

SENZORI NANOSTRUCTURAȚI PENTRU SISTEMELE DE SUDARE HIBRIDE LASER-ARC

Teză destinată obținerii
titlului științific de doctor inginer
la
Universitatea "Politehnica" din Timișoara
în domeniul INGINERIE INDUSTRIALĂ
de către

Ing. Sorin Vasile Savu

Conducător științific:	prof.dr.ing. Dorin Dehelean
Referenți științifici:	prof.dr.ing. Emil Constantin
	prof.dr.ing. Mihail Mangra
	prof.dr.ing. Viorel Aurel Șerban

Ziua susținerii tezei: 21.11.2008

Seriile Teze de doctorat ale UPT sunt:

- | | |
|------------------------|---|
| 1. Automatică | 7. Inginerie Electronică și Telecomunicații |
| 2. Chimie | 8. Inginerie Industrială |
| 3. Energetică | 9. Inginerie Mecanică |
| 4. Ingineria Chimică | 10. Știința Calculatoarelor |
| 5. Inginerie Civilă | 11. Știința și Ingineria Materialelor |
| 6. Inginerie Electrică | |

Universitatea „Politehnica” din Timișoara a inițiat seriile de mai sus în scopul diseminării expertizei, cunoștințelor și rezultatelor cercetărilor întreprinse în cadrul școlii doctorale a universității. Seriile conțin, potrivit H.B.Ex.S Nr. 14 / 14.07.2006, tezele de doctorat susținute în universitate începând cu 1 octombrie 2006.

Copyright © Editura Politehnica – Timișoara, 2008

Această publicație este supusă prevederilor legii dreptului de autor. Multiplicarea acestei publicații, în mod integral sau în parte, traducerea, tipărirea, reutilizarea ilustrațiilor, expunerea, radiodifuzarea, reproducerea pe microfilme sau în orice altă formă este permisă numai cu respectarea prevederilor Legii române a dreptului de autor în vigoare și permisiunea pentru utilizare obținută în scris din partea Universității „Politehnica” din Timișoara. Toate încălcările acestor drepturi vor fi penalizate potrivit Legii române a drepturilor de autor.

România, 300159 Timișoara, Bd. Republicii 9,
tel. 0256 403823, fax. 0256 403221
e-mail: editura@edipol.upt.ro

Cuvânt înainte

Teza de doctorat a fost elaborată pe parcursul activității mele în cadrul Catedrei de Inginerie al Facultății de Ingineria și Managementul Sistemelor Tehnologice Drobeta Turnu Severin din cadrul Universității din Craiova și în laboratoarele de cercetare din cadrul INCD în Sudură și Încercări Materiale ISIM Timișoara.

Mulțumiri deosebite se cuvin conducătorului de doctorat prof.dr.ing. Dorin Dehelean pentru valoroasa îndrumare pe parcursul cercetărilor documentare și experimentale derulate, respectiv pentru facilitarea accesului la laboratoare cu înalt grad tehnologic din cadrul INCD în Sudură și Încercări Materiale ISIM Timișoara. Deasemenea mulțumiri deosebite sunt adresate domnului prof. dr. ing. Mihail Mangra, prorector cu probleme de cercetare în cadrul Universității din Craiova și domnului prof. dr. ing. Ion Ciupitu, decanul Facultății de IMST Drobeta Turnu Severin pentru sprijinul acordat și îndrumarea științifică la elaborarea materialelor nanostructurate care au stat la baza elaborării fluidelor inteligente, cât și domnilor prof. dr. fiz. Ioan Bica de la Universitatea de Vest Timișoara, prof. dr. ing. Ladislau Vekas de la Universitatea „Politehnica” din Timișoara și dr. ing. Ion Morjan director științific la INFLPR București pentru sprijinul logistic și îndrumarea științifică la elaborarea fluidelor nanostructurate utilizate ca elemente active de sesizare, respectiv domnului prof. dr. ing. Ion Șerban, prorector al Universității „Politehnica” din Timișoara pentru sprijinul și sfaturile de mare valoare științifică acordat la crearea senzorilor nanostructurați.

