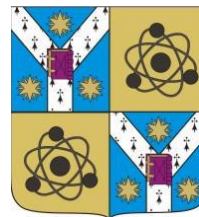




Universitatea „Alexandru Ioan Cuza” din Iași
Facultatea de Fizică



Aplicații în senzori ale firelor magnetice amorfe

– Rezumatul tezei de doctorat –

Doctorand:

Costică Hlenschi

Conducător științific:

Prof. Univ. Dr. Maria Neagu

IAȘI – 2022

UNIVERSITATEA "ALEXANDRU IOAN CUZA" DIN IAȘI
Școala Doctorală de Fizică

ANUNȚ

La data de/..../.... , ora, în sala,
Domnul **Hlenschi Costică** va susține, în ședință publică, teza de doctorat cu titlul
“**Aplicații în senzori ale firelor magnetice amorfe**”, în vederea obținerii titlului
științific de doctor în domeniul **Științe Exacte - Fizică**.

Comisia de doctorat are următoarea componență:

Președinte:

Prof. Univ. Dr. Diana Mihaela MARDARE,
Universitatea "Alexandru Ioan Cuza" din Iași

Conducător științific:

Prof. Univ. Dr. Maria NEAGU,
Universitatea "Alexandru Ioan Cuza" din Iași

Referenți:

C.S.I. Dr. Horia CHIRIAC,
Institutul Național de Cercetare Dezvoltare pentru Fizică Tehnică Iași

Prof. Univ. Dr. Cristina STAN,
Universitatea Politehnică București

Prof. Univ. Dr. Dacia Felicia IACOMI,
Universitatea "Alexandru Ioan Cuza" din Iași

Teza poate fi consultată la Biblioteca Facultății de Fizică

Mulțumiri

Cu ocazia finalizării studiilor doctorale doresc să îmi exprim recunoștința față de persoanele care au fost alături de mine și au contribuit la formarea mea profesională.

Adresez mulțumiri, domnului CS I Dr. Horia Chiriac pentru subiectele de cercetare propuse și atenta coordonare care a condus la obținerea de rezultate remarcabile.

Deosebite mulțumiri adresez, conducătorului științific, doamnei Prof. Univ. Dr. Maria NEAGU pentru permanenta sa îndrumare și sprijinul acordat de-a lungul întregii perioadei de pregătire a doctoratului și de elaborare a tezei.

Sincere mulțumiri adresez comisiei de îndrumare, domnului CS I Dr. Tibor-Adrian Óvári, doamnei CS I Dr. Nicoleta Lupu și domnului CS I Dr. Horia Chiriac care m-au sprijinit în activitatea de cercetare și mi-au oferit soluții la problemele apărute în anii de studiu.

De asemenea mulțumesc colegilor din cadrul INCDFI-Iași care au fost în permanență aproape de mine, m-au susținut și mi-au oferit sprijin tehnic pentru obținerea rezultatelor.

Cuprins

Introducere.....	2
Capitolul 1.....	4
Prepararea firelor magnetice amorfe	4
1.1. Obținerea firelor magnetice amorfe convenționale	4
1.2. Obținerea firelor magnetice amorfe acoperite cu sticlă.....	5
Capitolul 2.....	7
Efecte magnetice prezente în fire magnetice.	7
2.1. Histerezis magnetic.	7
2.1.1. Considerații generale.....	7
2.1.2. Trasarea ciclului de histerezis magnetic. Metoda fluxmetrică.....	8
2.2. Efectul Barkhausen. Efectul Barkhausen gigant.....	9
2.3. Efectul magnetostrictiv. Efectul magnetostrictiv invers (Villari).....	9
2.4. Efectul Matteucci. Efectul Wiedemann.....	9
2.5. Efectul magneto-inductiv	10
2.6. Efectul magnetoimpedanță gigant (GMI).....	10
2.6.1. Considerații generale.....	10
2.6.2. Trasarea curbelor GMI.....	10
Capitolul 3.....	11
Selecția materialelor magnetice pentru aplicații în senzori.....	11
3.1. Caracterizarea firelor magnetice amorfe prin trasarea ciclurilor de histerezis magnetic și a curbei de permeabilitate magnetică.	11
3.2. Caracterizarea firelor magnetice amorfe prin trasarea curbelor GMI	19
Capitolul 4.....	22
Contribuții privind realizarea de senzori având ca element sensibil fir magnetic amorf.	22
4.1. Realizarea bobinelor de excitație, polarizare și recepție a semnalului pentru senzori	22
4.2.2. Senzor magnetoelastic pentru monitorizarea/înregistrarea undei de puls.....	23
4.3.2. Senzor magnetoelastic pentru măsurarea forței.	24
4.4. Senzori de tip fluxgate.....	26
4.4.2. Senzor de tip fluxgate ortogonal	26
4.4.3. Senzor de tip fluxgate cu măsurarea timpilor de rezidență (RTD) fără bobină de excitație.	28
4.5. Senzor pentru detecția autovehiculelor parcate	31
4.5.2. Senzor magnetic triaxial	31
Concluzii	33
Bibliografie	35

Introducere

Materialele magnetice amorfe sub formă de fire prezintă interes deosebit pentru lumea științifică deoarece proprietățile și fenomenele care se manifestă în aceste materiale conduc la dezvoltarea de senzori ce au aplicații în diverse domenii.

În funcție de compoziție și caracteristicile geometrice ale firelor magnetice amorfe în aceste materiale se formează o structură de domenii magnetice complexă, care este influențată de tensiunile mecanice interne ce apar în procesul de obținere. Structura de domenii magnetice este responsabilă de evoluția proceselor de magnetizare care determină apariția efectelor magnetice specifice în materiale magnetice sub formă de fire cu structură amorfă.

Firele magnetice amorfe sunt folosite în special ca element sensibil pentru construirea senzorilor. Pot fi realizați senzori pentru măsurare câmp magnetic, forță/presiune, deplasare etc. Senzorii pot fi utilizați și pentru a măsura indirect alte mărimi precum intensitatea curentului electric (prin măsurare câmpului magnetic generat de un conductor străbătut de curent electric).

Lucrarea este structurată pe patru capitole, concluzii și bibliografie:

Capitolul 1 - *Prepararea firelor magnetice amorfe*. În acest capitol sunt prezentate instalațiile (existente la INCDFI-Iași) și procesele tehnologice de obținere a firelor magnetice amorfe convenționale și a firelor magnetice amorfe acoperite cu sticlă. Folosind instalațiile descrise în acest capitol se pot obține fire magnetice amorfe convenționale (prin ejecția aliajului topit într-un strat de apă aflat în rotație) cu diametre cuprinse între 90 – 150 μm și fire amorfe acoperite cu sticlă (prin tragerea aliajului topit într-un capilar de sticlă) cu diametrul miezului metalic cuprins între 2 - 50 μm și diametrul total cuprins între 5 - 100 μm

Capitolul 2 - *Efecte magnetice prezente în fire magnetice*. În acest capitol sunt prezentate principalele efecte care apar în materialele magnetice sub formă de fire: histerezis magnetic, efect Barkhausen, efect magnetostrictiv, efect Matteucci, efect magnetoinductiv, efect magnetoimpedanță. Efectele prezentate stau la baza funcționării senzorilor cu element sensibil fir magnetic amorf sau pot fi surse de zgomot. Din acest motiv pentru construcția senzorilor este necesar să se exploateze eficient un singur efect și să se minimizeze influența celorlalte.

Capitolul 3 - *Selecția materialelor magnetice pentru aplicații în senzori*. Acest capitol prezintă rezultatele măsurătorilor efectuate asupra următoarelor materiale magnetice:

- Fire magnetice amorfe acoperite cu sticlă $\text{Co}_{68,15}\text{Fe}_{4,35}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$ și $\text{Fe}_{73,5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13,5}\text{B}_9$ cu dimensiuni 19/31 μm (diametrul miezului metalic / diametrul total) respectiv 20/49 μm atât în stare as-cast cât și tratate termic.

- Fire magnetice amorfe convenționale $\text{Co}_{68,15}\text{Fe}_{4,35}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$ și $\text{Fe}_{77,5}\text{Si}_{7,5}\text{B}_{15}$ cu diametre de 100 μm respectiv 124 μm în stare as-cast.

Materiale au fost analizate cu scopul de a înțelege comportamentul acestora în vederea dezvoltării senzorilor existenți sau realizării de senzori noi. Principala metodă de evaluare a proprietăților magnetice a materialelor magnetice o reprezintă trasarea ciclului de histerezis magnetic de unde se pot extrage informații precum: magnetizație de saturație, magnetizație remanentă, câmp magnetic coercitiv. De asemenea materialele au fost evaluate prin trasarea curbelor de permeabilitate magnetică relativă în funcție de câmpul magnetic aplicat și a curbelor de magnetoimpedanță gigant

(GMI). Trasarea ciclurilor de histerezis și a curbelor de variație a permeabilității relative în funcție de câmpul magnetic aplicat au fost efectuate pe fire magnetice amorf supuse tensiunilor mecanice de întindere cu valori până la 500MPa.

Capitolul 4 - *Contribuții privind realizarea de senzori având ca element sensibil fir magnetic amorf*. Acest capitol este dedicat rezultatelor obținute în realizarea de senzori având ca element sensibil fir magnetic amorf:

Cercetările efectuate au condus la realizarea următorilor senzori:

- *Senzor magnetoelastic pentru monitorizarea / înregistrarea undei de puls* folosind ca element sensibil fir magnetic amorf convențional $\text{Co}_{68,15}\text{Fe}_{4,35}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$ în stare as-cast. Funcționarea sensorului se bazează pe schimbările ce apar în procesele de magnetizare în firul magnetic amorf atunci când se află sub acțiunea unui tensiuni mecanice. Datorită sensibilității ridicate sensorul poate detecta mișcările cu amplitudine redusă de la nivelul pielii generate de fluxul pulsatoriu al circulației sângelui. Sensorul este montat pe un suport elastic care este presat pe piele în vecinătatea unei artere. În lipsa undei de puls sensorul este slab tensionat de suport. Când apare unda de puls vasul de sânge se extinde și creează o tensiune mecanică suplimentară în firul magnetic amorf producând modificarea permeabilității magnetice a acestuia și implicit modificarea tensiunii electrice induse.

- *Senzor magnetoelastic pentru măsurarea forței* cu element sensibil fir magnetic amorf convențional $\text{Co}_{68,15}\text{Fe}_{4,35}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$ în stare as-cast Acest senzor prezintă performanțe ridicate datorită sensibilității mari a firului magnetic amorf când este supus tensiunilor mecanice de încovoiere. Elementul sensibil al sensorului este montat pe un suport elastic din latex prin intermediul căruia se poate ajusta domeniul de măsură în funcție de elasticitatea acestuia.

- *Senzor de tip fluxgate ortogonal* cu detecție pe frecvența fundamentală cu element sensibil fir magnetic amorf convențional $\text{Co}_{68,15}\text{Fe}_{4,35}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$. în stare as-cast Pentru a crește performanțele sensorului fluxgate ortogonal este necesar să se minimizeze zgomotul produs de materialul magnetic. În acest sens excitația materialului magnetic s-a făcut simultan cu curent electric alternativ și curent electric continuu ceea ce determină ca magnetizarea să aibă loc doar prin procese rotație iar zgomotul de tip Barkhausen să fie anulat în proporție foarte mare.

- *Senzor de tip fluxgate cu măsurarea timpilor de rezidență (RTD) fără bobină de excitație* cu element sensibil fir magnetic amorf acoperit cu sticlă $\text{Co}_{68,15}\text{Fe}_{4,35}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$ tratat termic la 300 °C timp de o oră. Funcționarea sensorului se bazează pe inversarea direcției magnetizării în firul magnetic amorf cu comportament bistabil (indus prin tratament termic) când acesta este străbătut de curentul de excitație. Circuitul electronic detectează pulsurile pozitive și negative ale semnalului indus în bobina de recepție și măsoară diferența de timp dintre acestea (diferență proporțională cu câmpul magnetic extern)

- *Senzor magnetic triaxial* pentru detecția autovehiculelor parcate folosind ca element sensibil fir magnetic amorf convențional $\text{Co}_{68,15}\text{Fe}_{4,35}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$ în stare as-cast. Sensorul măsoară câmpul magnetic înconjurător și este capabil să detecteze autovehiculele din vecinătatea sa datorită perturbației câmpului magnetic pe care acestea o produc. Sensorul are consum redus de energie datorită tensiunii electrice induse în bobina de recepție de valori mari (de ordinul volților nefiind necesară amplificarea semnalului) precum și modului de excitație cu pulsuri de curent electric cu durată mică ($<5 \mu\text{s}$) care străbat elementul sensibil.

Capitolul 1

Prepararea firelor magnetice amorfe

1.1. Obținerea firelor magnetice amorfe convenționale

În cadrul INCDFI-Iași, firele magnetice amorfe convenționale se obțin prin metoda ejecției aliajului topit în strat de apă aflat în rotație, utilizând o instalație a cărei vedere de ansamblu este prezentată în figura 1 [1-3]. Utilizând această metodă se pot produce fire amorfe cu proprietăți superioare în comparație cu alte metode. Instalația permite controlul automat a parametrilor de fabricare prin intermediul unui calculator care rulează un software dedicat creat în Labview.

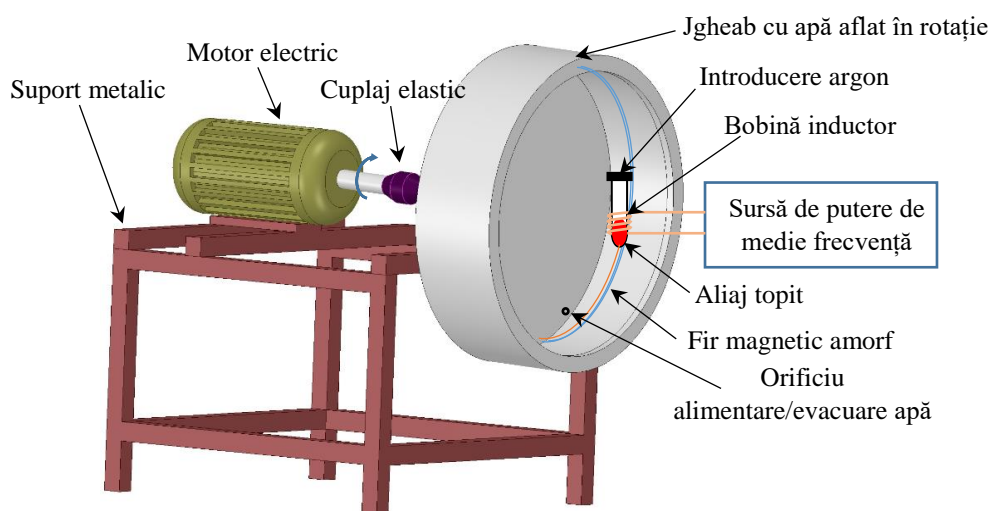


Figura 1. Vedere de ansamblu a instalației de obținere a firelor magnetice amorfe convenționale existentă la INCDFI-Iași.

Procedeul de obținere al firelor amorfe convenționale constă în topirea prin inducție a unei cantități mici de aliaj (câteva grame) aflat în interiorul unui creuzet din cuarț care prezintă în partea inferioară un orificiu pentru eiecție. Pentru eiecția aliajului se poziționează duza tubului de cuarț la o distanță mică (1-5 mm) față de lichidul de răcire și se crește brusc presiunea în tubul de cuarț iar aliajul topit este împins cu viteză în stratul de apă aflat în rotație.

În figura 2 sunt prezentate câteva tipuri de defecte care pot să apară în timpul procesului de fabricație al firelor prin metoda eiecției aliajului în strat de apă aflat în rotație. Defectele apar în principal din lipsa de sincronizare dintre viteza de eiecție a aliajului și viteza de rotație a stratului de apă, dar pot apărea și din cauza temperaturii prea mari a aliajului ejectat și a turbulențelor stratului de apă.

Dacă toți parametrii de fabricare al firelor sunt setați corespunzător se obțin fire fără defecte (Figura 2a). În cazul în care viteza stratului de apă este mai mare decât viteza jetului de aliaj firul rezultat este discontinuu sau apar defecte sub forma de zone subțiate (Figura 2b) iar firul se poate rupe înainte de a se solidifica obținându-se astfel fire de ordinul centimetrilor sau mai scurte. În cazul în care viteza jetului de aliaj este mai mare decât viteza stratului de apă firul rezultat este ondulat

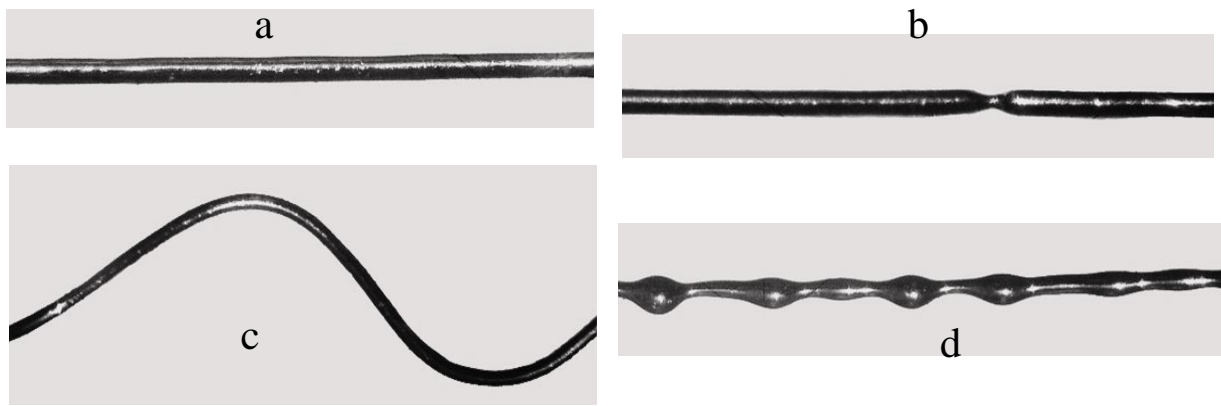


Figura 2. Tipuri de defecte care pot apărea în timpul procesului de fabricare al firelor în strat de apă în rotație: a) fir fără defecte; b) fir neuniform cu zone subțiate; c) fir cu aspect ondulat; d) fir pe suprafața căruia se formează defecte sub formă de picături.

(Figura 2c) sau prezintă mici neuniformități pe suprafață. Dacă temperatura aliajului ejectat este prea mare se obține un fir cu suprafața foarte neregulată având aspectul unor bile (Figura 2d).

