependent de

[4] Dy – Disprosiu (simbol Dy) este elementul chimic cu numărul atomic 66. A fost descoperit de Paul Emile Lecoq de Boisbaudran în 1886. Masa atomică: 162,5 g/mol; Densitatea la 20 °C: 8,56 g/cm³; Punctul de topire: 1409 °C; Punctul de fierbere: 2335 °C; Numerele de oxidare: 3,4; Electronegativitatea: 1,72; Structura cristalină: hexagonală; Starea naturală: 4,2-0,00001 %. Serie chimică: Lantanide.

magentizarea spontană M_S). Aceste pierderi sunt anulate prin revenirea la temperatura iniţială, pierderile putând fi exprimate prin coeficientul de temperatură al inducţiei remanente, respectiv al magnetizaţiei. Pierderile reversibile trebuie luate totdeauna în consideraţie şi trebuie făcute calcule în vederea utilizării magneţilor la temperaturi mai mari decât cea ambiantă.

- *pierderi ireversibile* - determinate de dependenţa de temperatură a câmpului coercitiv, H_{ci}. La temperaturi ridicate, câmpul coercitiv scade şi magnetizarea diverselor domenii poate fi inversată determinând pierderi ireversibile ale inducţiei magnetice. Aceste pierderi există şi după revenirea la temperatura iniţială, ele putând fi eliminate printr-o nouă magnetizare. Pierderile ireversibile depind de valoarea câmpului coercitiv, de dependenţa sa de temperatură, precum şi de punctul de lucru al magnetului ($B/\mu_0 H$). Variaţiile ireversibile pot fi prevenite printr-un tratament termic de stabilizare.

- *pierderi iremediabile* ale inducţiei datorate deteriorării suprafeţei magnetului, oxidării, modificării structurale.

Coeficientul reversibil al magnetizaţiei în raport cu temperatura, poate fi măsurat şi calculat funcţie de câmpul magnetic aplicat pentru magneţii perfect anizotropi tip $Nd_2Fe_{14}B$, Sm_2Co_{17} si $SmCo_5$.

Coeficientul reversibil al temperaturii caracterizează stabilitatea la temperatură a magnetizaţiei magneţilor permanenţi şi, în general este definită prin magnetizaţia[5] remanentă sau magnetizaţia de saturaţie. În practică este definit, în general, ca fiind:

$$\alpha_M = \frac{M(100^o C) - M(20^o C)}{M(20^o C).80K}.10^6 \qquad \text{(ppm/K)}$$

În practică, se pot reduce pierderile ireversibile într-un circuit cu magneţi permanenţi prin alegerea unui material magnetic cu o curbă de demagnetizare B(H) dreaptă şi un câmp coercitiv mare la temperatura ambiantă.

Stabilitatea este realizată dacă punctul de lucru al circuitului se află, la temperatura de utilizare, deasupra câmpului critic. Magneţii tip $SmCo_5$ și Sm_2Co_{17} posedă o bună stabilitate termică până la aproximativ 250 ^{0}C, respectiv 300 – 350 ^{0}C.

[5] Se numeşte stare de magnetizaţie acea stare a corpurilor care determină exercitarea asupra lor a unor forţe şi cupluri magnetice suplimentare faţă de cele determinate de eventuala lor stare electrocinetică. Corpurile magnetizate produc câmp magnetic în jurul lor.

Performanţele magneţilor NdFeB la temperaturi ridicate sunt limitate datorită temperaturii Curie scăzute, T_C ~ 310 ^{0}C, efectul fiind acela al descreşterii proprietăţilor magnetice cu temperatura, în special a câmpului coercitiv intrinsec H_{Ci}. Studiile întreprinse pentru a vedea efectul diverşilor aditivi asupra proprietăţilor intrinseci ale compusului $Nd_2Fe_{14}B$ au găsit soluţii practice care permit utilizarea magneţilor NdFeB până la aproximativ 200 ^{0}C.

În multe aplicaţii sunt necesare temperaturi extreme, ridicate sau coborâte, de aceea este necesar ca proiectanţii să cunoască pierderile ireversibile ale fluxului după o primă încălzire sau răcire şi de asemenea pierderile ulterioare la temperatură ridicată sau coborată. Este prezentat un studiu al dependenţei de temperatură şi perioada de expunere la temperatură ridicată pentru fluxul magnetic (circuit deschis), figura 3, precum şi a curbelor de demagnetizare, figura 4.