În final mulțumiri deosebite se cuvin fratelui meu conf. dr. ing. Danuț Savu care pe parcursul cercetărilor documentare și experimentale a fost un punct de referință important despre cum trebuie realizată o cercetare cu înaltă ținută științifică.

Teza de doctorat o dedic tatălui meu Vasile Savu care toată viața a dorit ca cei doi copii ai săi sa exceleze în ceea ce și-au propus să realizeze.

Timișoara, octombrie 2008

Sorin Vasile Savu

Tatălui meu.

Savu, Sorin Vasile

Senzori nanostructurați pentru sistemele de sudare hibride laser-arc

Teze de doctorat ale UPT, Seria 8, Nr. 11, Editura Politehnica, 2008, 248 pagini, 39 figuri, 27 tabele.

ISSN: 1842-8967

ISBN: 978-973-625-752-0

Cuvinte cheie:

sudare hibridă laser-arc, senzori, materiale nanostructurate

Rezumat,

Teza de doctorat și propune să rezolve o problemă de importanță majoră în controlul proceselor industriale și anume monitorizarea sistemelor de sudare hibride laser-arc pentru automatizarea acestora în vederea creșterii eficienței economice a proceselor de sudare hibride laser-arc și a calității îmbinărilor sudate prin implementarea de sisteme senzoriale nanostructurate avansate și crearea de programe de tip expert care vor înlocui decizia factorului uman cu cea a sistemelor de calcul.

Teza are un pronunțat caracter interdisciplinar prin acumularea cunoștințelor în domeniul sistemelor de sudare hibride laser-arc, a senzorilor nanostructurați și a nanosenzorilor, respectiv în studiul materialelor avansate nanostructurate utilizabile ca elemente active de sesizare care pot fi implementate cu succes în sisteme de sesizare aplicabile în diverse procese industriale.

Cuprins

Cap. 1	Introducere	11
Cap. 2	Senzori pentru sistemele de sudare	18
2.1	Generalități	18
2.2	Mărimi de sesizat în sistemele de sudare	19
2.2.1	Sudarea prin topire.....	19
2.2.2.	Sudarea prin presiune	20
2.3	Nanosenzori și senzori nanostructurați	22
2.3.1	Senzori de focalizare a spotului laser	23
2.3.2	Senzori de deformații	24
2.3.3	Senzori de câmp magnetic	25
	2.3.3.1 Magnetometrul	27
	2.3.3.2 Gradiometrul	28
2.3.4	Senzor de discontinuități în material	28
2.3.5	Senzor de radiație infraroșu și ultrasonică	29
2.3.6	Senzori de gaze	29
2.3.7	Senzori de temperatură	30
2.3.8	Senzori de presiune	31
2.3.9	Senzori de apreciere distanță	32
2.3.10	Senzori de debit	32
2.3.11	Senzori de vibrații	33
2.3.12	Senzori de înclinație cu lichide magnetice	34
2.4	Materiale nanostructurate pentru senzori.....	35
2.5	Evidențierea potențialului de sesizare al fluidelor nanostructurate inteligente cu comportare magnetica	36
	2.5.1 Comportarea fluidului în prezența câmpurilor magnetice	36
	2.5.2 Reacții provocate de structura metalică fluidă magnetizabilă	38
Cap. 3	Sudarea hibridă laser-arc	40
3.1	Generalități.....	40
3.2	Elemente de fizica procesului hibrid de sudare laser-arc ...	42
3.2.1	Caracteristicile fizice ale sudării hibride laser-WIG	44
	3.2.1.1 Influența condițiilor și a paramtrilor de sudare asupra pătrunderii	45
	3.2.1.1.1 Influența vitezei de sudare asupra pătrunderii în material	45
	3.2.1.1.2 Influența poziționării relative a celor două capete de sudare componente ale sistemului hibrid asupra pătrunderii în materialul de bază	46
	3.2.1.1.3 Influența procedului de	49