1.2. Obținerea firelor magnetice amorfe acoperite cu sticlă

Firele magnetice amorfe acoperite cu sticlă se obțin prin metoda Tylor-Ulitovsky [4]. Aceasta metodă constă în topirea prin inducție a unei mici cantități de aliaj într-un tub de sticlă (pyrex) închis la un capăt și tragerea rapidă a acestuia împreună cu o parte din tubul care se înmoaie datorită temperaturii ridicate a aliajului. Pentru a obține starea amorfă a miezului metalic, firul obținut este răcit rapid prin trecerea lui printr-un jet de apă, cu curgere continuă și lentă, aflat imediat sub inductor.

În figura 3 este prezentată vederea de ansamblu și schema de principiu a instalației de fabricare a firelor magnetice amorfe acoperite cu sticlă convenționale existentă la INCDFT-Iași. Instalația este compusă dintr-un sistem de încălzire prin inducție, un sistem de poziționare și deplasare a tubului de

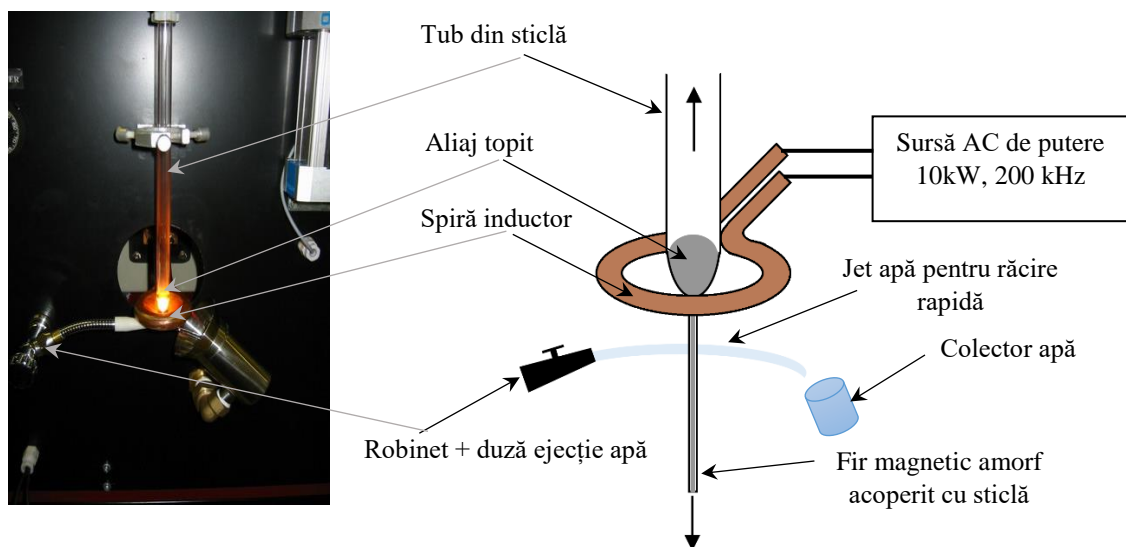


Figura 3. Vedere de ansamblu și schema de principiu a instalației de obținere a firelor magnetice amorfe acoperite cu sticlă (existentă la INCDFT-Iași).

sticlă, un sistem ce creează o presiune negativă de valoare mică în tubul de sticlă, un sistem de răcire cu jet de apă și un sistem de tragere și colectare a firului.

Inițierea procesului de fabricare a firului se face manual cu ajutorul unei tije din sticlă cu care se atinge zona inferioară a tubului din sticlă care este înmuiată. Sticla înmuiată se lipește de tijă apoi se trage în jos și se obține o fibră care se prinde pe mosorul de colectare aflat în mișcare de rotație.

Prin utilizarea metodei Tylor-Ulitovsky [4] se pot obține fire lungi cu proprietăți constante din punct de vedere magnetic și fizic având diametrul total cuprins între 5 și 100 μm și diametrul miezului metalic cuprins între 2 și 50 μm .

Capitolul 2

Efecte magnetice prezente în fire magnetice.

2.1. Histerezis magnetic.

2.1.1. Considerații generale.

În procesul de magnetizare al materialelor feromagnetice histerezisul magnetic se manifestă prin apariția unei întârzieri a densității de flux magnetic B ce străbate materialul magnetic față de intensitatea câmpului magnetic aplicat H din exterior.

Dacă materialul magnetic este supus acțiunii unui câmp magnetic extern, în material apar procese de orientare a magnetizării după direcția câmpului aplicat [5]. În figura 4 este prezentat ciclul de histerezis magnetic tipic al unui material feromagnetic.

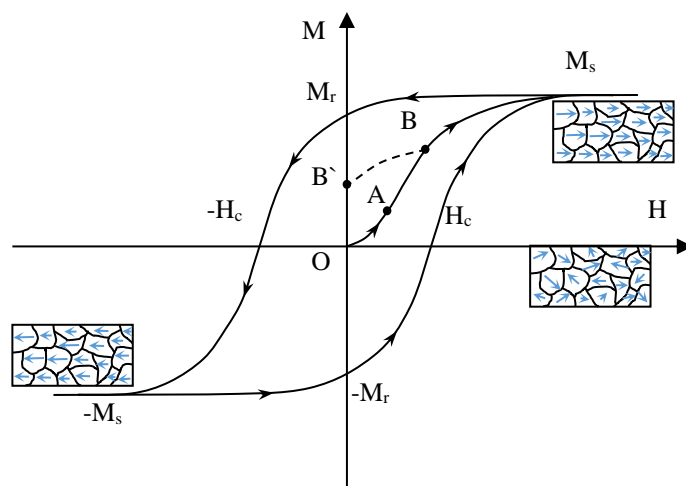


Figura 4. Ciclul de histerezis magnetic pentru un material feromagnetic supus unui câmp magnetic alternativ [2].

În punctul O, când câmpul magnetic aplicat are valoarea zero materialul feromagnetic are magnetizare totală nulă. Pe măsură ce câmpul magnetic începe să crească (spre valori pozitive) structura de domenii începe la rândul ei să se modifice, crescând domeniile pentru care direcția de ușoară magnetizare prezintă unghiuri cât mai mici față de direcția câmpului magnetic aplicat în detrimentul celor cu orientare opusă, rezultând o translație a pereților de domenii care este reversibilă (segmentul OA). Pe măsură ce câmpul crește peste punctul A în material apar modificări ireversibile în care momentele magnetice se rotesc iar magnetizarea crește puternic. Dacă în punctul B se înlătură câmpul magnetic, magnetizarea nu mai revine la starea inițială aceasta urmează drumul BB' iar magnetizarea totală este diferită de zero. Creșterea în continuare a câmpului extern secțiunea BM_s conduce la orientarea tuturor momentelor magnetice în direcția câmpului atingându-se o valoare maximă a magnetizării numită magnetizare de saturație M_s . Curba cuprinsă între punctele OM_s când magnetizarea este zero până la saturație poartă numele de curbă de primă magnetizare. Înlăturarea câmpului magnetic când proba este la saturație va face ca magnetizarea să ajungă în punctul M_r numită magnetizare remanentă. Aceasta stare este una stabilă și pentru a duce magnetizarea

materialului în zero este necesar să se aplice un câmp magnetic în sens invers. Valoarea câmpului magnetic extern invers aplicat pentru care magnetizarea revine la zero se numește câmp magnetic coercitiv notat cu $-H_c$. Creșterea în continuare a câmpului invers aplicat materialul magnetic face ca materialul să ajungă din nou la saturație doar că de data aceasta toate momentele magnetice sunt orientate în sens opus $-M_s$. Pe măsură ce câmpul magnetic invers aplicat scade și ajunge la valoarea zero magnetizarea atinge valoarea magnetizației remanente $-M_r$ care este egală în modul cu M_r . Creșterea din nou a câmpului aplicat spre valori pozitive va duce materialul magnetic la magnetizare zero atingându-se valoarea câmpului coercitiv H_c egal în modul cu $-H_c$.

2.1.2. Trasarea ciclului de histerezis magnetic. Metoda fluxmetrică.

În cadrul cercetărilor efectuate măsurarea proprietăților magnetice ale firelor magnetice amorfe (convenționale cât și fire acoperite cu sticlă) s-a făcut folosind metoda fluxmetrică de tip Howling, adaptată pentru fire [6, 7]. Schema de principiu a instalației este prezentată în figura 5. Sistemul de măsură conține o bobină de magnetizare (L) care este alimentată cu un curent sinusoidal, prin intermediul unui amplificator de putere. Câmpul magnetic în interiorul bobinei este uniform,

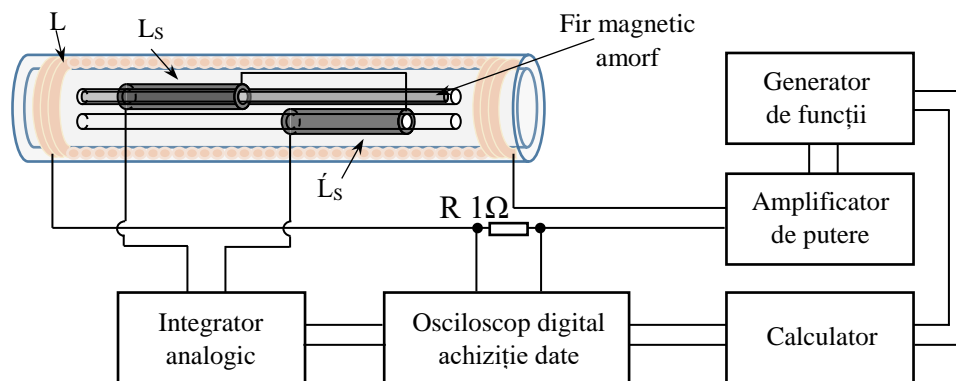


Figura 6. Schema de principiu a instalației utilizată pentru măsurarea proprietăților magnetice ale firelor amorfe existentă în cadrul INCDFE-Iași [22].

având liniile de câmp paralele cu axa de simetrie a bobinei și are valoarea proporțională cu curentul ce o străbate. În interiorul bobinei de magnetizare se găsește un sistem de bobine sondă format din două bobine identice (L_s , \dot{L}_s) conectate în serie-opoziție astfel încât în lipsa eșantionului supus măsurătorii semnalul indus în prima bobină (L_s) este anulat de semnalul indus cea de a doua (\dot{L}_s). La introducerea unui eșantion magnetic, în una din bobinele sondă, și în prezența unui câmp magnetic de excitație alternativ, semnalul la ieșirea sistemului de bobine de măsură va fi diferit de zero, acesta fiind proporțional cu rotirea magnetizației domeniilor magnetice în direcția câmpului aplicat. Aceasta variație a magnetizației determină inducerea unei tensiuni electrice la bornele sistemului de bobine sondă, tensiune care este aplicată la intrarea unui integrator analogic.

Sistemul de măsură permite trasarea ciclului de histerezis și determinarea magnetizării de saturație și remanente și a câmpului magnetic coercitiv. De asemenea sistemul permite trasarea curbei de variație a permeabilității magnetice în funcție de câmpul magnetic maxim aplicat la diferite frecvențe.

2.2. Efectul Barkhausen. Efectul Barkhausen gigant.

Efectul Barkhausen constă într-o serie de schimbări rapide, discontinue în mărimea și/sau orientarea domeniilor magnetice, care apar în timpul procesului de magnetizare sau demagnetizare al unui material magnetic [8]. Efectul Barkhausen este cauzat în special de neomogenitățile din material: impurități, defecte microstructurale, limitele grăunților cristalini etc. În construcția senzorilor pe bază de materiale magnetice acest efect reprezintă o sursă de zgomot care trebuie minimizată, de obicei prin alegerea aliajelor potrivite sau a tehnologiei de fabricare.

Efectul Barkhausen gigant reprezintă o particularitate a efectului Barkhausen și constă în comutarea bruscă a magnetizației într-un volum mare sau chiar în tot volumul unui material magnetic [9]. Apariția saltului Barkhausen gigant are loc de regulă pentru anumite geometrii ale unui material magnetic care permite existența unei structuri de domenii speciale în care o regiune importantă din volumul materialului magnetic se comporta precum un monodomeniu.

2.3. Efectul magnetostrictiv. Efectul magnetostrictiv invers (Villari)

Efectul magnetostrictiv constă în modificarea dimensiunilor fizice ale unui material magnetic când acesta este supus acțiunii unui câmp magnetic extern. Acest efect se datorează structurii de domenii magnetice care sub acțiunea câmpului magnetic extern aplicat își schimbă orientarea fapt ce determină apariția unor tensiuni mecanice în interiorul materialului magnetic [10]. Aceste tensiuni determină alungirea (magnetostricțiune pozitivă) sau comprimarea (magnetostricțiune negativă) materialului. Efectul magnetostrictiv este un efect reversibil similar cu efectul piezoelectric și poate fi folosit pentru conversia energiei magnetice în energie mecanică cum ar fi construcția unor actuatori.

Efectul Villari reprezintă opusul efectului magnetostrictiv și constă în schimbarea stării de magnetizare a unui material când acesta este supus unor tensiuni mecanice (fie de alungire fie de comprimare). Efectul Villari poate fi utilizat în realizarea senzorilor pentru măsurarea forței sau presiunii [11]

2.4. Efectul Matteucci. Efectul Wiedemann

Efectul Matteucci se manifestă prin apariția unor pulsuri de tensiune la capetele unui fir magnetic torsionat când acesta este supus unui câmp magnetic alternativ cu direcția liniilor de câmp în direcția axială a firului magnetic [12, 13]. Efectul Matteucci apare datorită torsionării firului care generează o anizotropie magnetoelastică elicoidală ceea ce face ca axa de ușoară magnetizare să fie înclinată cu un anumit unghi față de axa longitudinală a firului. Datorită acestei anizotropii vectorul magnetizație se descompune în două componente, una axială și una circulară. Variația periodică a componentei circulare a magnetizației conduce la variația fluxului prin suprafața determinată de axa firului și rază, acest fapt determinând inducerea unei tensiuni alternative la capetele firului, sub forma unor pulsuri, numită tensiune Matteucci.

Efectul Wiedemann se manifestă prin torsionarea unui fir magnetostrictiv, când acesta este străbătut de un curent electric continuu și supus simultan acțiunii unui câmp magnetic având direcția liniilor de câmp în lungul firului. Sub acțiunea compusă a câmpului magnetic continuu longitudinal și câmpului magnetic circular produs de curentul continuu care circulă prin fir ia naștere o magnetizare

cu direcție elicoidală în jurul axei firului. Datorită magnetostricțiunii, în zona magnetizării elicoidale apare o modificare de dimensiune ceea ce duce la torsionarea firului [14].

2.5. Efectul magneto-inductiv

Efectul magneto-inductiv constă în apariția unei tensiuni electrice, sub forma unor vârfuri ascuțite pozitive și negative, la capetele unui fir amorf ca urmare a variației fluxului magnetic circumferențial ce înconjoară firul [15]. Acest efect este pus în evidență la frecvențe relativ joase (1 kHz) unde efectul de suprafață este foarte redus.

2.6. Efectul magnetoimpedanță gigant (GMI)

2.6.1. Considerații generale.

Efectul magnetoimpedanță gigant se manifestă prin schimbarea semnificativă a impedanței electrice a unui material magnetic moale, când este plasat într-un câmp magnetic și este străbătut de un curent electric cu frecvență ridicată.

Efectul GMI are origine electrodinamică și poate fi explicat printr-o redistribuire a densității de curent alternativ ce străbate firul ca efect al câmpului magnetic static aplicat [16]. Curentul electric de frecvență înaltă ce străbate un conductor nu este omogen în toată secțiunea transversală a acestuia și tinde să se concentreze în apropiere de suprafața conductorului (efect pelicular).

2.6.2. Trasarea curbelor GMI

Trasarea curbelor GMI constă în investigarea variației impedanței electrice a probei (fir amorf) când aceasta este străbătută de un curent de frecvență mare și este supusă unui câmp magnetic extern cu variație foarte lentă.

În figura 6 este prezentată schema de principiu a unei punți autobalansate pentru măsurarea

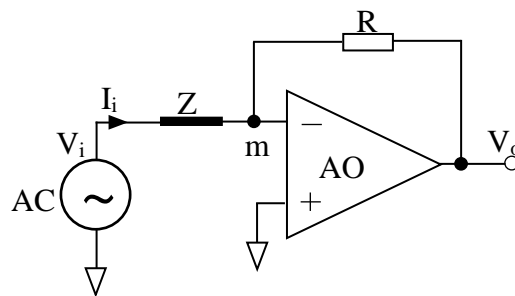


Figura 6. Schema de principiu a unei punți autobalansate pentru măsurarea magnetoimpedanței gigant.

magneto-impedanței gigant. Instalația de măsură utilizată are la bază un sistem de achiziție de date controlat prin intermediu unui calculator care permite colectarea și afișarea datelor provenite de la un eșantion supus acțiunii unui câmp magnetic extern foarte lent variabil.

Capitolul 3

Selecția materialelor magnetice pentru aplicații în senzori

3.1. Caracterizarea firelor magnetice amorse prin trasarea ciclurilor de histerezis magnetic și a curbei de permeabilitate magnetică.

Trasarea ciclurilor de histerezis magnetic și a curbelor de permeabilitate magnetică s-a făcut pe fire magnetice amorse supuse tensiunii mecanice de întindere cu valori cuprinse între 0 și 500 MPa. Tensionarea s-a realizat prin fixarea firelor magnetice la un capăt și suspendarea unor greutăți de celălalt capăt prin intermediul unui scripete.

În figura 7 sunt prezentate cicluri de histerezis magnetic pentru un fir magnetic amorf acoperit cu sticlă cu compoziția $\text{Co}_{68,15}\text{Fe}_{4,35}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$, în stare as-cast având dimensiunile de 19/31 μm (diametrul miezului metalic/dimetru total) pentru valori diferite ale tensiunii mecanice de întindere. Se observă o modificare ușoară a formei ciclului de histerezis în funcție de valoarea tensiunii mecanice aplicate până la tensiuni mecanice de 50 MPa. Pe măsură ce tensiunea mecanică crește peste 50 MPa forma ciclului de histerezis se modifică accentuat ajungându-se ca la valoarea de 500 MPa ciclul de histerezis să aibă aparența unei linii oblice.