În practică, pierderile ireversibile de 5 % sunt acceptabile, dimensiunile magneţilor şi temperatura de funcţionare trebuind să fie limitate. În orice circuit magnetic trebuie luat în considerare efectul global al expunerii la temperaturi mai mari de 100 ^{0}C asupra câmpului coercitiv, H_c, câmpului coercitiv intrinsec, H_{Ci}, şi inducţiei remanente, B_r. Se poate spune de asemenea că pierderile ireversibile la temperatură ridicată sunt invers proporţionale cu valoarea câmpului coercitiv al inducţiei, H_{cB}, pentru fiecare tip de material.

Din figura 3 se poate observa relaţia directă dintre pierderile de flux în timp (> 1h), funcţie de temperatura de expunere şi permeanţă. Pierderile sunt dependente de valorile H_{cB} şi H_c, astfel încât magneţii din acelasi tip de material, dar cu caracteristici magnetice mai bune vor avea pierderi mai reduse. În figura 1 sunt prezentate curbele de demagnetizare înainte şi după expunerea la temperatură ridicată funcţie de tipul magnetului şi geometria acestuia. Combinând efectul datorat pierderilor ireversibile cu cel al expunerii la temperatură ridicată, se poate spune ca în condiţii de temperatură < 100 ^{0}C sunt acceptabile toate tipurile de materiale prezentate. Se observă de asemenea ca valorile H_{cB} ramân aproape constante (modificări <10 %), chiar după expuneri de 5000 ore forma curbei de demagnetizare rămâne aproape neschimbată. Din cele prezentate, se constată ca magneţii cu punct de permeanţă ridicat creează pierderi ireversibile acceptabile, < 3 %, pentru temperaturi în intervalul 75 – 125 ^{0}C după prima oră de expunere. Odată cu descreşterea permeanţei şi creşterea temperaturii, se pot observa pierderi ridicate, acest lucru putându-se observa şi în

cazul magneţilor ce conţin Dy. Adiţii de Co și Dy determină scăderi ale pierderilor iniţiale < 0,5 % la aceeaşi temperatură.

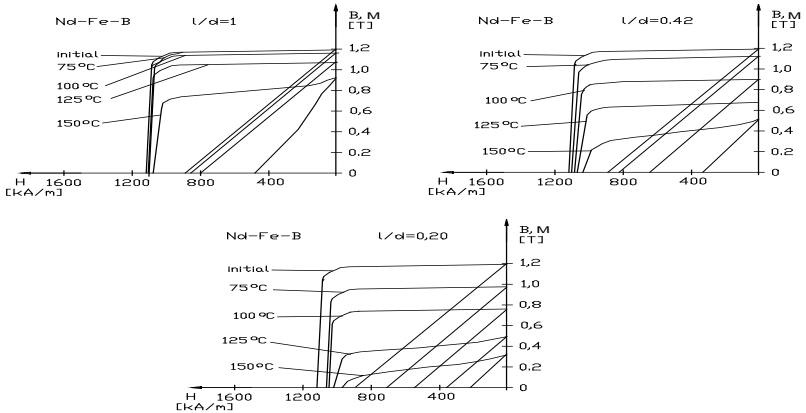
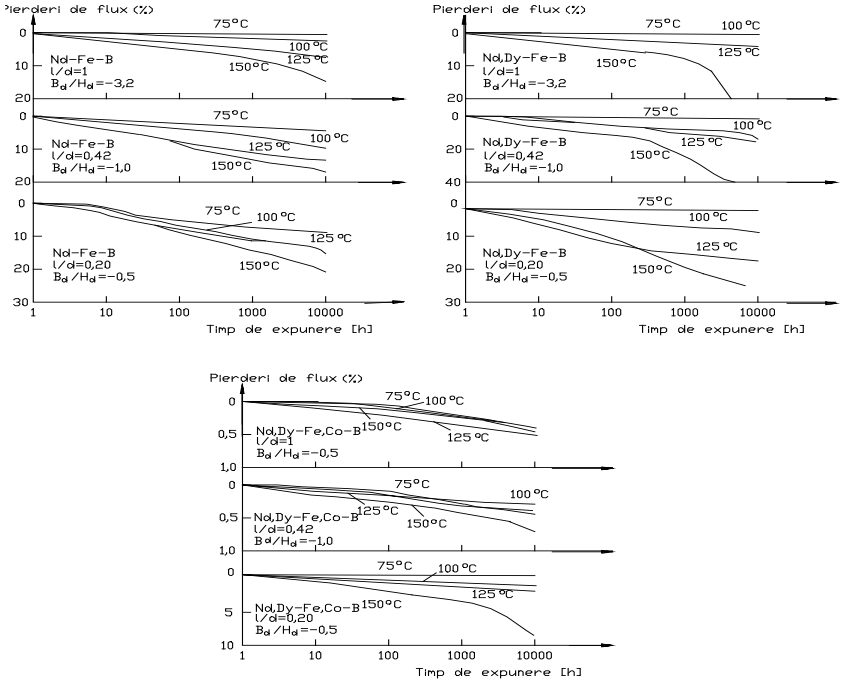