		sudare hibrid laser-arc asupra consumurilor energetice	
	3.2.1.1.4	Parametrii de proces care exercita influențe determinate asupra pătrunderii în material	50
3.2.1.2		Influența condițiilor de operare și a parametrilor de sudare asupra stabilității procesului de sudare hibrida laser-WIG.....	52
	3.2.1.2.1	Influența fasciculului laser la sudare cu un curent de valori mici	52
	3.2.1.2.2	Influența fasciculului laser la sudare în câmp magnetic asimetric	53
	3.2.1.2.3	Influența fasciculului laser la sudare în câmp magnetic asimetric	54
3.2.2		Fizica sudării hibride laser-MIG/MAG	54
	3.2.2.1	Influența condițiilor și a parametrilor de sudare asupra pătrunderii în material ..	55
	3.2.2.1.1	Influența vitezei de sudare asupra pătrunderii în material	55
	3.2.2.1.2	Influența poziției capului de sudare MIG/MAG față de fasciculul laser asupra pătrunderii în material	56
	3.2.2.1.3	Influența procedurii conducător al procesului hibrid de sudare asupra pătrunderii în materialul de bază	56
	3.2.2.2	Influența condițiilor și a parametrilor de sudare asupra geometriei și calității sudurilor	57
	3.2.2.2.1	Influența procedurii conducător asupra geometriei sudării	57
	3.2.2.2.2	Influența puterii asupra fasciculului laser asupra geometriei sudării	58
	3.2.2.3	Caracteristicile mecanice ale îmbinărilor sudate	59
	3.2.2.4	Influența parametrilor de sudare asupra stabilității procesului de sudare hibridă laser-MIG/MAG	60
	3.2.2.4.1	Influența puterii laserului asupra scurtcircuitelor	60

	3.2.2.4.2	Influența puterii laserului asupra stabilității petei catodice	61
	3.2.2.4.3	Influența radiației laserului asupra reducerii tensiunii din arc	62
3.3		Stabilirea parametrilor pentru a caror monitorizare se vor elabora senzorii nanostructurați	63
Cap. 4		Nano si microfluide inteligente pentru senzori	66
4.1		Structura si proprietățile fluidelor inteligente cu comportare magnetică	66
	4.1.1	Structura fluidelor inteligente cu comportare magnetică	66
	4.1.1.1	Stabilizarea particulelor magnetice	68
	4.1.1.2	Interacțiunea electrostatică	69
	4.1.1.3	Interacțiunea sterică	69
	4.1.1.4	Interacțiunea Van der Waals	69
	4.1.1.5	Interacțiunea magnetică	69
	4.1.1.6	Sedimentarea gravitațională	69
	4.1.1.7	Sedimentarea magnetică.....	70
	4.1.2	Particule magnetizabile din structura fluidelor inteligente cu comportare magnetică și influența lor asupra proprietăților acestora	71
	4.1.2.1	Nanocompozitele pe bază de Fe_2O_3	72
	4.1.2.2	Nanoparticulele de ferita de bariu de tip W ($BaFe_{19}O_{27}$)	73
	4.1.3	Matricea fluidă.....	75
	4.1.4	Proprietățile fluidelor inteligente cu comportare magnetică.....	75
	4.1.4.1	Densitatea fluidelor inteligente cu comportare magnetică.....	75
	4.1.4.2	Proprietățile magnetice ale fluidelor inteligente cu comportare magnetică ...	76
	4.1.4.2.1	Proprietăți magnetice statice	76
	4.1.4.2.2	Dependența proprietăților magnetice de temperatură	77
	4.1.4.2.3	Cinematica magnetizării ...	77
	4.1.4.3	Proprietăți electrice ale fluidelor inteligente cu comportare magnetică ...	77
	4.1.5	Termocondutibilitatea lichidelor magnetice	78
	4.1.6	Căldura specifică a lichidelor magnetice	78
	4.1.7	Vâscozitatea lichidelor magnetice	79
4.2		Procese de elaborare a nano-și micropulberilor pentru nano si microfluide inteligente	79
	4.2.1	Elaborarea și caracterizarea nano-și micropulberilor prin piroliză laser	80
	4.2.1.1	Elaborarea și caracterizarea nano-și micropulberilor prin piroliză laser	82
	4.2.1.2	Caracterizarea nanopulberilor	86

