

# MODELAREA PRIN OMOGENIZARE A MATERIALELOR COMPOZITE MAGNETICE

Ș.I. dr. ing. Adelina BORDIANU

Universitatea „Politehnica“ din București, România

**REZUMAT:** Lucrarea face o prezentare a cercetărilor realizate de autor privind determinările proprietăților magnetice macroscopice ale materialelor compozite, folosind atât metode experimentale, cât și metode de analiză numerică, pentru regimuri statice și cvasistaționare. Pe baza unui amplu studiu bibliografic referitor la materialele compozite, sunt prezentate două metode de obținere a acestora. Sunt prezentate ipotezele simplificatoare ce pot fi utilizate în studiul numeric al materialelor compozite. Se face o analiză microscopică a materialelor compozite și un studiu al eficienței formulilor de omogenizare numerică. Se prezintă un studiu experimental și numeric al unor eșantioane de material bloc compozit cu concentrații diferite de incluziuni. De asemenea, lucrarea face o analiză numerică și experimentală a unor eșantioane de material compozit moale de tip Somaloy Prototyping, în vederea calculării și estimării pierderilor, precum și dependența acestora de valoarea câmpului aplicat și de frecvență. În ultima parte a lucrării se prezintă utilizarea metodei termice pentru a cerceta cum sunt influențate pierderile, dintr-un material compozit moale, de valoarea frecvenței și a inducției magnetice.

**Cuvinte cheie:** materiale compozite magnetice, regim static și cvasistaționar, câmp magnetic, frecvență, inducție magnetică.

**ABSTRACT:** The paper presents a review of the author's research on the determination of the macroscopic magnetic properties of composite materials using both experimental methods and numerical analysis methods for static and quasi-static regimes. Based on a comprehensive bibliographic study on composite materials, two methods are presented for obtaining them. Simplifying hypotheses that can be used in the numerical study of composite materials are presented. A microscopic analysis of composite materials is performed and a study of the efficiency of numerical homogenization formulas is made. There is an experimental and numerical study of samples of a bloc composite material with different concentrations of inclusions. The paper makes a numerical and experimental analysis of samples of Somaloy Prototyping soft composite material for calculating and estimating losses, as well as their dependence on the value of the field applied and the frequency. The last part of the paper presents the use of the thermal method for investigating how the losses from a soft composite material are influenced by frequency and magnetic induction.

**Keywords:** magnetic composite materials, static and quasi-static regime, magnetic field, frequency, magnetic induction.

## 1. INTRODUCERE

Materialele compozite ceramice, polimerice și/sau magnetice sunt utilizate cu succes în construcția de mașini (de exemplu, pentru reducerea masei și creșterea rezistenței), în industria aerospațială (componente ale motoarelor și a structurii de rezistență deoarece au o greutate scăzută, proprietăți mecanice deosebite, sunt capabile să funcționeze la temperaturi extreme și la presiuni ridicate, rezistă la oxidare și asigură protecție termică), în domeniul medical (realizarea de implanturi pentru diferite părți ale corpului, pacemaker-uri, electrozi, agenți de contrast în RMN, pentru transportul medicamentelor în anumite zone ale corpului etc), în industria electronică (miniaturizarea componentelor, pentru a realiza senzori magnetoelectri în dispozitivele de înregistrare magnetică, ecranarea electromagnetică,

sistemele de comunicație, senzori magnetici, dispozitive de înregistrare magnetică, dispozitive electromagnetice, bobine sau transformatoare), în domenii speciale (pentru a proteja antenele radar, motoare electrice și îmbunătățirea proprietățile echipamentelor cu curenți moi) și în multe alte domenii [1,2,3,4,5,6].

Avantajele materialelor compozite sunt: rezistență crescută la temperaturi moderate și rezistență la coroziune în anumiți solvenți sau acizi, rezistență mecanică și chimică deosebite, reducere a greutății, bună rezistență la șoc și incendiu, etc.