Fig. 1 Stabilitatea termică pentru perioade > 5000 h, în circuit deschis, ale fluxului funcţie de temperatura de expunere 75 – 150 ^{0}C şi permeanţă



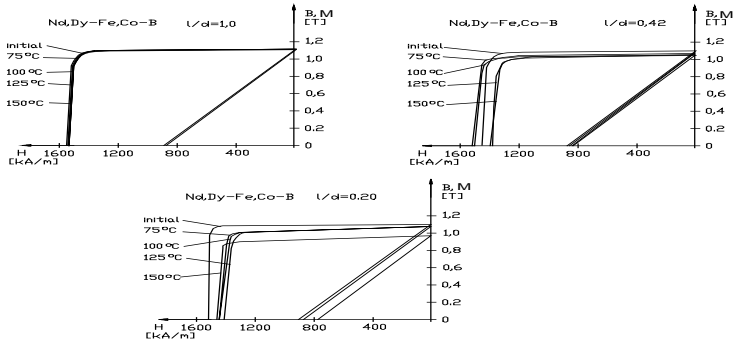


Fig. 2 Modificarea curbelor de demagnetizare după un timp >5000 h, funcţie de compoziţia materialului, temperatură, raportul l/d ce dă permeanţa circuitului deschis B/H = -3,2; -1,0, -0,5

Pentru a evita efectul corodării, se recomandă în general o acoperire ca protecţie a suprafeţei magneţilor. Acoperirile sunt aplicate magneţilor tip NdFeB pentru a satisface următoarele cerințe: ● protecţia anticorozivă necesară în cazul în care există un pericol de deteriorare într-un mediu agresiv. Compoziţia aliajului utilizat este foarte importantă în comportarea magneţilor permanenţi cu pământuri rare pe bază de PRFeB la o influenţa corozivă, cea mai mare importanţă având-o modul de prelucrare a suprafeţei; ● măsura de protecţie, care este predominantă, deoarece se recomandă absenţa particulelor detaşabile, un exemplu îl constituie utilizarea magneţilor pentru cititoare de disc.

Câteva metode de realizare a acoperirilor de protecţie:

a) ***Acoperirea cu răşina epoxi prin electroforeză***. Cu aceasta metodă se poate aplica un strat de raşina epoxi (ca un lac) pe magneţi de toate formele şi dimensiunile.

b) ***Acoperirea prin galvanizare***. Prin această metoda se realizează o acoperire metalică a magnetului, printr-o depunere electrolitică, depunerea metalului făcându-se la aplicarea unui c.c. soluţiei, care are ca efect migrarea ionilor de metal, determinând un strat acoperitor aderent la suprafaţa magnetului.

c) ***Acoperirea chimică***. Metoda acoperirii chimice este similară galvanizarii, cu excepţia faptului ca nu mai este necesară aplicarea unui curent electric pentru a ajuta depunerea, depunerea fiind un rezultat al reducţiei chimice a sării de metal în soluţie, care este catalizată prin metalul ce se depune.

d) ***Incapsularea*** - Alegerea materialului de încapsulare depinde de forma, dimensiunile şi utilizarea magnetului. În acest sens

firma Vacuumschmelze utilizează tabla de otel inoxidabil de grosime 0,5 mm, aceasta pentru a realiza un întrefier cât mai mic, tablele sunt sudate cu laser. Dificultatea acestei operatii constă în realizarea unei foarte bune etanşeităţi pentru dimensiuni mici ale magneţilor, la nivelul sudurii. Acest procedeu are avantajul de a putea realiza etanseizarea sistemelor deja magnetizate. Pentru încapsulare se poate utiliza şi polietilena şi polivinilul, materialele plastice fiind rezistente în condiţii dificile.

e) ***Depunerea fizica de vapori*** - aceasta metoda presupune aducerea unui metal din starea solida, prin cresterea temperaturii, în starea lichida şi apoi în stare gazoasă. Aceasta poate fi împarţită în trei categorii principale: evaporare termică, picatură şi acoperire ionică, diferenţa între cele trei metode constând în modul în care depunerea aderă la suprafaţă.

f) ***Depunerea chimică de vapori*** - este o metodă care utilizează o reacţie chimică pentru a produce acoperirea. Depunerea chimică de vapori constă din reacţia unui gaz ce trece peste o suprafaţa încălzită, pe care se formeaza stratul depus. În acest proces cel mai utilizat gaz este hidrogenul, se mai folosesc gaze inerte cum ar fi argonul.

g) ***Pulverizarea*** - constă în depunerea unui strat metalic sau ceramic prin pulverizarea unui lichid care se solidifică la suprafata magnetului, formând un strat dens şi foarte aderent.