	elaborate prin piroliza laser	
	4.2.1.2.1 Spectroscopia RAMAN	86
	4.2.1.2.2 Spectroscopia IR	88
	4.2.1.2.3 Caracterizare prin microscopie TEM	89
	4.2.1.2.4 Caracterizare prin difracție electronică SAED	90
	4.2.1.2.5 Caracterizare HRTEM	91
	4.2.1.2.6 Sinteza și caracterizarea de nanopulberi pe bază de fier prin difracție de raze X, XRD	91
4.2.2	Elaborarea și caracterizarea nano-și micropulerilor prin pulverizare în jet de plasmă ...	94
	4.2.2.1 Modelarea matematică a câmpului de viteză și de temperaturi în jetul plasmei de argon	94
	4.2.2.2 Modelarea matematică a fenomenului de pulverizare a metalului solid	103
	4.2.2.3 Modelarea matematica a procesului de generare de nano-și microparticule sferice	106
	4.2.2.4 Experimentări de elaborare de nano-și microparticule de fier in jet de plasmă .	111
	4.2.2.5 Elaborarea de nano-si microparticule prin pulverizare în jet de plasmă	113
	4.2.2.6 Caracterizarea nanopulberilor elaborate prin pulverizare în jet de plasmă.....	117
4.2.3	Elaborarea nano-și micropulberilor prin măcinare în mori planetare cu bile	120
	4.2.3.1 Nanopulberi magnetice pe bază de ferită de Ba tip W	120
	4.2.3.2 Elaborarea nano-si micropulberilor prin măcinare.....	120
	4.2.3.3 Caracterizarea nanopulberilor elaborate prin măcinare	121
	4.2.3.3.1 Caracterizarea morfologică a nanopulberilor.....	121
	a. Caracterizarea morfologică a nanopulbeilor obținute prin măcinare uscată	122
	b. Caracterizarea morfologică a nanopulberilor obținută prin măcinare umedă	125
	c. Caracterizarea morfologică a pulberilor rezultate la măcinarea pulberilor cu lichid aditiv ...	128

	4.2.3.3.2	Studii asupra cristalinității pulberilor macinate.	133
	4.2.3.3.3	Caracteristicile magnetice ale nanopulberilor macinate	138
4.3		Elaborarea de fluide inteligente cu comportare magnetică utilizând nanopulberi obținute	140
4.4		Caracterizarea din punct de vedere magnetic a fluidelor inteligente elaborate	141
4.5		Alegerea fluidului inteligent pentru confeționarea senzorilor nanostructurați	145
Cap. 5		Elaborarea de senzori nanostructurați pentru monitorizarea marimilor cu influență pregnantă în cadrul sistemelor hibride de sudare.....	146
5.1		Senzor nanostructurat pentru monitorizarea unghiului dintre capul de sudare cu fascicul laser și cel de sudare cu arc electric	146
5.1.1		Soluții constructive pentru senzorul nanostructurat de monitorizare a unghiului β	148
	5.1.1.1	Senzorul nanostructurat cu mecanism pistol-cilindru	148
	5.1.1.2	Senzorul nanostructurat gravitațional ..	150
	5.1.1.3	Senzorul nanostructurat cu suport magnetic	151
5.1.2		Alegerea senzorului nanostructurat pentru monitorizarea unghiului β	152
5.1.3		Modelarea și simularea comportării lichidului magnetic în interiorul torului	152
5.1.4		Realizarea senzorului gravitațional pentru monitorizarea unghiului β	167
5.1.5		Integrarea senzorului gravitațional în pistolul pentru sudare WIG	168
5.1.6		Achiziția și interpretarea semnalului celor doi senzori nanostructurați de tip inclinometru	171
5.2		Senzor nanostructurat pentru determinarea unghiului de înclinare a capului de sudare cu laser	174
	5.2.1	Principiul constructiv-funcțional al senzorului	174
	5.2.2	Realizarea senzorului pentru monitorizarea unghiului γ de înclinare a capului de sudare cu fascicul laser	175
	5.2.3	Achiziția, prelucrarea și interpretarea semnalului oferit de bobine	176
5.3		Senzor nanostructurat cu impulsuri temporale pentru determinarea vitezei de deplasare a tractorului de sudare	177
	5.3.1	Principiul constructiv-funcțional al senzorului.....	177
	5.3.2	Realizarea senzorului cu impulsuri temporale pentru determinarea vitezei de sudare	180