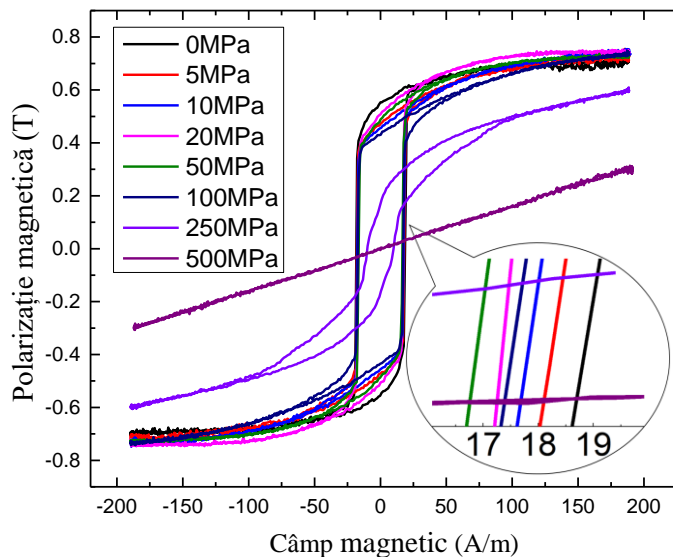


Figura 7. Cicluri de histerezis magnetic pentru fir magnetic amorf $\text{Co}_{68,15}\text{Fe}_{4,35}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$ acoperit cu sticlă având dimensiunile 19/31 μm , în stare as-cast, pentru diferite valori ale tensiunii mecanice de întindere.

În figura 8 sunt prezentate curbele de variație ale permeabilității magnetice în funcție de câmpul magnetic aplicat (Figura 8a) și permeabilitatea relativă maximă în funcție de tensiunea mecanică aplicată (Figura 8b), pentru fir magnetic amorf $\text{Co}_{68,15}\text{Fe}_{4,35}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$ acoperit cu sticlă cu dimensiunile 19/31 μm în stare as-cast. Creșterea tensiunii mecanice aplicate peste 50 MPa determină scăderea volumului din miez cu axa de ușoară magnetizare longitudinală și creșterea volumului cu axa de ușoară magnetizare transversală.

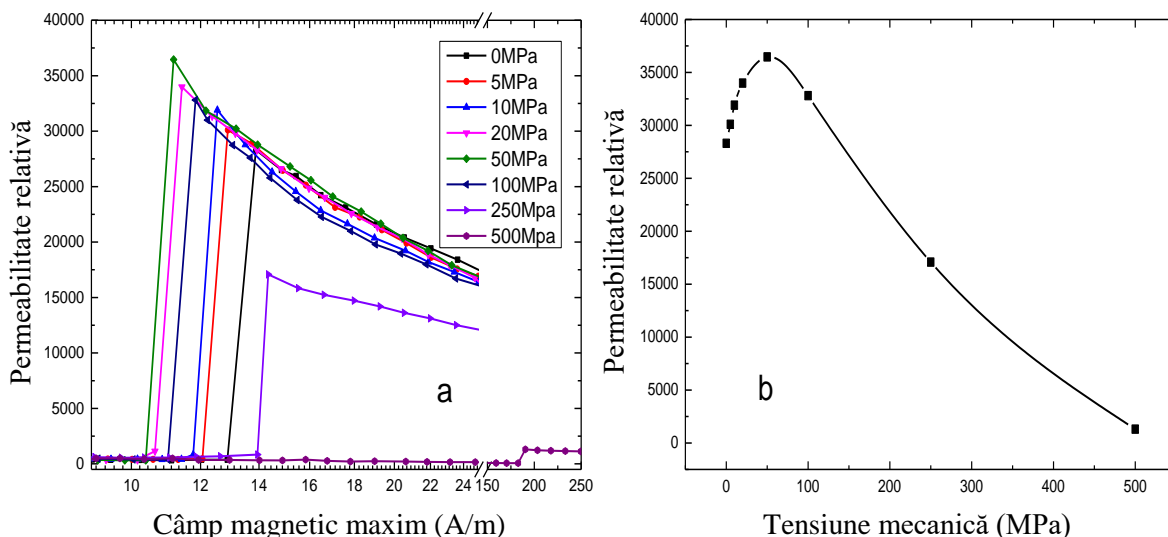


Figura 8. a) Permeabilitatea magnetică pentru fir $\text{Co}_{68,15}\text{Fe}_{4,35}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$, acoperit cu sticlă având dimensiunile $19/31 \mu\text{m}$, în stare as-cast, pentru diferite valori ale tensiunii mecanice de întindere; b) Valoarea maximă a permeabilității magnetice în funcție de tensiunea mecanică aplicată pentru același fir.

Măsurătorile ciclului de histerezis pentru firul as-cast sprijină aceste afirmații în sensul că pentru tensiuni de întindere de peste 500 MPa, curba de magnetizare este aproape lipsită de histerezis, magnetizarea longitudinală făcându-se predominant prin rotații ale magnetizării.

Din literatură se cunoaște că firele magnetice amorfе, acoperite cu sticlă de tip CoFeSiB , pot prezenta comportament magnetic bistabil dacă sunt tratate termic la temperatura de $300 \text{ }^\circ\text{C}$ timp de 1 oră (pentru diminuarea tensiunilor mecanice induse în timpul obținerii lor) [17].

În figura 9 sunt prezentate cicluri de histerezis magnetic pentru firul $\text{Co}_{68,15}\text{Fe}_{4,35}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$ acoperit cu sticlă cu dimensiunile $19/31 \mu\text{m}$, tratat termic la $300 \text{ }^\circ\text{C}$ timp de o oră, pentru diferite valori ale tensiunii mecanice de întindere.

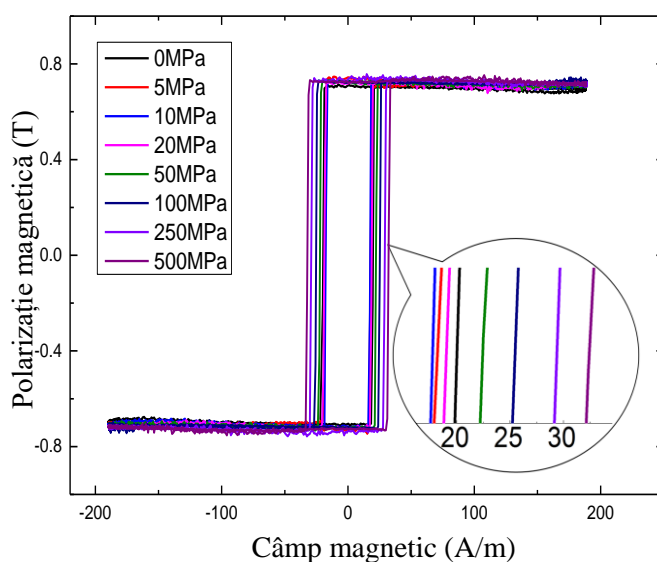


Figura 9. Cicluri de histerezis magnetic pentru un fir $\text{Co}_{68,15}\text{Fe}_{4,35}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$ acoperit cu sticlă, având dimensiunile $19/31 \mu\text{m}$, tratat termic la $300 \text{ }^\circ\text{C}$ timp de o oră, pentru diferite valori ale tensiunii mecanice de întindere.

În figura 10 este prezentată curba de variație a permeabilității magnetice în funcție de câmpul aplicat (Figura 10a) și valoarea maximă a permeabilității în funcție de tensiunea mecanică aplicată

(Figura 10b) pentru același fir, supus tensiunii mecanice de întindere de diferite valori. Se observă că eșantioanele tratate prezintă comportament bistabil, cu ciclul de histerezis complet rectangular, pentru toate valorile tensiunii mecanice de întindere aplicate. Pentru același fir netensionat, câmpul de comutare are valoarea de 14,58 M/M apoi scade puțin odată cu creșterea tensiunii mecanice, ajungând la un minim de 13,56 A/m pentru o valoare a tensiunii mecanice de întindere de 10 MPa. Când valoarea tensiunii mecanice de întindere depășește aceasta valoare câmpul de comutare crește iarăși ajungând la valoarea de 26,65 A/m pentru tensiunea de întindere egală cu 500 MPa.

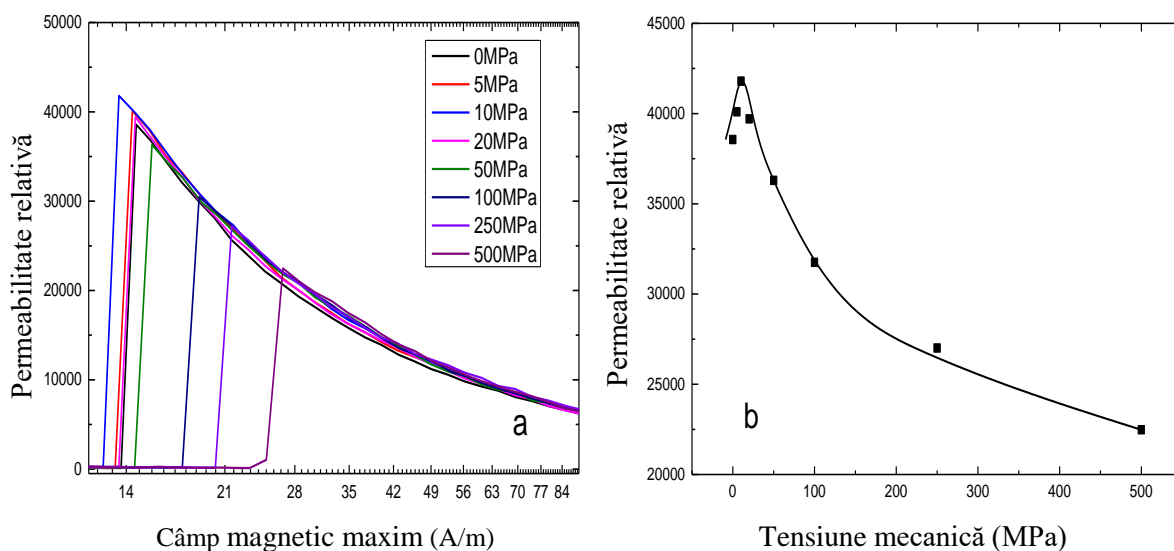


Figura 10. a) Permeabilitatea magnetică pentru fir magnetic amorf $\text{Co}_{68,15}\text{Fe}_{4,35}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$ acoperit cu sticlă având dimensiunile $19/31 \mu\text{m}$, tratat termic la 300°C , timp de o oră, pentru diferite valori ale tensiunii mecanice de întindere; b) Valoarea maximă a permeabilității în funcție de tensiunea mecanică aplicată pentru același fir.

Creșterea câmpului de comutare la aplicarea tensiunilor mecanice de întindere este cunoscut ca un proces specific firelor magnetice cu magnetostricțiune pozitivă, de tip FeSiB [18, 19]. Acest aspect sugerează ca tratamentul efectuat la 300°C modifică magnetostricțiunea eșantionului de la ușor negativă la ușor pozitivă, cu alte cuvinte modifică structura cristalină a materialului.

Valorile maximumului permeabilității magnetice relative urmăresc un comportament asemănător câmpului coercitiv cu o creștere inițială a valorilor permeabilității la creșterea tensiunilor mecanice de întindere urmat de o scădere pronunțată pentru tensiuni mecanice mai mari de 10 MPa. Valoarea maximă a permeabilității de aproximativ 41800 se obține pentru o valoare a tensiunii de întindere de 10 MPa.

În figura 11 sunt prezentate cicluri de histerezis magnetic pentru fir magnetic amorf cu compoziția $\text{Fe}_{73,5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13,5}\text{B}_9$ acoperit cu sticlă, având dimensiunile $20/49 \mu\text{m}$ în stare as-cast, supus la diferite valori ale tensiunii mecanice de întindere. În figura 12 este prezentată curba de variație a permeabilității magnetice în funcție câmpul magnetic aplicat (Figura 12a) și permeabilitatea magnetică maximă în funcție de tensiunea mecanică aplicată (Figura 12b), pentru același fir, supus tensiunii mecanice de întindere de diferite valori.

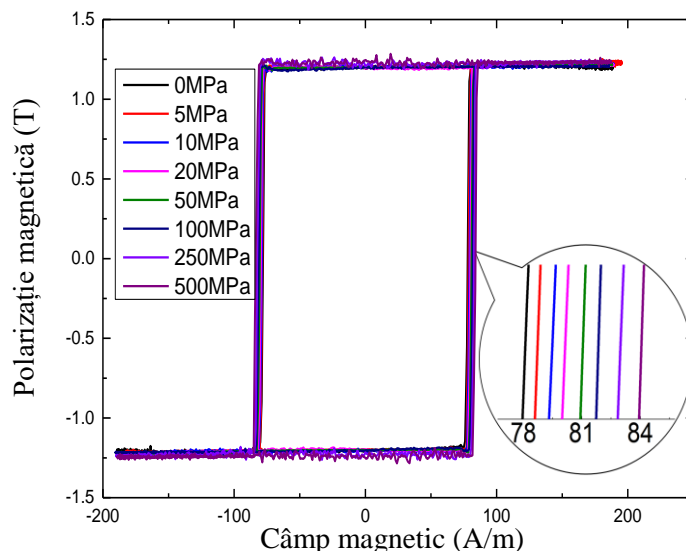


Figura 11. Cicluri de histerezis magnetic pentru un fir $Fe_{73,5}Cu_1Nb_3Si_{13,5}B_9$ acoperit cu sticlă, având dimensiunile $20/49 \mu m$, în stare as-cast, pentru diferite valori ale tensiunii mecanice de întindere.

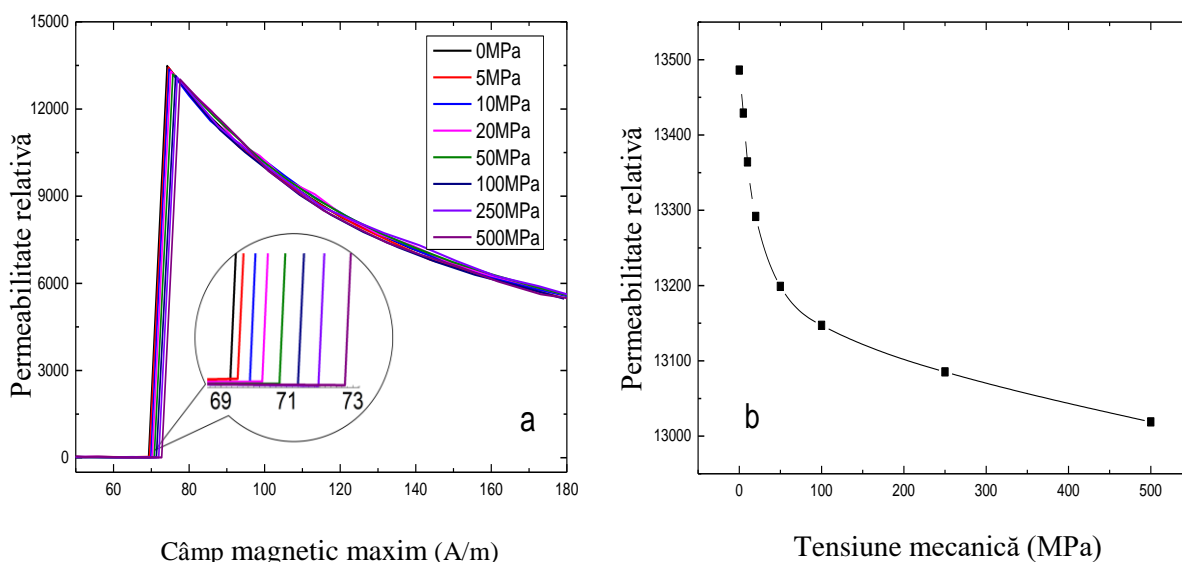


Figura 12. a) Permeabilitate magnetică pentru fir magnetic amorf $Fe_{73,5}Cu_1Nb_3Si_{13,5}B_9$, acoperit cu sticlă având dimensiunile $24/49 \mu m$, în stare as-cast, pentru diferite valori ale tensiunii mecanice de întindere; b) Valoarea maximă a permeabilității în funcție de tensiunea mecanică aplicată pentru același fir.

Se observă că aceste eșantioane prezintă comportament magnetic bistabil cu o dependență relativ redusă a câmpului de comutare de valoare tensiunii mecanice de întindere. Valorile câmpului magnetic de comutare cresc de la $74,19 \text{ A/m}$ pentru firele netensionate la $77,61 \text{ A/m}$ pentru firele supuse unei tensiuni de întindere de 500 MPa . Valorile maximumului permeabilității magnetice scad la creșterea tensiunii mecanice de întindere de la aproximativ 13500 pentru fire netensionate la aproximativ 13000 pentru firele supuse unei tensiuni de întindere de 500 MPa .

Din literatura de specialitate se cunoaște faptul că proprietățile firelor $FeCuNbSiB$ pot fi îmbunătățite prin efectuarea unui tratament termic la temperatura de $550 \text{ }^\circ\text{C}$ timp de o oră. Tratamentul are ca efect inducerea structurii nanocristaline având ca efect reducerea câmpului coercitiv și creșterea permeabilității [20]. În figura 13 sunt prezentate cicluri de histerezis magnetic pentru fir $Fe_{73,5}Cu_1Nb_3Si_{13,5}B_9$ acoperit cu sticlă, având dimensiunile $20/49 \mu m$, tratat termic la $550 \text{ }^\circ\text{C}$ timp de o oră, pentru diferite valori ale tensiunii mecanice de întindere. În figura 14 este prezentată

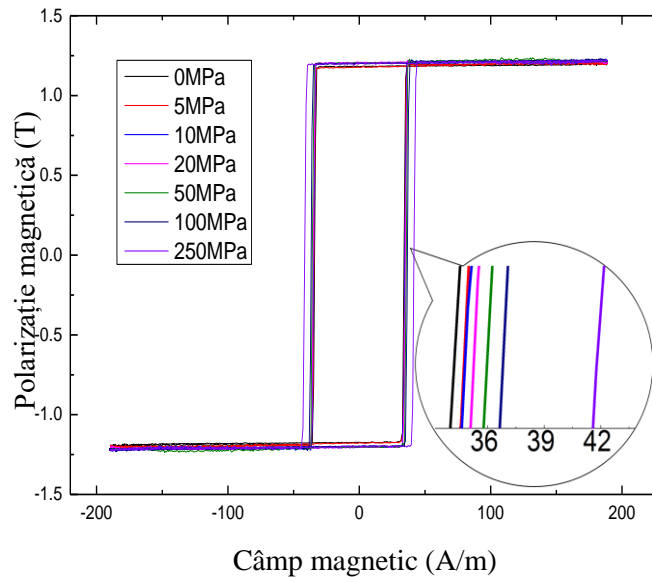


Figura 13. Cicluri de histerezis magnetic pentru un fir $Fe_{73,5}Cu_1Nb_3Si_{13,5}B_9$ acoperit cu sticlă, având dimensiunile $20/49 \mu m$, tratat termic, la $550^\circ C$ timp de o oră, pentru diferite valori ale tensiunii mecanice de întindere.

curba de variație a permeabilității în funcție câmpul magnetic aplicat pentru diferite valori ale tensiunii mecanice de întindere (Figura 14a) și permeabilitatea magnetică maximă măsurată în funcție de tensiunea mecanică aplicată (Figura 14b) pentru un fir $Fe_{73,5}Cu_1Nb_3Si_{13,5}B_9$, acoperit cu sticlă având dimensiunile $20/49 \mu m$, tratat termic la $550^\circ C$ timp de o oră.