Una din problemele apărute în studiul acestor materiale este legată de complexitatea structurii acestora. Pentru a putea caracteriza materialele compozite se pot folosi metode de omogenizare numerică care permit simularea comportamentului macroscopic. Astfel se poate realiza o analiză complexă a proprietăților materialelor compozite folosind modele simple. Folosind astfel de modele a fost realizată cu analiza

numerică a unor materiale compozite utilizate în practică. Rezultatele au fost comparate cu cele obținute în urma analizei experimentale. Sunt prezentate formulele de analiză utilizate în tehnică (formula lui Maxwell Garnett și Bruggeman) și ecuații ce pornesc de la structura microscopică a materialului – formula Landau-Lifshitz-Gilbert. Formulele permit calculul permeabilității magnetice a unui material compozit și iau în considerare incluziuni sub formă de fibre, particule etc. Sunt prezentate metode de analiză numerică a materialelor compozite (metoda elementelor de frontieră, metoda elementelor finite) și teoria omogenizării matematice.

Componentele principale ale unui material compozit sunt matricea, întăriturile, aditivii și adezivii. Matricea este una dintre componentele principale ale unui material compozit, având rolul de a oferi formă și rigiditate materialului, precum și de a îmbrăca incluziunile ținându-le împreună, nemișcate în structura finală a compozitului, putând fi polimerice, metalice și ceramice [7,8,9]. Tipul de matrice cel mai des folosit este din carbon, carbură de siliciu sau alumină. Un alt tip de matrice este oxidul de zirconiu, în combinație cu incluziuni din hexaferită de bariu, particule feromagnetice de nichel sau nitratul de aluminiu, bor sau siliciu, boratul de aluminiu, sticla de borosilicat de sodiu etc. Incluziunile se pot împărți în trei mari categorii: „wiskers”, particule și fibre. Pentru a obține compozite cu proprietăți deosebite este important ca între matrice și incluziuni să existe compatibilitate [10,11,12].

## 2. METODE FOLOSITE PENTRU OBȚINEREA MATERIALELOR COMPOZITE MAGNETICE CU INCLUZIUNI DIN PARTICULE

Materialele compozite magnetice se obțin prin amestecarea mecanică a pudrei cu polimeri și agenți de întărire [13]. După ce se realizează amestecarea, materialul obținut se supune unui proces de uscare, încălzire, sinterizare etc. O altă metodă, folosită pentru obținerea materialelor compozite moi este de a presa incluziunile. Materialele compozite pe bază de Co se pot sinteriza folosind metoda descompunerii termice în prezența agenților tensioactivi (substanțe chimice ce pot reduce tensiunea pe suprafață – un exemplu este acidul oleic  $C_{18}H_{34}O_2$ ). Fiecare incluziune este acoperită cu acești agenți, pentru a preveni aglomerarea lor, rezultatul fiind un material nanocompozit magnetic cu simetrie cubică. O altă metodă de obținere, tot chimică, este nucleația neomogenă într-un solvent organic, pentru obținerea nanoparticulelor. Această metodă presupune creșterea materialului, obținându-se materiale de tip nucleu înveliș. De exemplu,

prin compactare și presare se pot obține materiale compozite cu incluziuni din materiale dure și cu matrice polimerică. Cu particule de  $Nd_{14,8}Fe_{76}Co_{4,95}B_{4,25}$  și rășină epoxidică se crează un amestec ce este supus unui proces de compactare (900 MPa) la temperatura de 20°C, timp de 5 minute, urmat de un proces de 2 ore de întărire a matricii la 180°C [14]. O altă metodă de obținere a materialelor compozite este cea cu incluziuni magnetice și matrici bio-polimerice și cele de tip sandwich (sau multistrat). Materialele compozite stratificate sunt obținute prin aplicarea pe un strat de bază a unui sau mai multor straturi din alt material – turnare, sudare sau laminare. În cazul materialelor compozite magnetice stratificate, acestea se mai pot obține prin procedee de difuzie în stare solidă la interfața dintre materialele magnetice și laminare la rece dintr-un strat de acoperire și un material. Cele mai actuale și utilizate metode sunt cele chimice. De exemplu, în urma unui proces de polimerizare prin distilare și precipitare se pot obține materiale compozite sub formă de nucleu - înveliș ce au în componență, pe post de nucleu, clusteri magnetici de dimensiuni nanometrice acoperiți cu o matrice polimerică și ca înveliș particule imobilizate într-o matrice polimerică de tip polimer etil-glicol-metilacrilic-fosfat. Alt procedeu este realizarea unor filme nanocompozite cu incluziuni sub formă de nanoparticule ce sunt distribuite omogen în matrice. Metoda se bazează pe procedeu de sinterizare la cald, urmat de depunere folosind aerosoli, tratament termic și acoperire cu polimer.