5.3.3	Achiziția și interpretarea semnalului senzorului cu impulsuri temporale pentru determinarea vitezei de sudare	181
5.4	Senzor nanostructurat de vibrații pentru sesizarea stării de deplasare a tractorului de sudare	182
5.4.1	Principiul constructiv-funcțional al senzorului de vibrații	182
5.4.2	Modelarea și simularea comportării senzorului de vibrații în condiții definite specifice exploatarei	184
5.4.3	Realizarea senzorului de vibrații	190
5.4.4	Achiziția și interpretarea semnalului senzorului pentru vibrații	191
Cap. 6	Concluzii	192
6.1	Cercetarea documentară	192
6.2	Dezvoltări teoretice	193
6.3	Cercetarea experimentală	195
Cap.7	Contribuții proprii.....	200
Bibliografie	205	
Anexe	213	
Anexa 1	Nano-și microbulberi de fier	213
Anexa 2	Analiza Röntger a particulelor elaborate în jet de plasmă,cu colectare fără controlarea mediului	218
Anexa 3	Curbele de magnetizare a pulberilor elaborate în jet de plasmă	219
Anexa 4	Comportarea lichidului magnetic LM-SF32, LM-PP2, LM-9 ca miez magnetic într-o bobină	220
Anexa 5	Analiza comparativă a influenței fluidelor inteligente magnetice LM-SF32, LM-PP2 și LM9 asupra inductanței bobinei	229
Anexa 6	Aplicație informatică în Visual Basic 5.0 pentru interpretarea semnalului electric furnizat de senzorul de viteză	232
Anexa 7	Aplicație informatică în LabView 8.5 pentru interpretarea semnalului electric furnizat de senzorul de înclinație	238
Anexa 8	Notații specifice în text	241

1. Introducere

Sistemele de sudare complexe, cum este sudare hibridă laser-arc, sau simple necesită monitorizarea parametrilor de sudare și a elementelor de siguranță și protecție pentru buna funcționare a acestora și capacitatea de automatizare care derivă din principiul de sesizare. Cercetarea științifică în domeniul dezvoltării proceselor și sistemelor de sudare este direcționată către trei componente principale:

- Eficientizarea din punct de vedere economic prin creșterea indicatorilor de productivitate; această direcție de cercetare se bazează, de obicei, pe trei măsuri de natură tehnologică:
 - modernizarea proceselor și a sistemelor de sudare utilizate în prezent;
 - dezvoltarea de noi procedee de sudare, de noi variante ale procedeelor de sudare existente, precum și a noi tipuri de materiale de adaos, în vederea creșterii vitezei de sudare și a ratei de depunere;
 - mecanizarea, automatizarea și robotizarea sistemelor de sudare prin implementarea unor noi sisteme senzoriale și interfațarea acestora cu sisteme de calcul de proces avansate;
- Reducerea volumului și a numărului de imperfecțiuni ale materialului sudurii;
- Introducerea programelor de tip expert care să înlocuiască factorul uman decizional în gestionarea proceselor și a sistemelor de sudare.

Direcție principală așa cum reiese și din enumerarea anterioară, automatizarea proceselor de sudare, este bazată pe dezvoltarea unor sisteme specifice de sesizare care să ofere informații de tip intrare componentelor hardware de comandă și execuție, în vederea obținerii unui control strict și eficient al procesului. Calitatea și sensibilitatea sistemelor senzoriale au un impact major asupra procesului de sudare și a calității sudurilor.

Modalitatea prin care se realizează fenomenul de sesizare este strict legată de câteva condiții care trebuiesc îndeplinite și care sunt tratate individual pentru fiecare dintre aplicațiile posibile. Astfel, un element important în realizarea sesizării este reprezentat de elementul sesizor și implicit de tehnologia cu care a fost creat acesta. Un alt element care concură în procesul de sesizare este dat de condițiile în care va funcționa elementul sesizor și care va determina introducerea de erori în funcționare dacă acesta nu este adaptat condițiilor de lucru. Aceste două aspecte relevă unicitatea senzorului ca element funcțional într-un ansamblu. Cele două condiții sunt conexe datorită faptului că pentru a putea construi senzorul este necesar a se cunoaște pe lângă elementele de sesizat și condițiile de exploatare ulterioară a senzorului. Aceste condiții determină, în cele mai multe dintre cazuri, proiectarea soluției constructiv-funcționale, tehnologia de fabricație și caracteristicile materialelor implicate în realizarea senzorului.