Pentru eșantionul măsurat în stare as-cast (Figura 12a) și cel tratat termic la $550^\circ C$ timp de o oră (Figurile 22a) fără tensiuni, câmpul magnetic de comutare scade la aproximativ jumătate, (de la $74,19 A/m$ pentru eșantionul as-cast la $28,40 A/m$) după tratament.

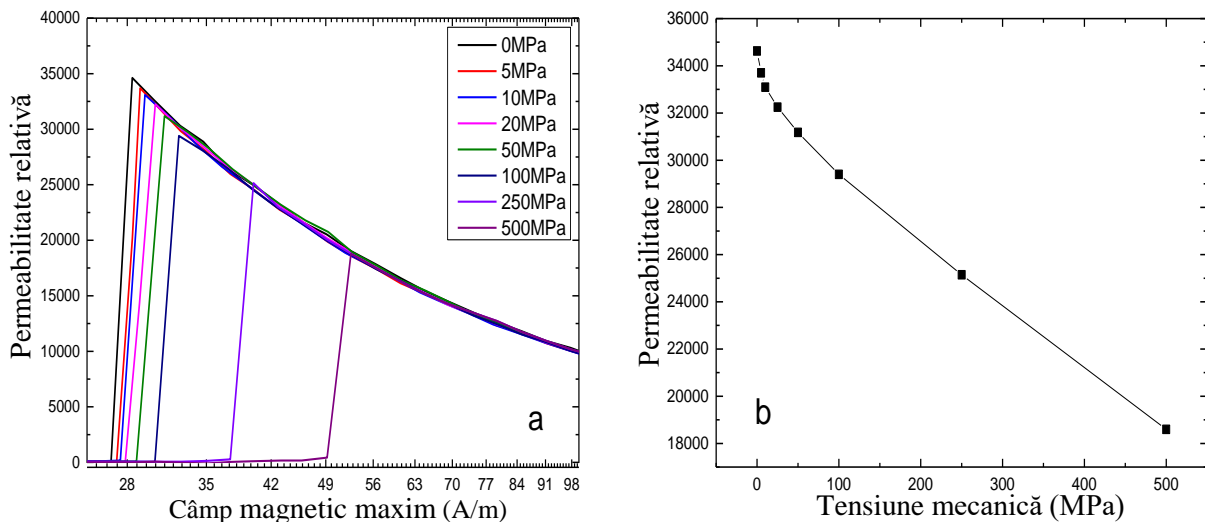


Figura 14. a) Permeabilitatea magnetică pentru fir $Fe_{73,5}Cu_1Nb_3Si_{13,5}B_9$, acoperit cu sticlă având dimensiunile $210/49 \mu m$, tratat termic la $550^\circ C$ timp de o oră pentru diferite valori ale tensiunii mecanice de întindere; b) Valoarea maximă a permeabilității în funcție de tensiunea mecanică aplicată pentru același eșantion.

Totodată permeabilitatea magnetică crește de la aproximativ 13500 pentru eșantionul as-cast la aproximativ 34600 pentru eșantionul tratat. Câmpul magnetic de comutare și valoarea maximă a permeabilității prezintă de asemenea o sensibilitate mai ridicată la aplicarea tensiunilor de întindere, în cazul firelor tratate termic. Valorile maximumului permeabilității magnetice descresc

la creșterea tensiunii de întindere de la aproximativ 34600 pentru fire netensionate la aproximativ 18000 pentru firele supuse unei tensiuni de întindere de 500MPa.

În figura 15 sunt prezentate cicluri de histeresis magnetic pentru un fir magnetic amorf convențional având compoziția $Co_{68,15}Fe_{4,35}Si_{12,5}B_{15}$ cu diametru de $100\ \mu m$ în stare as-cast pentru diferite valori ale tensiunii mecanice de întindere aplicate. În figura 16 este prezentată permeabilitatea magnetică în funcție câmpul magnetic aplicat (Figura 16a) și permeabilitatea magnetică maximă în funcție de tensiunea mecanică aplicată (Figura 16b), pentru același fir, supus tensiunii mecanice de întindere de diferite valori. Creșterea valorilor tensiunilor de întindere

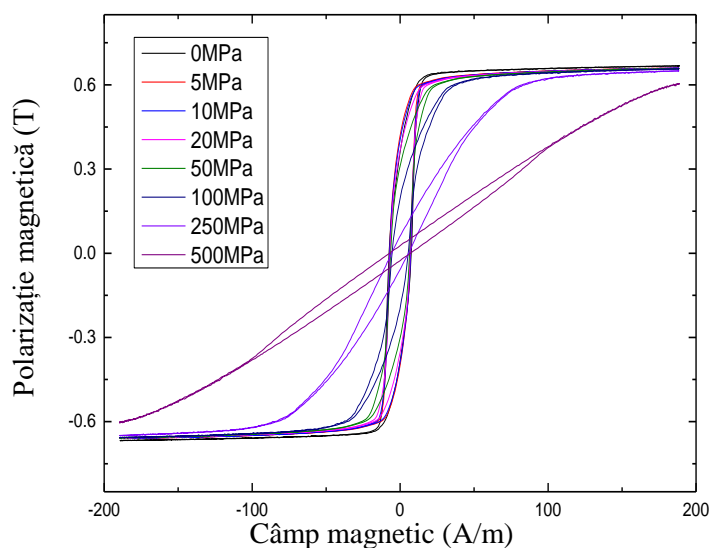


Figura 15. Cicluri de histeresis magnetic pentru fir $Co_{68,15}Fe_{4,35}Si_{12,5}B_{15}$, convențional cu diametrul de $100\ \mu m$, în stare as-cast, pentru diferite valori ale tensiunii mecanice de întindere.

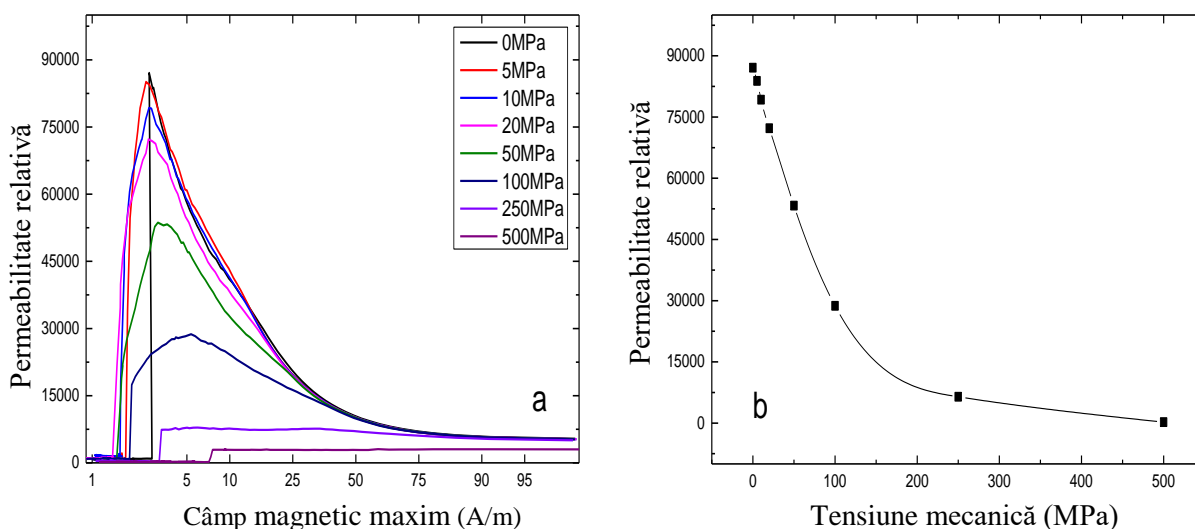


Figura 16. a) Permeabilitatea magnetică măsurată pe fir $Co_{68,15}Fe_{4,35}Si_{12,5}B_{15}$, as-cast, convențional cu diametrul de $100\ \mu m$, pentru diferite valori ale tensiunii mecanice de întindere; b) Valoarea maximă a permeabilității magnetice în funcție de tensiunea mecanică pentru același fir.

determină o înclinare a formei ciclului de histeresis cu o creștere semnificativă a câmpului de saturație și scăderea magnetizării remanente. Totodată creșterea tensiunilor mecanice determină scăderea valorii maxime a permeabilității relative de la aproximativ 87000 pentru firul netensionat la aproximativ 28500 pentru tensiuni mecanice de 100 MPa și 230 pentru 500 MPa, Scăderea permeabilității este mai pronunțată și relativ liniară pentru tensiuni de întindere de până la 100 MPa.

Pentru valori ale tensiunii de întindere mai mari decât 250 MPa observăm că firele prezintă permeabilitate constantă aproximativ 7500 pentru o tensiune de întindere de 250 MPa și un câmp magnetic extern aplicat de până la 35 A/m și aproximativ 2900 pentru o tensiune de întindere de 500 MPa și un câmp magnetic extern aplicat de până la 130 A/m. Stabilizarea zonei cu permeabilitate constantă se poate realiza prin tratarea termică a acestor fire supuse unor tensiuni mecanice de întindere. Materialele cu permeabilitate constantă se utilizează pentru realizarea senzorilor magnetoinductivi de precizie ridicată și zgomot redus care nu necesită câmpuri de excitație și prezintă caracteristică de transfer liniară în intervalul de permeabilitate constantă.

Modificările comportamentului magnetic la aplicarea tensiunilor de întindere se explică, la fel ca în cazul firelor acoperite cu sticlă cu aceeași compoziție, prin modificarea distribuției tensiunilor interne în firul amorf întins, care cuplate cu magnetostricțiunea pozitivă, determină creșterea zonei cu axă de ușoară magnetizare pe direcție circumferențială.

Creșterea diametrului firului amorf până la valori de 140 micrometri nu modifică comportamentul magnetic în esență, dar creșterea volumului de material implicat în procesul de magnetizare determină, în aplicații inducerea în bobinele de recepție a unor semnale cu amplitudini mai mari și totodată contribuie la reducerea zgomotului [21].

În figura 17 este prezentat ciclul de histererezis și curba de variație al maximului magnetizării la creșterea câmpului de excitație pentru un fir convențional având compoziția $Fe_{77,5}Si_{7,5}B_{15}$ cu diametrul de 124 μm în stare as-cast. Aceste fire prezintă o creștere ușoară a maximului magnetizării

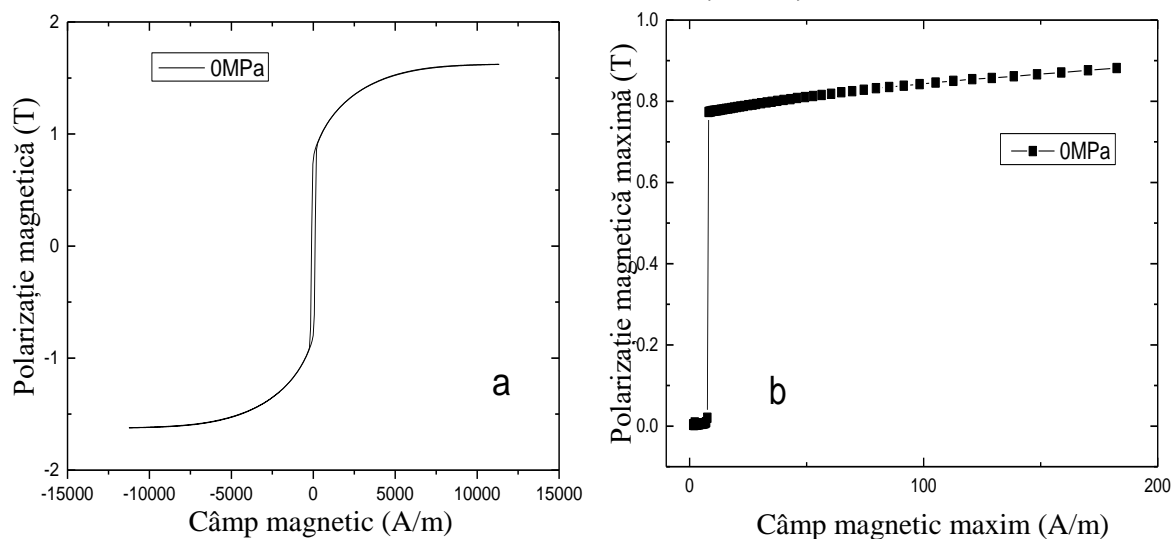


Figura 17. a) Ciclul de histererezis magnetic pentru fir magnetic amorf $Fe_{77,5}Si_{7,5}B_{15}$ convențional, cu diametrul de 124 μm , în stare as-cast; b) curba de variație al maximului magnetizării la creșterea câmpului de excitație pentru același fir

urmată de un salt, după care magnetizarea crește din nou lent până la atingerea saturației (Figura 17b). Acest comportament se datorează structurii de domenii complexe a acestor fire, cu miez central magnetizat axial și înveliș exterior magnetizat radial [22]. Atunci când câmpul de excitație crește de la zero până la valoarea maximă, cu excepția saltului, creșterile magnetizării se datorează reorientării domeniilor magnetice din învelișul exterior din direcție radială spre direcție axială. Zona de salt se datorează modificării bruște a sensului magnetizării din miezul central.

Atunci când aceste fire sunt supuse unor tensiuni de întindere cuplajul dintre tensiunile interne induse și magnetostricțiunea pozitivă determină creșterea volumului ocupat de miezul central

magnetizat axial. Acest fapt este confirmat prin măsurătorile ciclului de histerezis efectuate pe fir magnetic amorf $Fe_{77,5}Si_{7,5}B_{15}$ convențional, cu diametrul de $124 \mu m$, în stare as-cast supus tensiunilor mecanice de întindere (Figura 18). Măsurătorile efectuate arată o creștere a magnetizării atunci când valoarea tensiunii mecanice de întindere crește.

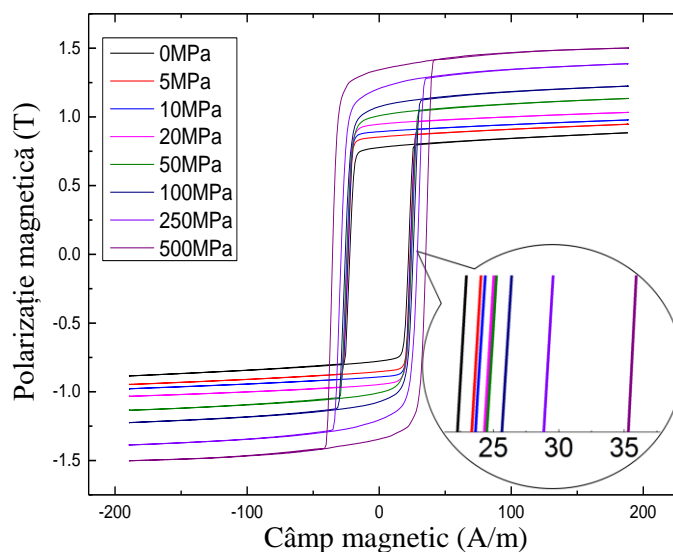


Figura 18. Cicluri de histerezis magnetic pentru fir magnetic amorf $Fe_{77,5}Si_{7,5}B_{15}$ convențional cu diametrul de $124 \mu m$, în stare as-cast, pentru diferite valori ale tensiunii mecanice de întindere.

În figura 19 este prezentată curba de variație a permeabilității magnetice în funcție de câmpul magnetic aplicat (Figura 19a) și valoarea maximă a permeabilității magnetice, câmpul de comutare și polarizația de salt în funcție de tensiunea mecanică aplicată (Figura 19b).

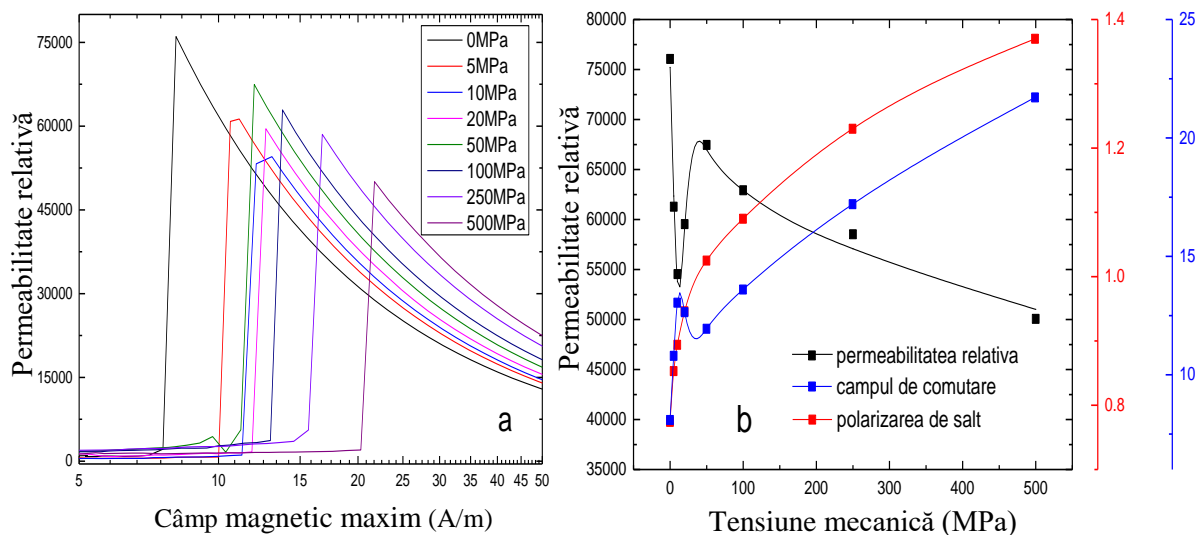


Figura 19. a) Permeabilitatea magnetică relativă măsurată pe fir $Fe_{77,5}Si_{7,5}B_{15}$, în stare as-cast convențional cu diametrul de $124 \mu m$, pentru diferite valori tensiuni mecanice de întindere, b) Valoarea maximă a permeabilității magnetice relative, câmpul de comutare și polarizația de salt în funcție de tensiunea mecanică aplicat pentru același fir.