## 3. MODELAREA MATERIALELOR COMPOZITE ȘI IPOTEZE SIMPLIFICATOARE

Folosind metoda elementelor finite necunoscutele ecuațiilor câmpului electromagnetic sunt determinate în urma analizei domeniul discretizat al problemei și având grijă ca să fie satisfăcute condițiile pe frontiere. Prin utilizarea metodei elementelor de frontieră necunoscutele ecuațiilor câmpului electromagnetic sunt determinate analizând numai frontierele prin aproximarea condițiilor scrise pe acestea. Deoarece ecuațiile sunt scrise numai pe frontieră, ordinul dimensiunii problemei este redus cu o unitate. Prin combinarea metodei elementelor de frontieră cu metoda elementelor finite se poate eficientiza modul de analiză al problemei – rezultate obținute mult mai rapid, abateri mai scăzute etc.. Pentru un material compozit matricea poate fi analizată folosind metoda elementelor de frontieră, iar incluziunile folosind metoda elementelor finite.

Datorită structurii complexe a materialelor compozite reale, în modelare se utilizează frecvent

## MODELAREA PRIN OMOGENIZARE A MATERIALELOR COMPOZITE MAGNETICE

ipoteze simplificatoare: simplificarea geometriei incluziunilor, simetria materialului etc. Pentru a putea analiza proprietățile electromagnetice ale materialelor compozite, cum ar fi conductivitatea, permitivitatea sau permeabilitatea, au fost propuse mai multe teorii și metode de analiză.

Cele mai folosite sunt formulele Maxwell-Garnett sau Bruggeman:

$$\mu_{eff} = \frac{2 \cdot \mu_m \cdot f \cdot (\mu_i - \mu_m) + \mu_m \cdot (\mu_i + 2 \cdot \mu_m)}{f \cdot (\mu_m - \mu_i) + 2 \cdot \mu_m + \mu_i} \quad (1)$$

$$f \cdot \frac{\mu_i - \mu_{eff}}{\mu_i + 2 \cdot \mu_{eff}} + (1 - f) \cdot \frac{\mu_m - \mu_{eff}}{\mu_m + 2 \cdot \mu_{eff}} = 0$$

unde:  $N_j$  reprezintă factorii de demagnetizare după cele trei direcții; matricea are permeabilitatea  $\mu_m$  și ocupă volumul  $1-f$ ; incluziunile materialului real au permeabilitate magnetică  $\mu_i$  și ocupă volumul  $f$  din întreg materialul; material omogenizat caracterizat de permeabilitatea  $\mu_{eff}$ .

Comportarea în câmp magnetic a materialelor compozite cu particule magnetice poate fi studiată cu ajutorul ecuației Landau–Lifshitz–Gilbert (LLG) [15].

$$\frac{d\mathbf{M}}{dt} = -\gamma_G \cdot (\mathbf{M} \times \mathbf{H}) + \frac{\alpha_G}{M} \cdot \left( \mathbf{M} \times \frac{d\mathbf{M}}{dt} \right) \quad (2)$$

unde: unde  $\mathbf{M}$  este vectorul magnetizație,  $\mathbf{H}$  – intensitatea câmpului magnetic total aplicat (cuprinde câmpul magnetic aplicat, câmpul de demagnetizare, câmpul de anizotropie etc.),  $\gamma_G$  – factorul de precesie Gilbert ( $\gamma_G = 1.105 \cdot 10^5 g$  – unde  $g$  este raportul giro-magnetic),  $\alpha_G$  – factorul de demagnetizare,  $t$  – timpul.