Tehnologiile actuale pun din în ce mai mult accentul pe cunoștințele și experiențele acumulate în domeniul nanotehnologiilor, dat fiind faptul că dezvoltarea

acestui domeniu va determina atât optimizări de natură tehnologică, cât și eficiență economică. Caracteristica principală a nanotehnologiilor este existența unei diferențe sensibile între modul de comportare a elementelor tratate la nivel nano, comparativ cu modul de comportare a acestora la nivel macro. Analiza acestei diferențe, pentru diverse tipuri de elemente materiale, a condus în timp la conferirea de noi funcțiuni materialelor clasice sau avansate, prin introducerea de modificări la nivel nanometric. Astfel, a devenit posibilă dezvoltarea de noi materiale cu funcțiuni de sesizare, utilizabile în confecționarea de micro- și macrosenzori destinații sesizării unor mărimi fizice. O astfel de aplicare a materialelor modificate structural la nivel nanometric, materiale numite generic materiale nanostructurate, a condus la introducerea unor avantaje sensibile în elaborarea și exploatarea senzorilor (care au primit, la rândul lor, titulatura generică de senzori nanostructurați):

- timp de reacție sensibil redus comparativ cu senzorii clasici;
- precizie mult mai bună datorită proprietăților modificate la nivel nanometric;
- costuri de fabricație reduse;
- fenomene de sesizare caracterizate prin simplitate principială.

Toate aceste caracteristici nu conduc decât la o singură concluzie și anume aceea că studiul domeniului nano trebuie să reprezinte o prioritate absolută a fiecărei strategii de dezvoltare națională. De altfel cercetarea europeană este îndreptată cu precădere către domenii avansate cum ar fi cel al nanoștiințelor și nanotehnologiilor, domeniu prioritar în programele de finanțare a cercetării-dezvoltării-inovării europene.

Tema de cercetare abordată în cadrul prezentei lucrări vizează dezvoltarea unor senzori nanostructurați destinați monitorizării și/sau funcționării în regim automat a sistemelor de sudare hibridă laser-arc. Aceștia vor sesiza mărimi determinante pentru procesul de sudare hibridă, utilizând funcțiuni noi introduse de modificarea la nivel nanometric a structurii unor materiale clasice. Dedicarea către sistemele de sudare hibridă a avut la bază orientarea predilectă a cercetării internaționale către aceste sisteme de sudare, caracterizate prin productivitate ridicată și calitate superioară a îmbinărilor sudate, comparativ cu procesele clasice de sudare care au stat la baza dezvoltării și compun sistemelor hibride.

Necesitatea monitorizării și a automatizării proceselor de sudare nu mai este supusă îndoielii, ea devenind o certitudine la finele secolului al XX-lea, o dată cu inițierea proceselor de introducere a sistemelor de calitate la nivelul producătorilor de structuri sudate. Pornind de la acest considerent, în ultimii 20 de ani, cercetarea domeniului sudării a avut între prioritățile sale și aceste aspecte ale dezvoltării sistemelor de sudare.

Prin automatizarea unui sistem științele fizico-chimico-tehnice, sub formă individuală sau multidisciplinară, sub formă fenomenologică sau tehnologică, sunt implementate într-un dispozitiv care va urmări un anumit proces și va fi capabil să ia decizii, înlocuind factorul uman implicat. Automatizarea sistemelor de producție în general și a sistemelor de sudare în particular este condiționată de o monitorizare foarte strictă a procesului care, coroborată cu o cunoaștere foarte bună a fenomenului din proces, poate conduce la eficientizarea întregului ansamblu al procesului.