Măsurătorile au fost efectuate pentru un fir $Fe_{77,5}Si_{7,5}B_{15}$ convențional în stare ascast cu diametrul de $124 \mu m$, în state as-cast, supus tensiunilor mecanice de întindere pentru diferite valori. Creșterea magnetizării este mai accentuată pentru valori mici ale tensiunii mecanice de întindere (pană la 20 MPa). Permeabilitatea magnetică scade inițial la creșterea tensiunii mecanice de

întindere de la aproximativ 75800 la aproximativ 54000 pentru o tensiune de 10 MPa apoi crește până la aproximativ 67400 pentru o tensiune de 50 MPa, apoi scade continuu odată cu creșterea tensiunii de întindere atingând valoarea de aproximativ 50000 pentru o tensiune de 500 MPa.

Întrucât polarizarea de salt crește monoton cu creșterea tensiunii mecanice de întindere acest comportament neliniar este determinat de modificările câmpului magnetic la care apare comutarea. Câmpul de comutare crește inițial de la 8,09 A/m până la 13,04 A/m pentru tensiuni mecanice de întindere de 10 MPa apoi scade până la 11,94 A/m pentru 50 MPa, după care crește continuu cu creșterea tensiunii mecanice de întindere până la 21,71 A/m pentru 500MPa. Valorile câmpului la care apare comutarea miezului central sunt legate de anizotropia axială care la rândul ei este influențată de mărimea și direcția tensiunilor dominante (axiale, circumferențiale și radiale) care se redistribuie când firul este supus tensiunilor mecanice.

Măsurătorile de histerezis magnetic și permeabilitate magnetică efectuate arată că firele de tip CoFeSiB prezintă permeabilitate magnetică ridicată ceea ce le face potrivite ca miez sensibil pentru senzori magneto-inductivi [23].

Comportamentul magnetic bistabil al firelor de tip FeSiB și FINEMET, dar și al firelor de tip CoFeSiB tratate termic, le face potrivite pentru realizarea senzorilor de tip fluxgate cu măsurarea diferenței timpului de rezidență (RDT-fluxgate) [24].

Variațiile diferiților parametri magnetici la aplicarea unor tensiuni mecanice de întindere pentru toate categoriile de fire permit dezvoltarea de senzori magnetomecanici.

3.2. Caracterizarea firelor magnetice amorfe prin trasarea curbelor GMI

În figura 20 sunt prezentate comparativ curbele GMI pentru fire magnetice amorfe acoperite cu sticlă ($\text{Co}_{68,15}\text{Fe}_{4,35}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$, $\text{Fe}_{73,5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13,5}\text{B}_9$ cu dimensiuni 19/31 μm respectiv 20/47 μm) și pentru fire convenționale ($\text{Co}_{68,15}\text{Fe}_{4,35}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$, $\text{Fe}_{77,5}\text{Si}_{7,5}\text{B}_{15}$ cu diametrele de 100 μm) trasate pentru frecvența de 1Mhz (Figura 20a) și 10Mhz (Figura 20b).

Se observă că pentru eșantioane diferite avem comportament diferit. Pentru firele de tip CoFeSiB în stare as-cast curbele GMI prezintă două vârfuri a căror pantă este diferită fiind abruptă la câmpuri magnetice de valoare mică și lină pentru câmpuri magnetice de valoare mai mare. Acest aspect poate fi util în cazul senzorilor ce utilizează efectul GMI întrucât se pot realiza senzori cu două game de măsură, cu sensibilitate ridicată pentru câmpuri magnetice de valoare mică și domeniu de măsură mare pentru câmpuri de valoare mare.

Pentru firele de tip CoFeSiB tratate cât și în cazul celor FeCuSiNbB (as-cast și tratat) caracteristica GMI prezintă un singur vârf. Aceste fire pot fi folosite pentru senzori cu o singură gamă de măsură a căror sensibilitate depinde de frecvența de excitație aleasă.

Din cauza simetriei curbelor GMI pentru câmpuri externe aplicate negative și pozitive, un senzor bazat pe acest efect are nevoie de un câmp magnetic de polarizare pentru a putea măsura atât câmpuri magnetice negative cât și pozitive. Câmpul de polarizare având rol de a deplasa caracteristica pe axa orizontală în așa fel încât mijlocul zonei de interes de pe caracteristica să corespundă cu câmp magnetic aplicat egal cu zero.

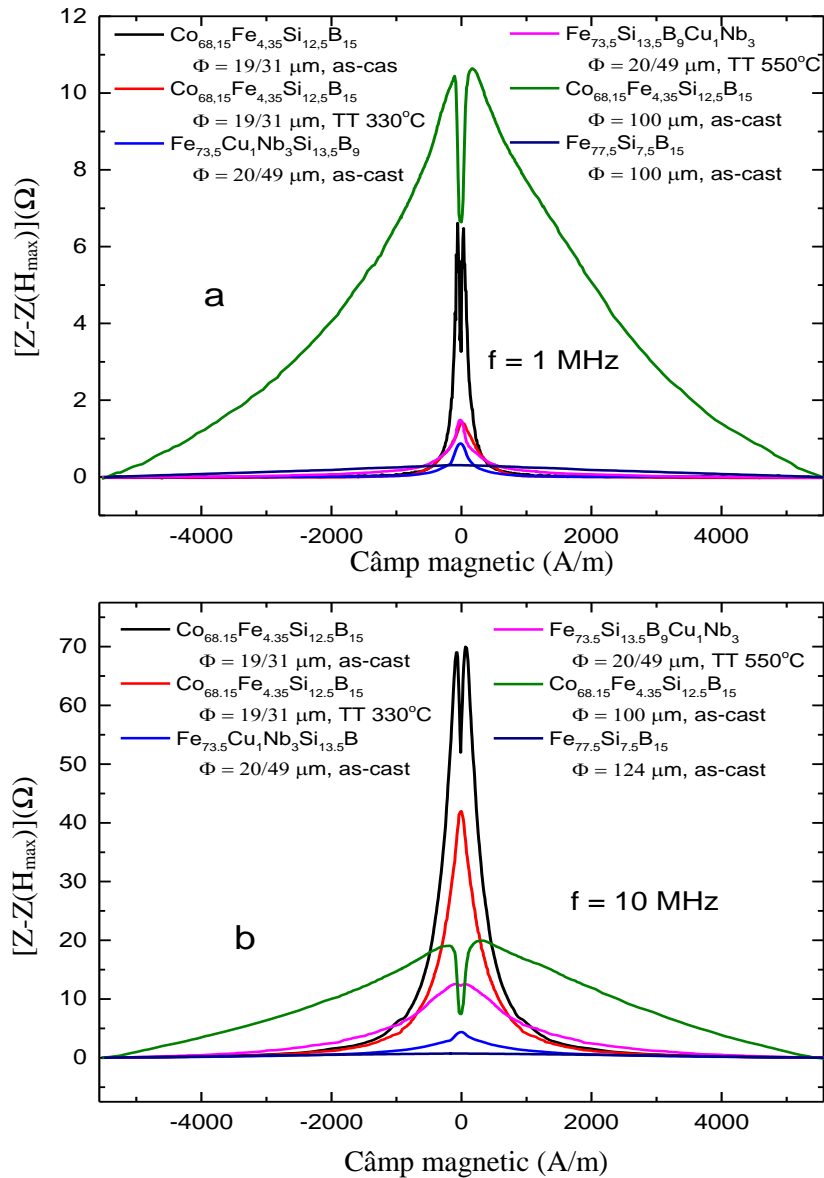


Figura 20. Curbele GMI pentru fire magnetice amorphe, acoperite cu sticlă și convenționale: a) frecvența de 1Mhz; b) frecvența de 10Mhz.

În figura 21 este prezentată variația maximă a impedanței magnetice gigant în funcții de frecvență pentru eșantioanele studiate. Se observă că cea mai mare variație a impedanței magnetice gigant la frecvență mică (10,6 Ω la frecvența de 1Mhz) este în cazul firului magnetic amorf convențional $\text{Co}_{68,15}\text{Fe}_{4,35}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$ cu diametrul de 100 μm . Existența efectului GMI la frecvență mică este importantă întrucât circuitul electronic de preluare a semnalului este ușor de realizat. Pentru realizarea senzorilor cu sensibilitate ridicată este necesar să se lucreze cu frecvențe mari (de ordinul zecilor de Mhz întrucât răspunsul GMI este mai pronunțat) chiar dacă sunt necesare circuite electronice mai performante.

Variația impedanței cu frecvența crește pentru toate eșantioanele studiate cu excepția firului cu compoziția $\text{Fe}_{77,5}\text{Si}_{7,5}\text{B}_{15}$ pentru care nu există răspuns GMI deoarece aceste fire nu prezintă o structură de domenii circumferențială. Cea mai mare variație a impedanței magnetice gigant apare în cazul firului $\text{Co}_{68,15}\text{Fe}_{4,35}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$ cu diametrul de 19/31 μm acoperit cu sticlă, atât tratat cât și as-cast. Aceste fire fiind cele mai potrivite pentru realizarea senzorilor (bazați pe efectul GMI), pentru aplicații unde este nevoie de sensibilitate ridicată.

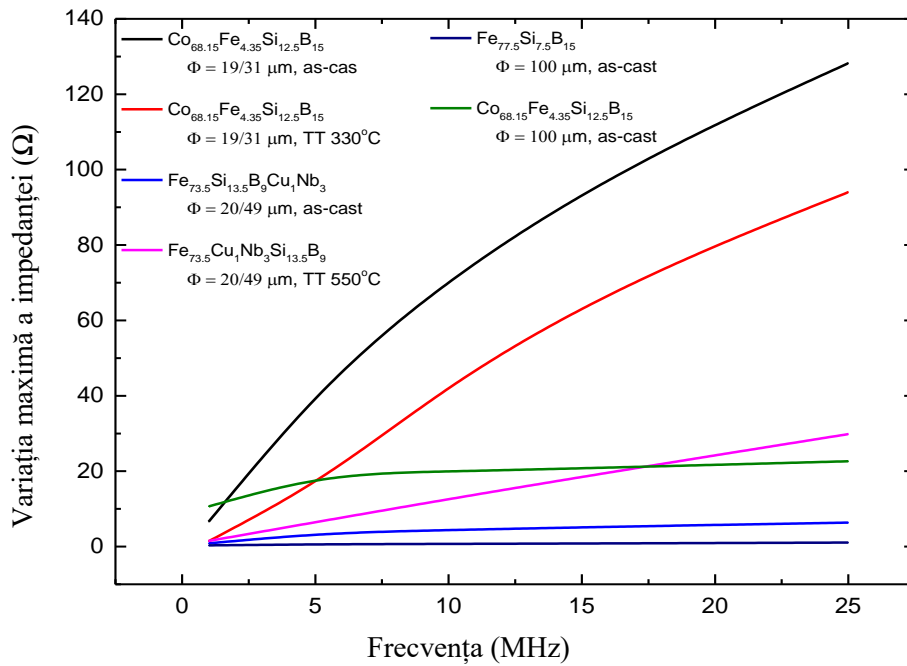


Figura 21. Variația maximă a impedanței magnetice gigant în funcții de frecvență.

Măsurătorile GMI efectuate arată faptul că firele din aliaj $\text{Co}_{68,15}\text{Fe}_{4,35}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$ și $\text{Fe}_{73,5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13,5}\text{B}_9$ atât tratate cât și în stare as-cast pot fi folosite ca element sensibil pentru realizarea senzorilor magnetici a căror caracteristici pot fi optimizate prin tratamente termice.

Capitolul 4

Contribuții privind realizarea de senzori având ca element sensibil fir magnetic amorf.

În cadrul acestui capitol sunt prezentate contribuțiile ale autorului tezei de doctorat privind aplicarea firelor magnetice amorfe convenționale și a celor acoperite cu sticlă la realizarea de senzori. Funcționarea senzorilor realizați se bazează pe: efectul magnetoelastic, efectul magnetoimpedanță gigant, efectul Barkhausen gigant; modificarea permeabilității magnetice în funcție de tensiunea mecanică. Cercetările au fost efectuate în cadrul Institutului Național de Cercetare-Dezvoltare pentru Fizică Tehnică Iași (INCDFT-Iași)

4.1. Realizarea bobinelor de excitație, polarizare și recepție a semnalului pentru senzori

Înfășurarea bobinelor în jurul firului amorf, s-a făcut utilizând o mașină semiautomată pentru bobinat realizată în cadrul INCDFT Iași (Figura 22). Cu ajutorul acestei mașini s-au realizat bobine

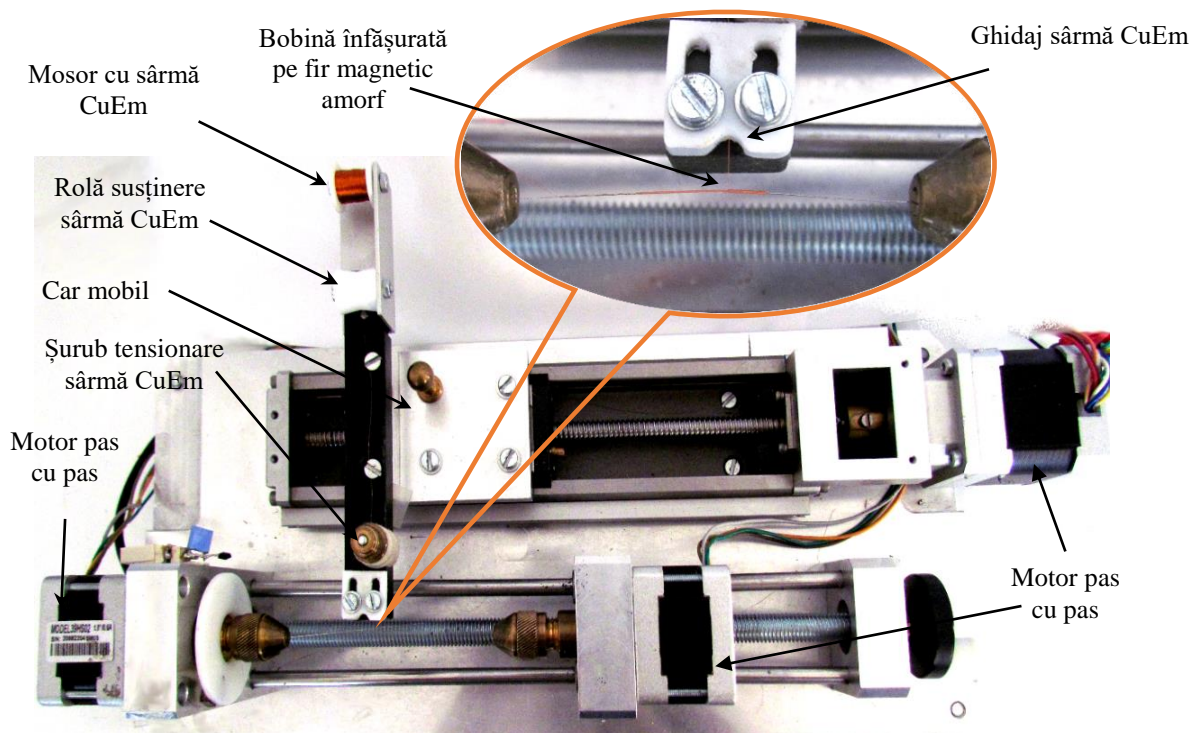


Figura 22. Vedere de ansamblu a mașinii de bobinat realizată în cadrul INCDFT Iași

cu dimensiuni mici, cu sârmă din cupru emailat (CuEm) cu diametre cuprinse între 20 μm și 70 μm , având miezul amorf cu diametre cuprinse între 30 μm și 120 μm .

În figura 23 sunt prezentate câteva exemple de bobine realizate cu mașina de bobinat descrisă în acest capitol. Bobinele pot fi realizate direct pe firul amorf (Figurile 31a și 31b) sau pe un tub de obicei din ceramică (în interiorul căruia se introduce firul amorf). De asemenea bobinele pot fi construite pe un suport rigid care ulterior se îndepărtează obținându-se în final o bobină fără suport

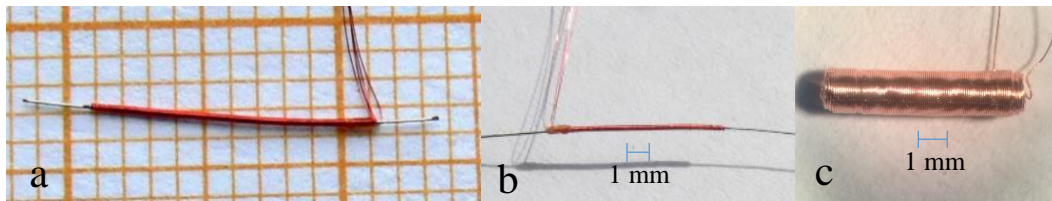


Figura 23. Bobine realizate în cadrul INCDFIT-Iași.

(Figura 23c). În acest caz este necesar să se utilizeze o sârmă din CuEm prevăzută pe suprafața cu un adeziv care lipește spirele între ele când bobina este încălzită.

4.2.2. Senzor magnetoelastic pentru monitorizarea/înregistrarea undei de puls

Senzorul magnetoelastic pentru înregistrarea undei de puls vine în completarea altor tipuri de senzori sau dispozitive similare existente, acesta măsurând deformarea mecanică a arterelor, datorate circulației pulsatorii a sângelui [25, 26].

Principiul de funcționare al senzorului magnetoelastic se bazează pe schimbările ce apar în procesele de magnetizare într-un fir magnetic amorf atunci când se află sub acțiunea unui stimul mecanic. Senzorul este alcătuit dintr-o bobină ce conține 250 de spire, din sârmă de cupru cu diametrul 35 μm înfășurată direct pe miezul magnetic (reprezentat de un fir magnetic amorf convențional cu compoziția $\text{Co}_{68,18}\text{Fe}_{4,32}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$ în stare as-cast cu diametrul de 100 μm).

Când firul este tensionat, impedanța bobinei scade datorită schimbărilor de permeabilitate și prin urmare semnalul util indus în bobina senzorului va scădea.