În modelarea materialelor compozite se utilizează și teoria omogenizării. Scopul acesteia este acela de a considera un material compozit, care este la nivel microscopic neomogen, ca fiind la nivel macroscopic omogen, cu scopul pentru a descrie diferitele caracteristici ale respectivului material (conductivitatea electrică sau permeabilitatea magnetică etc.). Acest lucru semnifică faptul că materialul real, neomogen, poate fi înlocuit cu un material fictiv, omogen, ale cărui caracteristici reprezintă o bună aproximare a proprietăților materialului real [16]. Din punct de vedere numeric, utilizarea teoriei omogenizării aduce o mulțime de avantaje, printre care se remarcă rapiditatea de obținere a soluției problemei asociate de câmp electromagnetic [17,18,19].

## 4. ANALIZA NUMERICĂ A EFICIENȚEI FORMULELOR DE OMOGENIZARE

Analiza eficienței formulelor de omogenizare s-a realizat folosind modele bidimensionale și tridimensionale. Pentru realizarea modelelor bidimensionale

s-a utilizat programul FEMM, iar pentru cele tridimensionale, programul Comsol. De exemplu, pentru a analiza influența volumului asupra proprietăților magnetice s-a considerat cazul în care incluziunile reprezintă 6%, 28%, respectiv 42% din totalul materialului. Astfel, pentru cazul 3 (incluziunile reprezintă 42%) se consideră trei incluziuni, cu raza de 105 nm – figura 1.

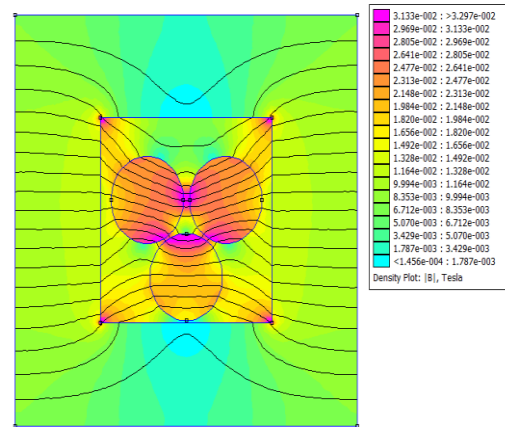


Fig. 1. Repartiția inducției magnetice în interiorul domeniului de calcul.

Folosind cele două formule de omogenizare s-au calculat cele două permeabilități relative echivalente obținându-se 90.65, pentru formula Maxwell Garnett, și 137.44, utilizând formula Bruggeman. În figura 2 se poate observa repartiția valorilor inducției magnetice obținută pentru materialul omogen.

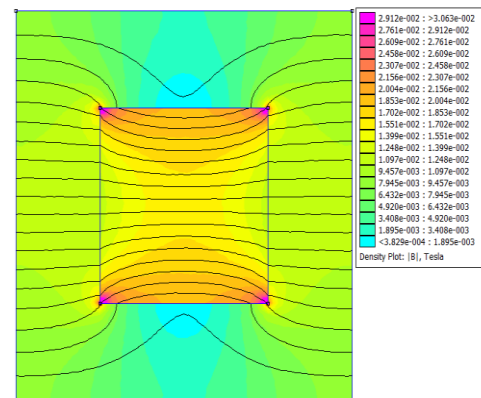


Fig. 2. Repartiția inducției magnetice în interiorul domeniului de calcul pentru materialul omogenizat.