6. Concluzii

■ S-a prezentat un studiu privind influenţa diferiţilor factori asupa magneţilor permanenţi pe bază de pamânturi rare (temperaturţ, câmpuri demagnetizante, solicitări mecanice, coroziune, radiaţii, efectul relaxării şi vâscozităţii), precum şi unele metode pentru preîntâmpinarea efectelor negative ale acestora.

■ În cercetările ce se fac în vederea realizării magneţilor permanenţi, se urmăreşte atât creşterea performanţelor magnetice ale acestora (inducţie remanentă, câmp coercitiv, energie specifică maximă), cât şi a temperaturii maxime de utilizare şi a rezistenţei faţă de diverşi agenţi corozivi.

■ Temperatura maximă de utilizare pentru magneţii tip NdFeB, 100-180 ºC. Creşterea temperaturii maxime de funcţionare, practic mărirea stabilităţii la temperatură se realizează în general prin înlocuirea parţială a elementelor compusului de bază sau doparea acestuia cu alte elemente de tranziţie. Pentru magneţii NdFeB stabilitatea ridicată la temperatură se obţine prin adăugarea a diferite

procente masice de $DyAl_2$, $DyFeAl_2$, Dy_2O_3, CoAl, V. Adaosul elementelor de tranziţie Al, V, precum şi a Dy au rol deosebit în creşterea anizotropiei magneticristaline, influenţând favorabil procesele de inversare a magnetizaţiei în vederea obţinerii unor valori ridicate ale câmpului coercitiv intrinsec şi implicit o stabilitate mai ridicată la temperatură.

■ Din cele prezentate se poate constata o foarte bună rezistenţă a acestor magneţi la câmpuri demagnetizante, aceasta datorită valorii ridicate a câmpului coercitiv şi a formei dreptunghiulare pentru curbele de demagnetizare. Acest lucru îi recomandă a fi utilizaţi în circuite cu câmpuri demagnetizante de valori ridicate.

■ Comportarea magneţilor la solicitări mecanice, din punct de vedere magnetic este foarte bună; probleme de ordin mecanic se ridică doar din cauza fragilitaţii acestora, datorită structurii aceştia fiind foarte casanţi. Magneţii permanenţi pe bază de pamânturi rare sunt foarte puţin rezistenţi la agenţi corozivi, de aceea pentru realizarea protecţiilor anticorozive cât mai bune s-au efectuat şi se efectuează numeroase studii, domeniile de utilizare a acestor magneţi în industria aeronautică fiind de obicei în incinte închise ermetic sau climatizate.

BIBLIOGRAFIE

[1] Aron, I., Păun, V., *Echipamentul electric al aeronavelor*, Editura didactică şi pedagogică, Bucureşti, 1980.

[2] Aron, I., *Aparate de bord pentru aeronave*, Editura tehnică, Bucureşti, 1984

[3] Vasile, N., *Forţele parazite în motoarele sincrone cu magneţi permanenţi*, Editura ICPE, Bucureşti, 1997.

[4] Kappel, W., Codescu, M.M., Popa, D., Proc. 3-rd Nat. *New research trends in material science* – ARM – 3, Constanţa, Editura Printech, Bucureşti, Romania, 2003, pag. 166.

[5] Gavrilă, H., s.a., *Magnetism tehnic şi aplicat*, Editura Academiei Române, 2000.

[6] Meeker, D., *Finite Element Method in Magnetism*, Users's Manual, 2001.

[7] Bejan, M., *În lumea unităţilor de măsură*, ediţia a doua revăzută şi adăugită. Editura Academiei Române şi Editura AGIR, Bucureşti, 2005.

Dr.Ing.Euring. Dragoş POPA
Inginer echipamente de bord, expert tehnic independent, membru AGIR,
Preşedinte SETEC-AGIR, tudodei@yahoo.com
Ing.Dragoş NĂSTASE
Inginer de aeronave, expert tehnic independent, membru AGIR
dragosh_nccd1701@yahoo.com