Pentru a putea detecta micile variații ale mișcării pielii, datorate pulsului arterial, senzorul a fost montat pe un suport special creat pentru acesta (Figura 24). Suportul senzorului constă dintr-un ansamblu de două regiuni cu elasticitate diferită: o regiune semielastică (componenta rigidă) care apasă pe mijlocul senzorului presându-l spre pielea din vecinătatea arterei; o regiune elastică

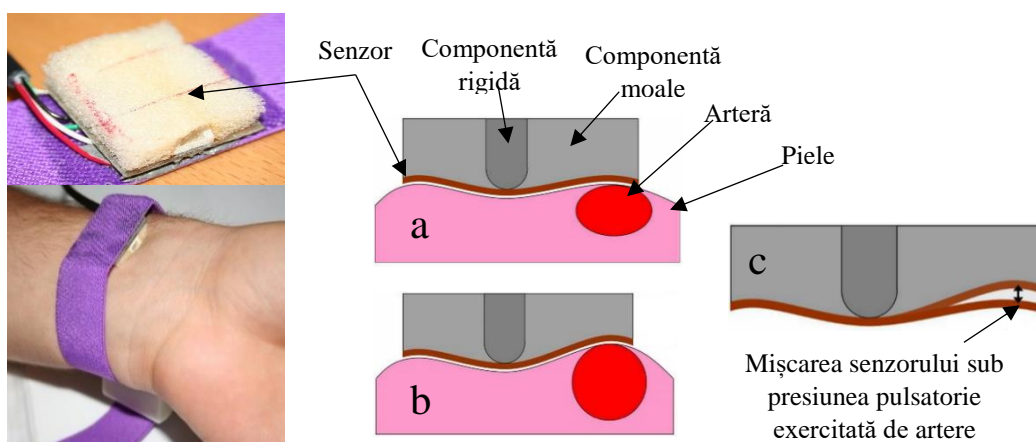


Figura 24. Ansamblul senzor suport fixat pe artera radială [25].

(componenta moale), care ajută la mularea sensorului pe suprafața pielii pentru a putea prelua mișcarea provenită de la arteră. În lipsa undei de puls (Figura 24a), sensorul este slab tensionat de suport însă când apare unda de puls (Figura 24b), vasul de sânge se extinde și împinge sensorul creând o tensiune suplimentară care duce la o scădere a permeabilității firului amorf și prin urmare, la o scădere a semnalului indus în bobina sensorului. În figura 24c este indicată mișcarea sensorului care se datorează circulației pulsatorii a sângelui. Semnalul provenit de la senzor este prelucrat prin intermediul unui circuit electronic analogic special conceput apoi digitizat și înregistrat pe calculator prin intermediul unei aplicații realizate în LabView.

Având în vedere rezultatele satisfăcătoare obținute cu sistemul de monitorizare a undei de puls a fost dezvoltat un dispozitiv portabil de monitorizare a undei de puls (Figura 25). Sistemul de achiziție de date, bazat inițial pe un calculator, a fost înlocuit de un microcontroler care preia semnalul analogic de la senzorul magnetoelastic și îl digitizează prin intermediul unui convertor analog numeric integrat de 10 biți apoi îl înregistrează pe o memorie externă și îl afișează pe un ecran color cu rezoluție de 128x128 pixeli.

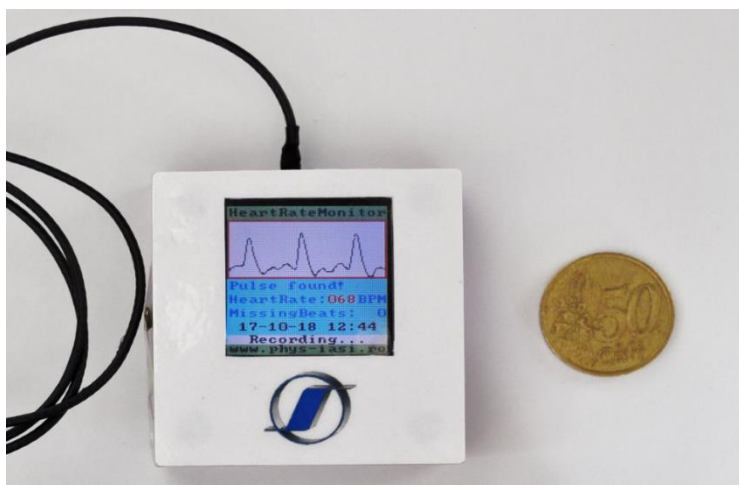


Figura 25. Vedere de ansamblu a dispozitivului portabil pentru monitorizarea undei de puls, realizat în cadrul INCDFI-Iași.

4.3.2. Senzor magnetoelastic pentru măsurarea forței.

Senzorul de forță cu element sensibil fir magnetic cu structură amorfă prezintă flexibilitate și sensibilitate ridicată [27]. Elementul sensibil este format dintr-un fir magnetic amorf convențional în stare as-cast cu compoziția $\text{Co}_{68,18}\text{Fe}_{4,32}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$, având diametrul de 100 μm . Peste elementul sensibil a fost înfășurată o bobină cu două straturi având 5 mm lungime și 200 de spire din sârmă din CuEm cu diametrul de 0,04 mm.

Senzorul de forță este compus din elementul sensibil magnetoelastic montat circumferențial pe un tub din latex și fixat cu un tub termocontractabil (Figura 26).

Pentru senzorul de forță au fost testate trei configurații diferite din punct de vedere al construcției elementelor sensibile și distribuției acestora:

– Un element sensibil unic având lungimea totală de 9,5 mm (miezul magnetic amorf fiind mai lung decât bobina) (Figura 26a);

- Patru bobine, conectate în punte, înfășurate pe un singur fir cu lungimea egală cu circumferința suportului elastic (38 mm) (Figura 26b). Distanța dintre bobine este de 5,4 mm, permițând obținerea unei distribuții simetrice a bobinelor în jurul suportului elastic;
- Patru bobine, conectate în punte, înfășurate fiecare pe un fir separat de lungime de 9,5 mm, plasat simetric pe suportul elastic (Figura 26c).

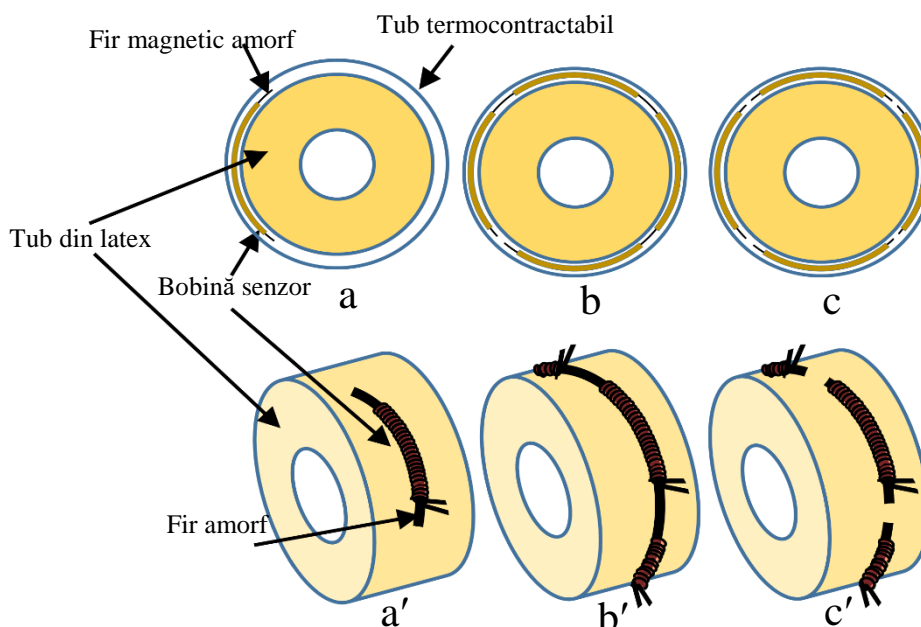


Figura 26. Diferite variante de senzori. (a-a') O singura bobina înfășurată pe un fir amorf; (b-b') Patru bobine conectate în punte înfășurate pe un singur fir amorf; (c-c') Patru bobine conectate în punte înfășurate fiecare pe câte un fir amorf [27]

Elementul elastic folosit pentru senzor a fost un tub din latex cu diametrul exterior de 12 mm și grosimea peretelui de 3 mm. Conform specificațiilor producătorului, tubul de latex are rezistența la tracțiune de 4000 psi, alungirea maximă de 740%, modulul elasticitate de 108 psi (fără alungire) și duritatea de 40 Shore A.

Caracteristicile senzorului de forță în toate cele trei configurații pentru două valori ale curentului electric de excitație sunt prezentate în figura 27. Pe axa verticala este dată tensiunea electrica de la ieșirea circuitului electronic împărțită la amplificarea acestuia, pentru a obține valoarea tensiunii la bornele senzorului. Datorită distribuției elementelor sensibile în punte, în cazul configurației cu patru senzori (Figura 26c), impedanțele elementelor de detecție Z_2 și Z_3 cresc, în timp ce impedanțele Z_1 și Z_4 scad atunci când elementul elastic se deformează sub influența forței de compresie aplicată, F . Pentru forța de tracțiune aplicată, impedanțele elementelor de detectare Z_2 și Z_3 scad, în timp ce Z_1 și Z_4 vor crește.

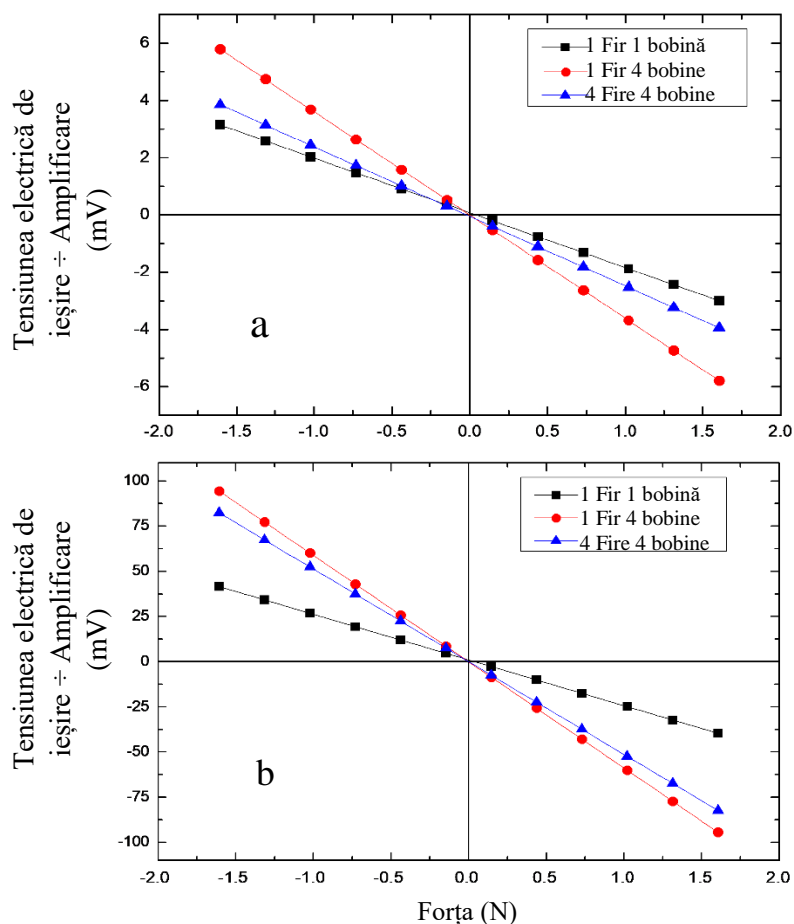


Figura 27. Tensiunea electrică de ieșire în funcție de forța aplicată, pentru excitația elementelor sensibile cu un curent vârf la vârf de: a) 3 mA; b) 50 mA [27].

Datele prezentate în figura 27 corespund celor trei configurații ale elementelor sensibile dispuse în jurul tubului din latex (un fir magnetic amorf și o bobină, un fir magnetic amorf și patru bobine, patru fire magnetice amorse și patru bobine).

4.4. Senzori de tip fluxgate

4.4.2. Senzor de tip fluxgate ortogonal

În continuare este prezentat studiul făcut pe un senzor fluxgate ortogonal la care detecția se face pe frecvența fundamentală [21]. Pentru rezultatele prezentate senzorul folosit are ca element activ fir magnetic amorf convențional cu compoziția $\text{Co}_{68,18}\text{Fe}_{4,32}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$ în stare as-cast și lungimea de 30 mm. Au fost testate fire magnetice amorse cu diametre cuprinse între 80 și 120 μm , cele mai bune rezultate fiind obținute pe firul de 120 μm .

În figura 28 este prezentat senzorul de tip fluxgate ortogonal folosit pentru efectuarea testelor. Construcția senzorului s-a făcut prin înfășurarea a două bobine cu lungimea de 20 mm având fiecare 500 spire înfășurate pe două tuburi ceramice. Firele amorse au fost introduse în interiorul tuburilor pentru a putea fi schimbate cu ușurință și totodată pentru a se evita crearea de tensiuni mecanice în fir. Bobinele au fost fixate pe un suport din cablaj imprimat având distanța dintre ele de 5 mm.

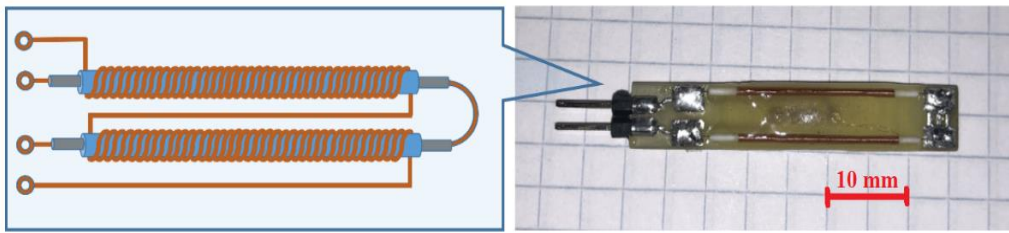


Figura 28. Vedere de ansamblu a senzorului fluxgate ortogonal [21].

Funcționarea senzorului se bazează pe mecanismul de inversare a magnetizării pereților de domenii circumferențiale, urmare a câmpului magnetic circumferențial H_ϕ .

Pentru a schimba funcționarea senzorului fluxgate ortogonal în modul fundamental este necesar să se aplice un curent de continuu peste curentul alternativ de excitație. Aplicarea unui curent electric continuu suficient de mare va determina o extindere a volumului de material implicat în procesele de magnetizare și totodată îmbunătățirea răspunsului senzorilor. Se obține astfel un semnal de ieșire mai mare pentru senzorul fluxgate ortogonal în modul fundamental decât în cazul clasic (senzorul fluxgate ortogonal cu detecție pe armonică a doua) și în același timp se reduce semnificativ zgomotul.

În figura 29 sunt prezentate sensibilitatea senzorului fluxgate ortogonal precum și zgomotul la frecvența de 1 Hz și 10 Hz. Pot fi identificate două regiuni distincte: (a) când curentul alternativ are valori sub 50 mA și (b) când curentul alternativ de excitație are valori peste 50 mA. Fiecare regiune prezintă tendințe diferite în ceea ce privește evoluția zgomotului magnetic în funcție de amplitudinea curentului de excitație. În regiunea (a) zgomotul scade odată cu creșterea curentului de excitație alternativ până atinge un minim, apoi pe măsură ce crește mai departe curentul de excitație

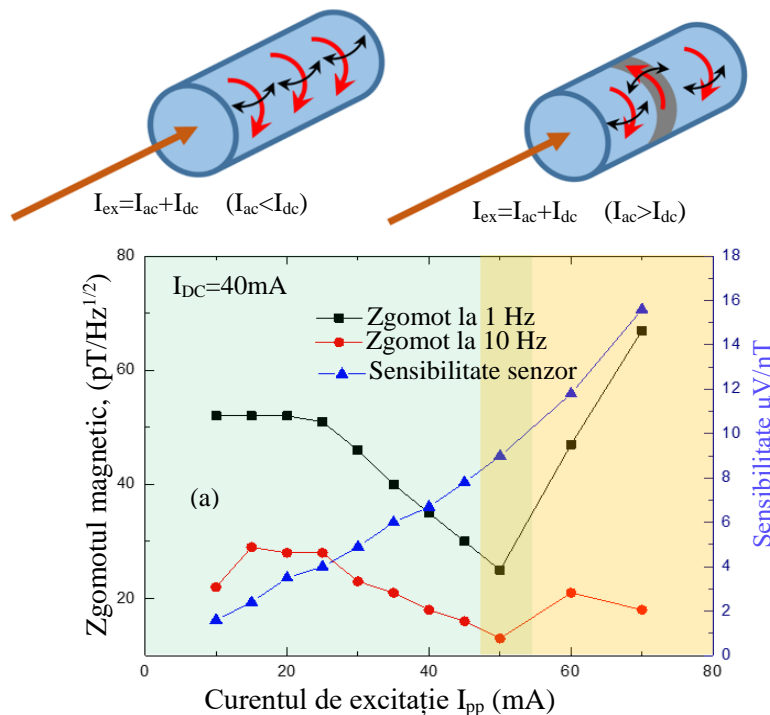


Figura 29. Sensibilitatea senzorului fluxgate ortogonal precum și zgomotul la frecvența de 1 Hz și 10 Hz [21].

alternativ zgomotul începe din nou să crească (regiunea b) din figura 29. Între cele două regiuni când curentul alternativ de excitație are valori de aproximativ 50 mA se obține un nivel minim de zgomot. Acest aspect poate fi explicat ținând cont de procesele de magnetizare care apar în miezul magnetic implicat în funcționarea senzorului. Cele două regiuni (a) și (b) corespund mecanismelor de magnetizare diferite care apar și anume procese de magnetizare reversibile datorate rotației momentelor magnetice pentru regiunea (a) și ireversibile pentru regiunea (b) datorate mișcării pereților de domenii.

Funcționarea optimă a senzorului fluxgate ortogonal în modul fundamental pentru un anumit curent electric continuu (40mA în cazul prezentat) este determinată de valoarea minimă a zgomotului magnetic care este de $25\text{pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ pentru frecvența de 1 Hz respectiv $13\text{pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ pentru frecvența de 10Hz (Figura 29). Sensibilitatea maximă obținută, când raportul semnal zgomot a fost maxim a fost de $9,5\ \mu\text{V/nT}$ pentru un fir cu diametrul de $120\ \mu\text{m}$. Pentru senzorul prezentat aplicarea unui curent alternativ de excitație sub 50 mA garantează că magnetizarea are loc numai prin rotație iar zgomotul de tip Barkhausen este anulat în proporție foarte mare.