Analizând rezultatele obținute se poate concluziona că ambele formule sunt capabile să ofere rezultate bune pentru problema exterioară compozitului, în cazul folosirii formulei Bruggeman abaterile fiind puțin mai mari. Verificarea influenței pe care matricea o are asupra proprietăților materialelor compozite se realizează considerând un material cu un procent de incluziuni de 42 %. Se consideră că incluziunile au o permeabilitate relativă de 1000, iar pentru matrice sunt

considerate patru permeabilități relative diferite (1, 40, 100, 500). Folosind formula Maxwell Garnett se calculează valorile permeabilității magnetice omogenizate pentru fiecare dintre cele patru cazuri:  $\mu_{O_1} = 2.44$ ,  $\mu_{O_{40}} = 90.65$ ,  $\mu_{O_{100}} = 204.71$ ,  $\mu_{O_{500}} = 662.79$ .

În figura 3 se poate vedea repartiția liniilor câmpului magnetic. Cu cât valoarea permeabilității relative a matricii crește, cu atât concentrația liniilor în interiorul materialului compozit se mărește.

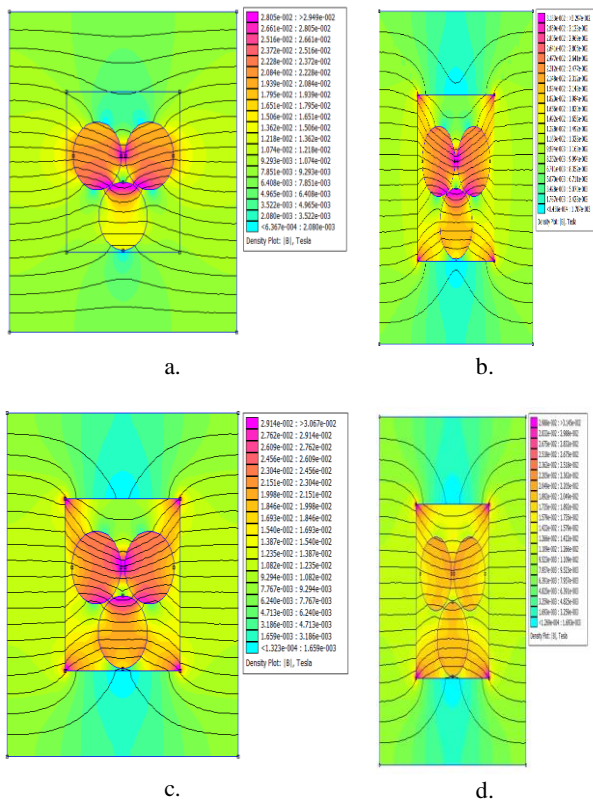


Fig. 3. Spectrul inducției magnetice pentru un compozit ce are permeabilitatea relativă a matricii egală cu 1 (a), 40 (b), 100 (c), respectiv 500 (d).

Și în acest caz rezultatele folosind formulele de omogenizare sunt apropiate de cele obținute analizând materialul compozit. Concluzia fiind ca formulele de omogenizare pot fi utilizate cu succes în modele calitative și că sunt chiar suficient de precise pentru analiza problemelor exterioare (la o anumită distanță de compozit).

### 5. STUDIUL EXPERIMENTAL ȘI NUMERIC AL MATERIALELOR BIOMCOMPOZITE PE BAZĂ DE $Fe_3O_4$ ȘI A CELOR COMPOZITE MOI

Studiul experimental pentru materialele biocompozite pe bază de  $Fe_3O_4$  a fost realizat folosind un magnetometru cu probă vibrantă (VSM 7304 LakeShore). Cele mai bune valori ale magnetizației de

saturație, a celei remanente și a câmpului coercitiv sunt obținute pentru materialul compozit ce are în compoziție un procent de 50% de incluziuni. Pentru materialele cu 70% incluziuni, aceste valori sunt mai scăzute. Aceste rezultate pot fi explicate prin faptul că în timpul preparării materialelor biocompozite depunerea nu se poate realiza omogen, astfel că există posibilitatea să fi ales pentru studiul experimental o zonă cu o concentrație mai mică de incluziuni. Explicația principală este legată de influența interacțiunilor între incluziuni: cu cât concentrația este mai mare, adică particulele de  $Fe_3O_4$  sunt mai apropiate, cu atât crește probabilitatea formării de aglomerări ce sunt mai greu de magnetizat.