4.4.3. Senzor de tip fluxgate cu măsurarea timpilor de rezidență (RTD) fără bobină de excitație.

Senzorul de tip fluxgate RTD fără bobină de excitație se bazează pe o nouă metodă de comutare a magnetizării axiale în microfibrele amorfe acoperite cu sticlă cu comportament bistabil. Metoda a fost raportată recent în literatura de specialitate fiind detaliată de alți autori și constă în aplicarea unui curent direct printr-o probă magnetică supusă torsiunii controlate [28, 29].

În figura 30 este prezentată schema de principiu a unui nou senzor, de tip fluxgate RTD fără bobină de excitație, realizat la INCDFT-Iași (Figura 30a). De asemenea în figură este prezentată

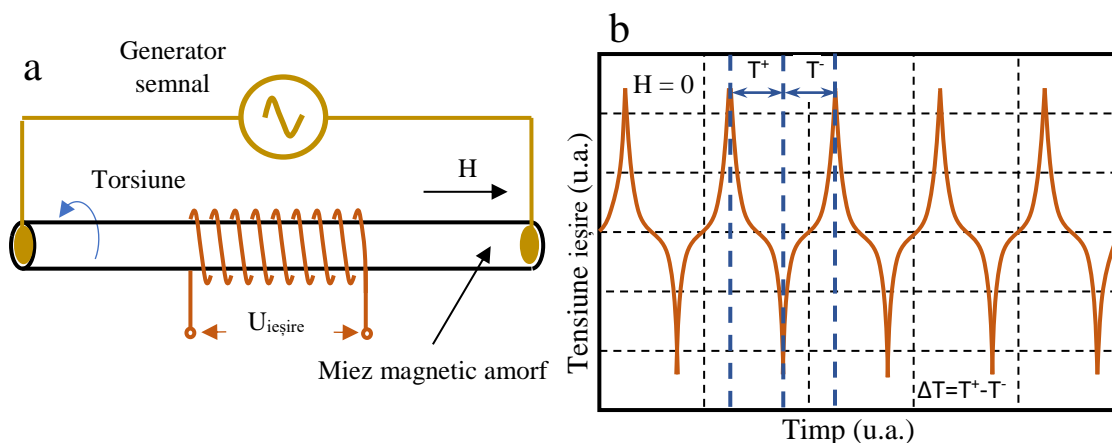


Figura 30. a) Schema de principiu a senzorului fluxgate RTD cu fir acoperit cu sticlă torsionat; b) Semnalul indus în lipsa câmpului magnetic extern.

forma semnalului indus în bobina de recepție pentru diferite valori ale câmpului magnetic: $H=0$ (Figura 30b). Senzorul are ca element sensibil un fir magnetic amorf acoperit cu sticlă, având compoziția $\text{Co}_{68,15}\text{Fe}_{4,35}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$, și dimensiunile de $19/31\ \mu\text{m}$ (diametrul miezului metalic / diametrul total). Firul a fost tratat termic la $300\ ^\circ\text{C}$ timp de o oră, deoarece acest fir nu prezintă comportament bistabil în stare as-cast, acesta fiind indus în urma tratamentului termic așa cum este arătat în capitolul 3. Lungimea firului magnetic este de 9 mm și este introdus într-o bobină cu 500 de spire.

Firele magnetice amorse acoperite cu sticlă prezintă predominant magnetizare axială. La trecerea unui curent printr-un fir magnetic amorf apare un câmp magnetic circular în jurul firului. Pentru a se produce o interacțiune între câmpul magnetic și magnetizarea existentă într-un fir amorf străbătut de curent este necesar ca acesta să fie torsionat. În acest fel în fir se creează o magnetizare elicoidală care conține componente atât în lungul firului cât și perpendicular pe suprafața acestuia (ceea ce va permite o interacțiune între magnetizarea din fir și câmpul din jurul său făcând posibilă comutarea magnetizării).

Aplicând un semnal sinusoidal pe capetele unui fir magnetic amorf torsionat se obține la bornele bobinei de detecție, care înconjoară firul amorf, un semnal alternativ sub formă unor pulsuri de tensiune pozitive și negative, corespunzătoare inversării magnetizării axiale a probei.

Când senzorul este supus unui câmp magnetic extern longitudinal, simetria în timp a picurilor semnalului indus se schimbă similar ca în cazul unui senzor fluxgate RTD clasic care folosește bobina de excitație. Pentru un câmp magnetic aplicat egal cu zero picurile de tensiune induse sunt echidistante, acestea apar la intervale egale de timp dintre un puls negativ și unul pozitiv respectiv un puls pozitiv și unul negativ ($T^+ = T^-$) (Figura 30b). În momentul în care senzorul este supus unui câmp magnetic extern având direcția în lungul firului magnetic amorf apare o asimetrie a intervalelor de timp dintre vârfurile de tensiune indusă ($T^+ \neq T^-$). Diferența dintre două intervale de timp succesive este măsurată iar prin calibrare este corelată cu câmpul magnetic aplicat.

În figura 31 este prezentat circuitul electronic al senzorului realizat pe cablaj imprimat (Figura 31a), senzorul fluxgate fără bobină de excitație (Figura 31b) și ecranul pentru afișare a datelor (Figura 31c) (montat pe cablajul imprimat în spatele circuitului electronic). Valorile măsurate ale intervalelor de timp, T^+ și T^- , diferența intervalelor de timp $\Delta T = T^+ - T^-$, și valoarea calculată a câmpului magnetic obținut prin calibrare, sunt afișate pe ecran. Senzorul este construit pe un suport din cablaj imprimat pe care a fost fixată bobina de recepție a semnalului indus. În interiorul bobinei este introdus firul

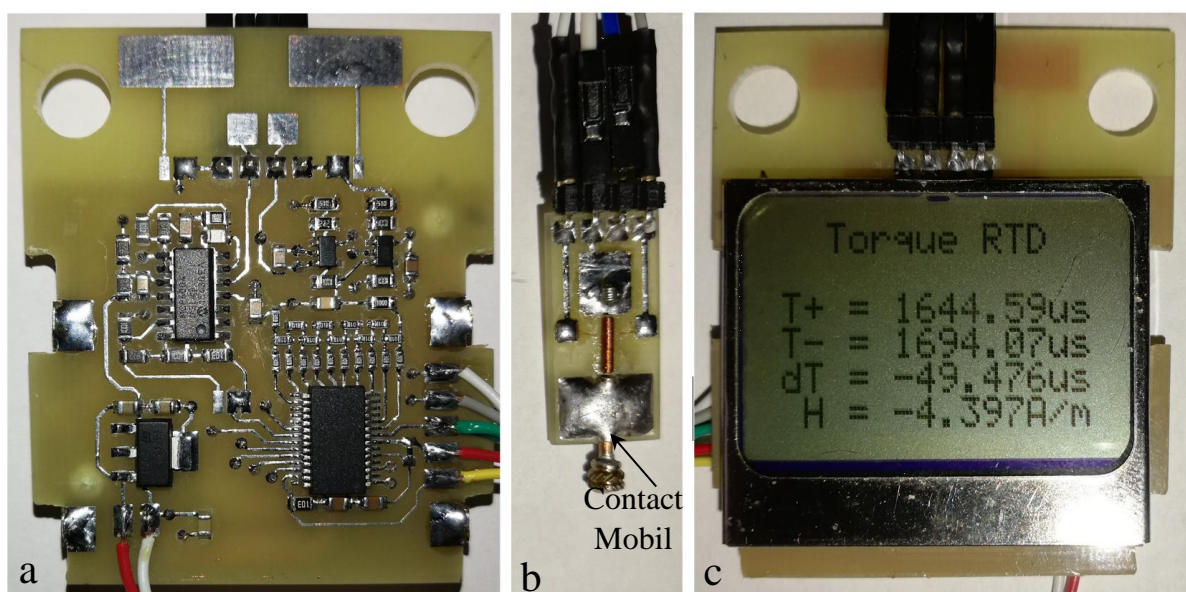


Figura 31. a) Circuitul electronic al senzorului realizat pe cablaj imprimat; b), Senzorul fluxgate fără bobină de excitație; c) Ecranul pentru afișare a datelor.

amorf care este fixat cu cositor de cablaj la un capăt iar al doilea capăt este lipit pe un contact mobil pentru a putea fi torsionat.

Pentru a testa influența torsiunii asupra caracteristicilor de transfer ale sensorului, a fost realizat un suport care permite rotirea unui capăt al firului magnetic amorf prin intermediul unui contact electric mobil. Torsionarea elementului sensibil s-a făcut la o valoare de 483 rad/m (ceea ce înseamnă că un capăt al firului a fost răsucit cu un unghi de 180 de grade, lungimea activă a firului fiind de 6,5 mm măsurată între punctele de lipitură).

Pentru un unghi de torsiune dat, intervalul de măsură al sensorului crește cu amplitudinea curentului aplicat prin firul amorf până la o valoare de 40 mA. Peste aceasta valoare, intervalul de măsură scade brusc datorită faptului că amplitudinea pulsurilor de tensiune induse în bobina sensorului scade și nu mai pot fi detectate de circuitul electronic. Scăderea amplitudinii pulsurilor induse se datorează faptului că imediat după valoarea de comutare a magnetizării curentul crește în continuare rapid și va crește volumul materialului magnetizat circumferențial datorat câmpului magnetic creat de curentul ce străbate firul amorf.

În figura 32 sunt prezentate caracteristicile de ieșire ale sensorului pentru diferite valori ale curentului de excitație (10, 20, 30, 40, 50 mA). Atunci când amplitudinea curentului de excitație crește, se observă o scădere a sensibilității sensorului. Acest comportament este legat de corelația dintre valoarea amplitudinii curentului la care se produce comutarea firului și frecvența curentului de excitație.

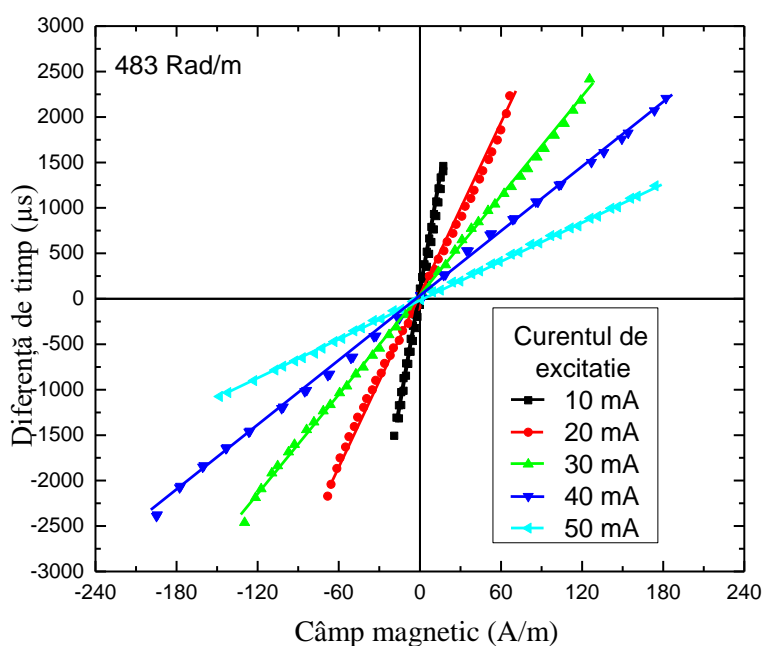


Figura 32. Caracteristicile de ieșire ale sensorului pentru valori diferite ale curentului de excitație.

Pentru firul utilizat, s-a obținut o valoare a sensibilității de 84 $\mu\text{s}/(\text{A}/\text{m})$ și un domeniu de măsură de 17 A/m pentru un curent de excitație de 10 mA. Pentru un curent de excitație cu o amplitudine de 40 mA s-a obținut o valoare de sensibilitate de 11,7 $\mu\text{s}/(\text{A}/\text{m})$ și un domeniu de măsură de ± 180 A/m.

4.5. Senzor pentru detecția autovehiculelor parcate

4.5.2. Senzor magnetic triaxial

În cadrul acestui studiu a fost realizat un senzor cu element sensibil fir magnetic amorf convențional în stare as-cast cu compoziția $\text{Co}_{68,18}\text{Fe}_{4,32}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$, având diametrul de $100\ \mu\text{m}$ și lungimea de $10\ \text{mm}$. Acest tip de fire prezintă sensibilitate ridicată la câmp magnetic datorită permeabilității magnetice ridicate (peste $1,2 \cdot 10^5$) dar și a structurii de domenii magnetice care constă dintr-un miez interior magnetizat axial și un înveliș exterior magnetizat circumferențial. Senzorul triaxial realizat prezintă performanțe ridicate și consum redus de energie electrică ceea ce îi conferă autonomie mare (de aproximativ 5 ani în funcție de temperatura mediului ambiant), fiind alimentat de la o baterie cu tensiunea nominală de $3,6\text{V}$ și un curent electric de $19\ \text{A/h}$.

Firul magnetic amorf a fost introdus într-o bobină de recepție cu 800 de spire din CuEm cu diametrul de $0,05\ \text{mm}$. Numărul de spire din bobină influențează forma semnalului recepționat în ceea ce privește amplitudinea și frecvența proprie de oscilație (întrucât bobina conține o capacitate parazită conectată în paralel cu aceasta). Amplitudinea semnalului crește cu creșterea numărului de spire iar frecvența proprie de oscilație scade.

Inducerea semnalului în bobina de recepție se datorează rotirii domeniilor magnetice de pe direcția longitudinală către circumferință sub influența câmpului circumferențial generat de trecerea pulsului de curent electric prin firul amorf. Componenta longitudinală a magnetizării apare atunci când firul amorf este plasat în câmp magnetic deoarece domeniile magnetice tind să se orienteze axial după direcția câmpului extern aplicat. În momentul în care se aplică pulsul de curent pentru excitație, magnetizarea longitudinală scade brusc și generează un flux magnetic variabil care la rândul său duce la apariția unei tensiuni electrice în bobina de recepție. Valoarea tensiunii electrice de ieșire este proporțională cu magnetizarea axială ce apare datorită câmpului magnetic extern aplicat.

În figura 33 este prezentată caracteristica de ieșire a senzorului, trasată aplicând un câmp magnetic cu valoarea de $-150\ \text{A/m}$ care crește treptat până la $+150\ \text{A/m}$ după care câmpul revine la

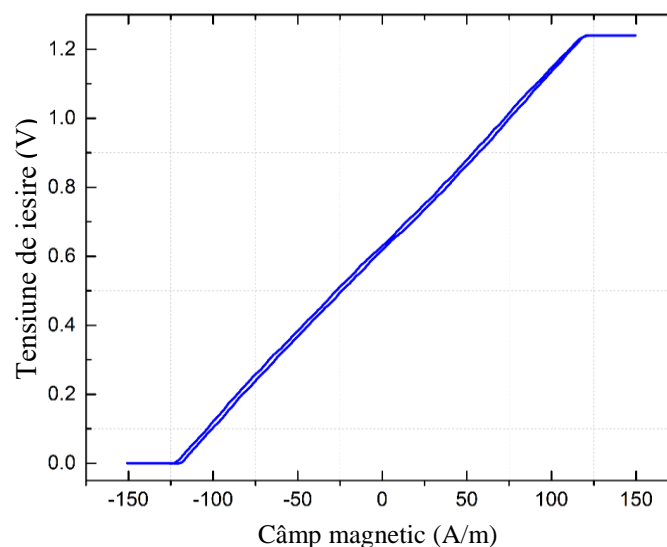


Figura 33. Caracteristica de ieșire a senzorului magnetic pentru detecția autovehiculelor.

valoarea inițială. Curba de transfer a senzorului este liniară și prezintă un mic histerezis, de maxim 4 A/m, care nu afectează buna funcționare a dispozitivului pentru aplicația curentă.

Pentru a măsura semnalele provenite de la cei trei senzori, corespunzătoare celor trei direcții microcontrolerul folosește un singur convertor analog numeric și din acest motiv intrările analogice sunt multiplexate iar sincronizarea cu pulsul de excitație pentru fiecare senzor este făcută prin software.

În figura 34 este prezentat un senzor de parcare realizat în cadrul cercetărilor (Figura 34a) și interfața grafică a aplicației web (Figura 34b) care citește datele de pe serverul ce gestionează

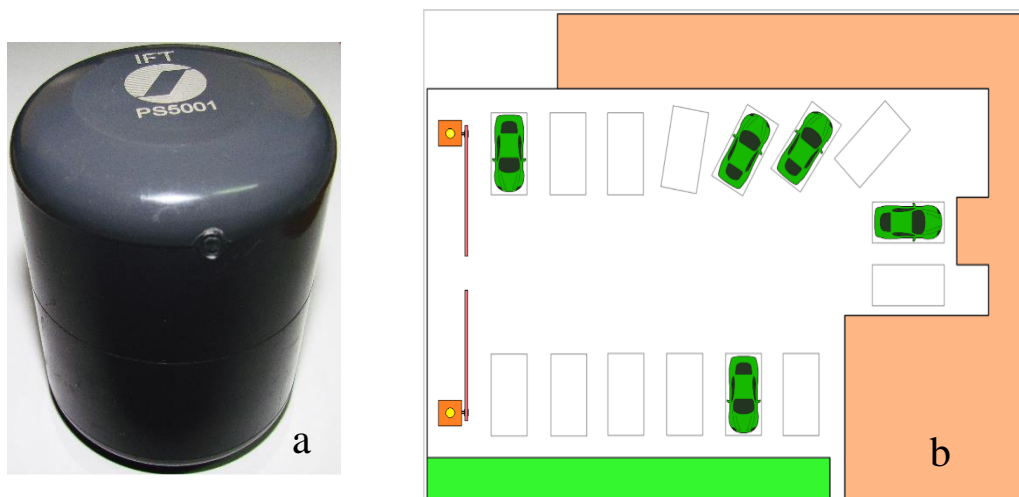


Figura 34. a) Vedere de ansamblu a senzorului de parcare montat în carcasă; b) Interfața grafică a aplicației web creată pentru parcare INCDFI-Iași.

senzori de parcare înregistrați în aplicația grafică și afișează un simbol de mașină pe fiecare loc care este ocupat creând o imagine de ansamblu asupra parcării. Interfața grafică a fost creată după configurația parcării din cadrul INCDFI-Iași.

Concluzii

Scopul principal al acestei lucrări îl reprezintă utilizarea materialelor magnetice cu structura amorfă, sub formă de fire, în realizarea unor noi tipuri de senzori sau îmbunătățirii performanțelor celor existenți.