Pornind de la eșantioanele de material compozit, s-au realizat mai multe modele numerice tridimensionale folosind programul COMSOL Multiphysics®. Matricea este caracterizată prin  $\mu_m = 1$ . Pentru incluziuni s-a considerat permeabilitatea pudrei de  $Fe_3O_4$  (figura 4) ce rezultă din curba  $\mathbf{B} = f(\mathbf{H})$  obținută cu ajutorul magnetometrului cu probă vibrantă. S-au ales cinci puncte pentru care s-au calculat proprietățile materialului:  $\mu_{r_P1} = 4.22$ ,  $\mu_{r_P2} = 3.34$ ,  $\mu_{r_P3} = 2.24$ ,  $\mu_{r_P4} = 1.44$ ,  $\mu_{r_P5} = 1.05$ . Pentru fiecare valoare a permeabilității a fost aplicată o valoare diferită a câmpului magnetic pe frontieră, rezultând cinci cazuri test.

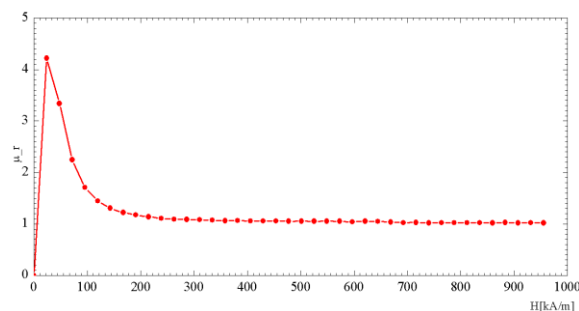


Fig. 4. Variația permeabilității magnetice a particulelor de  $Fe_3O_4$  cu valoarea câmpului aplicat.

În urma analizei se poate concluziona că prezența incluziunilor influențează liniile câmpului magnetic, iar concentrația lor modifică proprietățile magnetice ale materialului. Pentru concentrații ale incluziunilor mici, abaterile oferite de formula Maxwell Garnett sunt mai mici decât cele oferite de Bruggeman – de exemplu 2.31% față de 4.67% pentru o concentrație de 30%. Odată cu creșterea concentrației incluziunilor, formula lui Bruggeman este capabilă să ofere rezultate mai bune decât Maxwell Garnett - o abatere de 0.6 % față de 5.72%.

Pentru analiza materialelor compozite moi s-au utilizat mai multe eșantioane de material compozit (probe de formă toroidală) și folosind teoria omogenizării, s-a dorit găsirea unui model numeric pentru materialul real, ca apoi să se estimeze care sunt

pierderile prin curenți turbionari și să se arate modul în care proprietățile magnetice ale materialelor compozite depind de diferenții parametri. Rezultatele numerice obținute sunt comparate cu cele experimentale și sunt formulate concluzii referitoare la datele obținute. Pornind de la caracteristicile matricii și incluziunilor s-au determinat proprietățile efective ale materialului compozit, modelându-se comportamentul său electromagnetic. Prin folosirea teoriei omogenizării matematice au putut fi puse în evidență atât fenomenele ce au loc la scară microscopică (locală), cât și cele de la scara macroscopică (globală).

Tot pentru analiza materialelor compozite moi, folosind de această dată metoda termică, s-a analizat un eșantion dintr-un material compozit moale de tip Somaloy® Prototyping, sub formă de bară. Scopul a fost de a calcula pierderile ce apar în acesta. Studiul s-a realizat pentru diferite valori ale frecvenței și inducției magnetice. Dacă un material magnetic este supus unui câmp magnetic, efectele ce apar la nivel microscopic (datorate mișcării dezordonate a particulelor, mișcării atenuate a momentelor magnetice de spin, salturilor Barkhausen, apariția curenților turbionari, etc.) se traduc în căldură, ceea ce înseamnă că temperatura întregului material crește [20]. Temperatura  $T(x, y, z, t)$  în materialul magnetic este soluția ecuației căldurii [21]:

$$\frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} = D \Delta T(x, y, z, t) + \frac{1}{\rho c_p} p_s(x, y, z) \quad (3)$$

unde :  $D$  este difuzia termică,  $\rho$  - densitatea materialului ( $\rho=7450 \text{ kg/m}^3$ ),  $c_p$  - căldura specifică a materialului ( $c_p = 470 \text{ J/K}^\circ \cdot \text{kg}$ ),  $p_s$  - densitatea pierderilor (raportul dintre pierderi și volumul materialului).

Schimbul de căldură prin frontierele materialului poate fi neglijat. Eșantionul de material compozit ce a trebuit analizat a fost bobinat la unul din capete, introdus într-o bobină și cu ajutorul unui montaj experimental și a unei camere termice în infraroșu s-a studiat evoluția temperaturii în eșantion pentru un interval de 20s. Achiziția datelor s-a realizat cu ajutorul software-ului camerei termice. După fiecare măsurătoare, pentru o anumită frecvență și inducție a câmpului magnetic se obțin 500 de matrici de dimensiuni 240x320 elemente. Fiecare matrice ne arată starea sistemului la un anumit moment de timp din întreg procesul de încălzire. Utilizând programele Matlab de conversie a rezultatelor obținute de camera termică în temperatură s-a putut obține temperatura eșantionului pentru fiecare moment de timp. Pornind de la aceste date și folosind Matlab s-au obținut pierderile în materialul compozit. Rezultatele obținute au aratat ca metoda termică poate fi o bună metodă alternativă pentru măsurarea pierderilor.

## 6. CONCLUZII

Lucrarea prezintă: materialele compozite magnetice și a metodele utilizate pentru modelarea proprietăților macroscopice ale acestor materiale, în regim static și cvasistaționar; analizează eficiența formulelor de omogenizare macroscopică (Bruggeman și Maxwell Garnett) pentru modele de materiale compozite, folosind programe specializate; arată influența pe care proprietățile matricii, precum permeabilitatea, volumul, numărul, distribuția și orientarea incluziunilor (particule sau fibre) o au asupra proprietăților macroscopice ale unui material compozit; arată influența câmpului magnetic aplicat și a numărului de incluziuni asupra proprietăților magnetice macroscopice ale unor eșantioane de material biocompozit pe bază de  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , folosind un magnetometru cu probă vibrantă VSM-7304 Lake Shore; analizează din punct de vedere numeric și experimental proprietăților unor eșantioane dintr-un material compozit magnetic moale de tip Somaloy® Prototyping de la Höganäs; achiziția, procesarea și interpretarea datelor experimentale obținute sub formă de hărți termice de culori și determinarea pierderilor prin folosirea ecuației căldurii.

## BIBLIOGRAFIE

- [1] Guo-Dong Li, *Contemporary magnetic materials and magnetism: Research and Applications*. Electromagnetic materials, Proceedings of Symposium F, pp. 77-85, ICMAT 2003
- [2] P.K. Chakrabarti, B.K. Nath, S. Brahma, S. Das, D. Das, M. Ammar, F. Mazaleyrat, *Magnetic and hyperfine properties of chemically synthesized nanocomposites of  $(\text{Al}_2\text{O}_3)_x(\text{Ni}_0.2\text{Zn}_0.6\text{Cu}_0.2\text{Fe}_2\text{O}_4)_{1-x}$  ( $x = 0.15, 0.30, 0.45$ )*, Solid State Communications, vol. 144, 2007, pp. 305-309
- [3] G. Orive, R.M. Hernandez, A.R. Gascon, A. Dominguez-Gil, J.L. Pedraz, *Drug delivery in biotechnology: present and future*, Current Opinion in Biotechnology, vol. 14, nr. 6, 2003, pp. 659-664
- [4] Byong-Taek Lee, Chi-Woo Lee, Asit Kumar Gain, Ho-Yeon Song, *Microstructures and material properties of fibrous HAp/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub> composites fabricated by multipass extrusion process*, Journal of the European Ceramic Society, vol. 27, nr. 1, 2007, pp. 157-163
- [5] Byong-Taek Lee, Swapan Kumar Sarkar, Ho-Yeon Song, *Microstructure and material properties of double-network type fibrous  $(\text{Al}_2\text{O}_3\text{-m-ZrO}_2)/\text{t-ZrO}_2$  composites*, Journal of the European Ceramic Society, vol. 28, nr. 1, 2008, pp. 229-233
- [6] S. Ingvarsson, *Magnetic nanoparticles in composite materials and devices*, 2004
- [7] A. K. Kaw, *Mechanics of Composite Materials*, Second Edition, CRC Press, Taylor & Francis Group, LLC, Boca Raton, USA, 2006.
- [8] H. Altenbach, J. Altenbach, W. Kissing, *Mechanics of composite structural elements*, Springer - Verlag Berlin Heidelberg, Germania, 2004
- [9] F.L. Matthews, R.D. Rawlings, *Composite materials: Engineering and Science*, Woodhead Publishing Limited, England, 1999