În cadrul cercetărilor a fost analizată dependența ciclurilor de histerezis magnetic și a permeabilității magnetice maxime de valoarea tensiunii mecanice de întindere (cu valori de până la 500 MPa) cât și curbele de magnetoimpedanță gigant (GMI) pentru următoarele materiale:

- Fire magnetice amorfe acoperite cu sticlă $\text{Co}_{68,15}\text{Fe}_{4,35}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$ și $\text{Fe}_{73,5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13,5}\text{B}_9$, cu dimensiunile 19/31 μm respectiv 20/49 μm (diametrul miezului metalic / diametrul total), în stare as-cast cât și tratate termic. Pentru firul magnetic amorf $\text{Co}_{68,15}\text{Fe}_{4,35}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$ tratamentul termic la 300 °C, timp de o oră, a condus la inducerea unui comportament bistabil (necesar pentru funcționarea senzorilor de tip fluxgate cu măsurarea timpilor de rezidență).

- Fire magnetice amorfe convenționale $\text{Co}_{68,15}\text{Fe}_{4,35}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$ și $\text{Fe}_{77,5}\text{Si}_{7,5}\text{B}_{15}$ având diametrele de 100 μm respectiv 124 μm în stare as-cast.

În urma studiului efectuat și a înțelegerii comportamentului acestor materiale la stimulii la care au fost supuse, au fost dezvoltati / îmbunătățiți următorii senzori:

- *Senzor magnetoelastic pentru monitorizarea / înregistrarea undei de puls* cu element sensibil fir magnetic amorf convențional $\text{Co}_{68,18}\text{Fe}_{4,32}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$ cu diametrul de 100 μm , în stare as-cast. Senzorul realizat este capabil să detecteze micile deformări de la nivelul pielii produse de vasele de sânge (datorate circulației pulsatorii a sângelui). Rezultatele satisfăcătoare obținute au condus la realizarea unui dispozitiv portabil pentru monitorizarea și înregistrarea undei de puls.

- *Senzor magnetoelastic pentru măsurarea forței* cu element sensibil fir magnetic amorf convențional, $\text{Co}_{68,18}\text{Fe}_{4,32}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$ în stare as-cast, cu diametrul de 100 μm . Senzorul prezintă caracteristică de ieșire liniară într-un domeniu larg de forțe ($\pm 1,6$ N) având sensibilitate superioară în comparație cu senzori similari. Pentru o valoare a curentului electric de excitație de 50 mA s-a obținut o sensibilitate de: 26,7 mV/N pentru configurația cu un singur fir amorf și o singură bobină; 55,7 mV/N pentru configurația un singur fir amorf cu patru bobine; 47 mV/N pentru configurația cu patru bobine și patru fire amorfe.

- *Senzor de tip fluxgate ortogonal* cu detecția pe frecvența fundamentală cu element sensibil fir magnetic amorf convențional $\text{Co}_{68,18}\text{Fe}_{4,32}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$ în stare as-cast. Au fost testate fire cu diametre cuprinse între 80 μm și 120 μm . În cazul acestui senzor a fost făcut un studiu cu scopul îmbunătățirii raportului semnal zgomot. Pentru senzorul realizat zgomotul magnetic a atins un minim de 25 pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ pentru frecvența de 1 Hz respectiv 13 pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ pentru frecvența de 10 Hz (pentru firului cu diametrul de 120 μm). Sensibilitatea senzorului pentru cel mai mare raport semnal zgomot a fost de 9,5 $\mu\text{V/nT}$.

- *Senzor de tip fluxgate cu măsurarea timpilor de rezidență (RTD) fără bobină de excitație*, cu element sensibil fir magnetic amorf acoperit cu sticlă $\text{Co}_{68,18}\text{Fe}_{4,32}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$ cu dimensiunile de 19/31 μm , tratat termic la 300 °C timp de o oră. În realizarea acestui senzor pentru măsurarea câmpului magnetic a fost utilizată o metodă nouă de comutare a magnetizării axiale în firele magnetice amorfe acoperite cu sticlă cu comportament bistabil. Sensibilitatea maximă obținută este de 84 $\mu\text{s}/(\text{A}/\text{m})$ pentru un curent electric de excitație egal cu 10 mA, domeniul de măsură în acest caz fiind de $\pm 17 \text{ A}/\text{m}$. Extinderea domeniului de măsură este posibilă crescând valoarea curentului electric de excitație dar în acest caz sensibilitatea este diminuată. Pentru un curent electric de excitație de 40 mA sensibilitatea obținută este 11,7 $\mu\text{s}/(\text{A}/\text{m})$ și domeniul de măsură $\pm 180 \text{ A}/\text{m}$

- *Senzor magnetic triaxial* pentru detecția autovehiculelor parcate cu element sensibil fir magnetic amorf convențional $\text{Co}_{68,18}\text{Fe}_{4,32}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$ cu diametrul de 100 μm în stare as-cast. A fost dezvoltat un senzor magnetic triaxial cu consum redus de energie alimentat pe baterie. Consumul redus se datorează faptului că senzorul furnizează la ieșire tensiune mare (de ordinul volților nefiind nevoie de amplificare) precum și modului de excitare cu pulsuri scurte ($< 5 \mu\text{s}$). Senzorul este capabil să detecteze dacă un loc de parcare este liber sau ocupat (prin măsurarea la interval de o secundă a câmpului magnetic înconjurător) și să trimită datele către un server în vederea centralizării. Senzorul prezintă o caracteristică liniară pentru un domeniu de măsură de $\pm 120 \text{ A}/\text{m}$.

Bibliografie

- [1] I. Ogasawava, S. Ueno, *Preparation and Properties of amorphous wires*, IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, Vol. 31, No. 2, 1995, DOI: 10.3390/chemosensors10010026.
- [2] T.R. Anantharaman, C. Suryanarayana, *Rapidly Solidified Metals*, TRANS TECH PUBLICATIONS, 1987, DOI: 10.1557/S0883769400055160.
- [3] R.W. Cahn, *Background to Rapid Solidification Processing in Rapidly Solidified Alloys: Processes, Structures, Properties, Applications*, H.H. LIEBERMANN, 1993, ISBN: 9780824789510.
- [4] S.A. Baranov, V.S. Larin, A.V. Torcunov, *Technology, Preparation and Properties of the Cast Glass-Coated Magnetic Microwires*, CRYSTALS, Vol. 7(6), No. 136, Jun. 2017, DOI:10.3390/cryst7060136.
- [5] H.W.F. Sung, C. Rudowicz, *Physics behind the magnetic hysteresis loop - a survey of misconceptions in magnetism literature*, JOURNAL OF MAGNETISM AND MAGNETIC MATERIALS, Vol. 260(1-2), pp. 250-260, Mar 2003, DOI: 10.1016/S0304-8853(02)01339-2.
- [6] D. H. Howling, *Simple 60-cps Hysteresis Loop Tracer for Magnetic Materials of High or Low Permeability*, REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS, Vol. 27(11), Jul 1956, DOI:10.1063/1.1715422.
- [7] H. Chiriac, N. Lupu, G. Stoian, G. Ababei, S. Corodeanu, T.A. Óvári, *Ultrathin Nanocrystalline Magnetic Wires*, CRYSTALS, Vol.7(2), No.48, Feb 217, DOI: 10.3390/cryst7020048.
- [8] D. Spasojevic, S. Bukvic, S. Milosevic, H.E. Stanley, *Barkhausen noise: Elementary signals, power laws, and scaling relations*, PHYSICAL REVIEW E, Vol. 54(3), pp. 2531-2546, Sep. 1996, DOI: 10.1103/PhysRevE.54.2531.
- [9] J. Kravcak, L. Novak, A. Zentko, *The analysis of large Barkhausen effect in the FeSiB amorphous wire*, CZECHOSLOVAK JOURNAL OF PHYSICS, Vol. 52(2), pp. 175-178, Feb. 2002, DOI: 10.1023/A:1014451124945.
- [10] L.G. Bujoreanu, *Materiale Inteligente*, EDITURA JUNIMEA, Iași, pp. 283-292, 2002 ISBN: 973-37-0735-X.
- [11] V. Apicellaa, C.S. Clementeb, D. Davinoa, D. Leonea, C. Visone, *Analysis and Modeling of a passive force sensor based on Villari effect*, Vol.183, pp. 234-243, May 2021, DOI: 10.1016/j.matcom.2020.01.013.
- [12] CH. Matteucci, *Memorie sur le Magnetisme Developee par le Courant Electrique*, COMPTES RENDUS, 24,301, 1847.
- [13] H. Chiriac, C.S. Marinescu, T.A. Óvári, Maria Neagu, *Sensor applications of amorphous glass-covered wires*, Conference Meeting Euroensors XII Meeting, Vol. 76(3), pp. 208-212, Aug. 1999, DOI:10.1016/S0924-4247(99)00032-1
- [14] I.R. Smith, K. J. Overshott, *The Wiedemann effect: a theoretical and experimental comparison*, British Journal of Applied Physics, Vol. 16, No. 9, DOI: 10.1088/0508-3443/16/9/302
- [15] K. MOHRI, T. KOHZAWA, K. KAWASHIMA, H. YOSHIDA, L.V. PANINA, *Magneto-inductive effect (MI effect) in amorphous wires*, IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, Vol. 28(5), pp. 3150-3152, SEP 1992, DOI: 10.1109/20.179741
- [16] M. Knobel, K.R. Pirota *Giant magnetoimpedance: concepts and recent progress*, JOURNAL OF MAGNETISM AND MAGNETIC MATERIALS Vol.242, pp. 33-40, APR 2002, DOI:10.1016/S0304-8853(01)01180-5
- [17] A. Talaat, M. Churyukanova, J. M. Blanco, M. Ipatov, V. Zhukova, A. Zhukov, *Simultaneous detection of giant magnetoimpedance and fast domain wall propagation in Co-based glass-coated microwires*, IEEE MAGNETICS LETTERS, Vol.7, No. 5200604, 2016, DOI: 10.1109/LMAG.2015.2505242

- [18]H. Chiriac, T.A. Óvári, S.G. Marinescu, V. Nagacevschi, *Magnetic anisotropy in FeSiB amorphous glass-covered wires*, IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, Vol.32(5), pp. 4755-4757, Sep. 1996, DOI: 10.1109/20.539141
- [19]S. Atalay and P.T. Squire, *Magnetoelastic Properties of Cold-Drawn FeSiB Amorphous Wires*, IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, Vol.28(5), pp. 3144-3146, Sep. 1992, DOI: 10.1109/20.179739
- [20]H. Chiriac, T.A. Óvári, G. Pop, F. Barariu, *Magnetic behavior of nanostructured glass covered metallic wires*, JOURNAL OF APPLIED PHYSICS, Vol,81(8), pp. 5817-5819, Apr, 2015, DOI: 10.1063/1.364678.
- [21]M. Tibu, S Corodeanu, **C. Hlenschi**, H. Chiriac, N. Lupu, *New aspects on the performance of a fundamental mode orthogonal fluxgate magnetometer based on amorphous wire cores*, AIP ADVANCES, Vol.11(1), Article Number 015113, JAN 1 2021, DOI: 10.1063/9.0000146
- [22]P.T. Squire, D. Atkinson, M.R.J. Gibbs S. Atalay, *Amorphous wires and their applications*, JOURNAL OF MAGNETISM AND MAGNETIC MATERIALS, Vol. 132(1-3), pp. 10-21, Apr. 1994, DOI: 10.1016/0304-8853(94)90295-X
- [23]M.Tibu, Horia Chiriac, *Amorphous wires-based magneto-inductive sensor for nondestructive control*, JOURNAL OF MAGNETISM AND MAGNETIC MATERIALS, Vol. 320(20), Oct 2008, DOI: 10.1016/j.jmmm.2008.04.100
- [24]B. Andò, S. Baglio, A.R. Bulsara, and V. Sacco *RTD Fluxgate: A Low-Power Nonlinear Device to Sense Weak Magnetic Fields*, IEEE INSTRUMENTATION & MEASUREMENT MAGAZINE, Vol. 8(4), 2005. DOI: 10.1109/MIM.2005.1518626
- [25]**C. Hlenschi**, S. Corodeanu, and H. Chiriac, *Magnetoelastic sensors for the detections of pulse waves*, IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, Vol. 49(1) pp. 117-119, Jan. 2013 DOI: 10.1109/TMAG.2012.2219855
- [26]H. Chiriac, **C.Hlenschi**, S.Corodeanu, M. Grecu, T.A. Óvári, N. Lupu, *Pulse Wave Detection Magnetoelastic Sensing Device Based on Nanocrystalline Microwires for the Indirect Diagnosis of Paroxysmal Rhythm Disorders*, IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, Vol.52(7),Nr 4001404,Iul 2016,DOI10.1109/TMAG.2016.2531908
- [27]**C. Hlenschi**, S. Corodeanu, N. Lupu, H. Chiriac, *Flexible Force Sensors Based on Permeability Change in Ultra-Soft Amorphous Wires*, IEEE SENSORS JOURNAL, Vol. 19(16), Aug. 2019, DOI: 10.1109/JSEN.2019.2913596
- [28]V. Zhukova, J. M. Blanco, A. Chizhik, M. Ipatov, A. Zhukov, *Current induced domain wall propagation in Co-rich amorphous microwires*, AIP ADVANCES, vol. 7, no. 056026, 2017. DOI: 10.1063/1.4977495
- [29]S. Corodeanu, H. Chiriac, A. Damian, N. Lupu, T.-A. Óvári, *Field and Current Controlled Domain Wall Propagation in Twisted Glass-Coated Magnetic Microwires*, SCIENTIFIC REPORTS, Vol. 9, No. 5868, 2019. DOI: 10.1038/s41598-019-42352-1

Activitatea științifică

Articole publicate în reviste cotate ISI din domeniul tezei

C. Hlenschi, S. Corodeanu, and H. Chiriac, *Magnetoelastic sensors for the detections of pulse waves*, IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, Vol. 49(1) pp. 117-119, Jan. 2013 DOI: 10.1109/TMAG.2012.2219855, **IF**=1,213, **AIS**= 0,387

C. Hlenschi, S. Corodeanu, N. Lupu, H. Chiriac, *Flexible Force Sensors Based on Permeability Change in Ultra-Soft Amorphous Wires*, IEEE SENSORS JOURNAL, Vol. 19(16), Aug. 2019, DOI: 10.1109/JSEN.2019.2913596 **IF** = 3,073, **AIS** = 0.556

H. Chiriac, **C.Hlenschi**, S.Corodeanu, M. Grecu, T.A. Óvári, N. Lupu, *Pulse Wave Detection Magnetoelastic Sensing Device Based on Nanocrystalline Microwires for the Indirect Diagnosis of Paroxysmal Rhythm Disorders*, IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, Vol.52(7),Nr 4001404,Iul 2016, DOI: 10.1109/TMAG.2016.2531908 **IF** = 1,24, **AIS** = 0,327

M. Tibu, S Corodeanu, **C. Hlenschi**, H. Chiriac, N. Lupu, *New aspects on the performance of a fundamental mode orthogonal fluxgate magnetometer based on amorphous wire cores*, AIP ADVANCES, Vol.11(1), Article Number 015113, JAN 1 2021, DOI: 10.1063/9.0000146, **IF** = 1,58, **AIS**₍₂₀₂₀₎ =0,374

Articole publicate în reviste cotate ISI din domeniul conexe tezei

S. Corodeanu, **C. Hlenschi**, C. Rotărescu, H. Chiriac, N. Lupu, T.A. Óvári, *Stochastic Magnetization Switching in Rapidly Solidified (Co_{0.94}Fe_{0.06})(72.5)Si_{12.5}B₁₅ Amorphous Submicronic Wires*, MATERIALS, Vol.15(3), No. Feb.2022, DOI: 10.3390/ma15030896. **IF** = 3,623, **AIS**₍₂₀₂₀₎ = 0,597

S. Corodeanu, **C. Hlenschi**, C. Rotărescu, H. Chiriac, N. Lupu, T.A. Óvári, *Structural relaxation in metastable magnetic submicronic wires*, JOURNAL OF ALLOYS AND COMPOUNDS, No. 164260, Jun 2022, DOI: 10.1016/j.jallcom.2022.164260. **IF** = 5,316, **AIS**₍₂₀₂₀₎ = 0,719

Lucrări prezentate de autorul tezei la conferințe din domeniul tezei de doctorat

C. Hlenschi, S. Corodeanu, H.Chiriac, N. Lupu, *Senzor de forță pe bază micro fir magnetic amorf*, Fizica și Tehnologiile Educaționale Moderne, FTEM, 24-25 Mai 2019, Iași, Romania (poster)

C. Hlenschi, S. Corodeanu, N. Lupu H. Chiriac, *Flexible Force Sensors based on magnetic amorphous wire*, IEEE Magnetics Society Chapter of the Romania Section, 24-25 Iunie 2019 Iași Romania.

Lucrări prezentate de alți autori la conferințe din domeniul tezei de doctorat, având ca și co-autor pe autorul tezei

M. Tibu, S Corodeanu, **C. Hlenschi**, H. Chiriac, N. Lupu, *New aspects on the performance of a fundamental mode orthogonal fluxgate magnetometer based on amorphous wire cores*, 65th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, 2-6 Noiembrie, 2020, Virtual Conference. (poster)

C. Hlenschi, S. Corodeanu, N. Lupu, H. Chiriac, *Tailorable magnetoelastic force sensors*, 12th European Magnetic Sensors and Actuators Conference EMSA 1-4 Iulie 2018, Atena, Grecia.(poster)

C. Hlenschi, S. Corodeanu, H.Chiriac, N. Lupu, *Force sensors based on magnetic amorphous wires*, IEEE International Magnetics Conference,Intermag, 23-27 April 2018, Singapore (poster)

C. Hlenschi , S. Corodeanu, H. Chiriac, *Magneto-Elastic Sensors for the Detection of Pulse Waves*, 9th European Magnetic Sensors and Actuators Conference, EMSA 1-4 Iulie 2012 Praga Republica Cehia (poster)

A. Lucrări prezentate de alți autori la conferințe din domenii conexe tezei, având ca și co-autor pe autorul tezei

N. Lupu, **C. Hlenschi**, F. Borza and H. Chiriac, *Low T_C Fe-Cr-Nb-B glassy alloys with variable Cr content for high sensitive temperature sensors*, IEEE International Magnetics Conference,Intermag, 7-11 mai 2012, Vancouver Canada (poster)

H. Chiriac, A. Jitariu1, M Tibu, **C. Hlenschi**, V. In, N. Lupu, *An integrated electric and magnetic field sensor head*, IEEE International Magnetics Conference, Intermag, 4-8 Mai 2014, Dresden, Germania (poster).