- [10] <http://gurit.com/files/documents/guide-to-compositesv4pdf.pdf>
- [11] M. Reyne, *Technologie des composites*, Editions Hermes, Paris, 1998
- [12] <http://www.compositesone.com>
- [13] Yu. I. Bespyatykh, N. E. Kazantseva, *Electromagnetic Properties of Hybrid Polymer Composites*, Journal of Communications Technology and Electronics, vol. 53, nr. 2, 2008, pp. 143–154
- [14] M. Drak, B. Ziębowicz, L.A. Dobrzański, *Manufacturing of hard magnetic composite materials Nd-Fe-B*, Journal of achievements in materials and manufacturing engineering, vol. 31, nr. 1, 2008, pp. 91-96
- [15] C. P. Neo, Y. Yang, J. Ding, *Calculation of complex permeability of magnetic composite materials using ferromagnetic resonance model*, Journal of Applied Physics, vol 107, 2010, pp. 083906-1 ÷ 083906-6
- [16] C. S. Olariu, C. E. Ciomaga, L. Mitoseriu, *Magnetolectric Composites described by EMA models*, IEEE ROMSC 2011 (8<sup>th</sup> edition), 2011, Iași,
- [17] K. Terada, M. Hori, T. Kyoya, N. Kikuchi, *Simulation of the multi-scale convergence in computational homogenization approaches*, International Journal of Solids and Structures, vol. 37, 2000, pp. 2285 – 2311
- [18] G. Kristensson, *Homogenization of the Maxwell equations in an anisotropic material*, Lund Institute of Technology, Suedia, 2002
- [19] J. M. Guedes, N. Kikuchi, *Preprocessing and postprocessing for materials based on the homogenization method with adaptive finite element methods*, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, vol. 83, 1990, pp. 143-198
- [20] V. Loyau, M. LoBue, F. Mazaleyrat, *Comparison of Losses Measurement in a ferrite with two calorimetric methods*, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 46, nr. 2, 2010, pp. 529-531
- [21] V. Loyau, M. LoBue, F. Mazaleyrat, *Measurement of magnetic losses by thermal method applied to power ferrites at high level of induction and frequency*, Review of Scientific Instruments, vol. 80, 2009, pp. 024703-1÷024703-6

### Despre autoare

S.I. dr. ing. **Adelina BORDIANU**

Universitatea „Politehnica“, București, România

Absolventă a Universității Politehnica București, România în anul 2009. Este doctor în Inginerie electrică, titlu obținut la Universitatea Politehnica din București în anul 2012, iar din anul 2009 este cadru didactic la această instituție. A scris 39 articole - 12 în volumele unor manifestări științifice internaționale recunoscute și indexate, 12 la reviste indexate ISI și BDI, 3 în reviste recunoscute internațional și CNCSIS, 10 în volumele unor manifestări științifice internaționale și 2 la conferințe naționale, o carte de specialitate și este membru în 2 proiecte naționale.