Alegerea acestei teme de cercetare a pornit de la tendințele actuale ale sistemelor de sudare. În cursul ultimului deceniu cercetarea în domeniul sistemelor de sudare și-a mutat centrul de greutate dinspre sistemele clasice de sudare cu arc electric sau prin rezistență de contact către sistemele avansate de îmbinare hibridă,

sistemele de sudo-brazare și sistemele de microîmbinare. Sistemele de îmbinare hibridă își propun să înlocuiască sistemele clasice de mare productivitate, cum ar fi sudarea sub strat de flux, prin introducerea unor viteze de sudare superioare, comparative cu vitezele de sudare utilizate în sistemele cu electrozi multipli. Sistemele de sudo-brazare își propun adaptarea sistemelor clasice de îmbinare, cum ar fi sudarea MIG sau sudarea WIG, în procesele de îmbinare a materialelor speciale de tipul materialelor acoperite prin galvanizare sau în procesele de îmbinare a materialelor disimulare. Aplicarea sistemelor de sudare clasice în aceste situații este nu numai dificilă, ci și costisitoare. Sistemele destinate realizării de microîmbinări sunt orientate către domeniile electrice și electronice unde dimensiunile specifice ale unor îmbinări dedicate pornesc de la ordinul milimetrilor și coboară la valori mai mici decât un milimetru.

În ceea ce privește procesele de sudare hibridă acestea au cunoscut o dezvoltare accelerată în ultimii ani datorită efectului sinergic prin care sunt caracterizate. Acesta constă în faptul că rezultatele obținute din punct de vedere al calității îmbinărilor sudate, a consumurilor energetice în timpul proceselor de sudare, a stabilității procesului sunt superioare celor realizate prin suma efectelor celor două procese considerate independent. Practic, la sudarea hibridă laser-arc se poate sintetiza relația:

$$R_{(P,CE,CIS,SP)_{sudare_hibrida_laser-arc}} > R_{(P,CE,CIS,SP)_{sudare_laser}} + R_{(P,CE,CIS,SP)_{sudare_arc_electric}} \quad (1.1)$$

unde:

- $R_{(P,CE,CIS,SP)_{sudare_hibrida_laser-arc}}$ - rezultatele obținute la sudarea hibridă laser-arc

din punct de vedere al:

- P – adâncimea de pătrundere în material;
- CE – consumul energetic realizat;
- CIS – calitatea îmbinării sudate;
- SP – stabilitatea procesului;

- $R_{(P,CE,CIS,SP)_{sudare_laser}}$ - rezultatele obținute la sudarea laser;

- $R_{(P,CE,CIS,SP)_{sudare_arc_electric}}$ - rezultatele obținute la sudarea cu arc electric.

Sudarea hibridă ocupă în acest moment un loc important în cadrul proceselor de îmbinare existente în industrie, acest fapt fiind dovedit prin numărul relativ mare de documente ale Institutului Internațional de Sudură în cadrul întrunirilor anuale și conferințelor internaționale de la Praga (Cehia) – 2005, Quebec (Canada) – 2006, Dubrovnik (Croatia) – 2007 și Graz (Austria) – 2008. O analiză a stării actuale de fapt privind implementarea în sistemele de producție a proceselor de sudare hibridă laser-arc, comparativ cu implementarea proceselor clasice de sudare, a evidențiat o distribuție conform celei din figura 1.1.

Se observă în figura 1.1 faptul că, deși introdus cu numai puțin timp în urmă, procedeul de sudare hibridă laser-arc atinge un volum de aplicabilitate de aproximativ 11 % din volumul total al sudării industriale, fiind imediat în urma sudării prin rezistență electrică. Dacă aceasta din urmă își găsește centrul de greutate în industria automobilelor, sudarea hibridă este cu predilecție orientată către aplicațiile cu îmbinări de lungime și grosime mare, cum ar fi construcțiile navale. Deși acesta este principalul domeniu de aplicare, sudarea hibridă se mai regăsește și în industria chimică și petrochimică la îmbinarea conductelor de diametre mari pentru transportul fluidelor sub presiune și la confecționarea

recipientelor sub presiune, în industria construcțiilor de mașini de ridicat sau utilajelor și vehiculelor industriale, precum și în alte domenii în care aplicarea unui proces de sudare este mai eficientă în formă mecanizată sau automatizată.

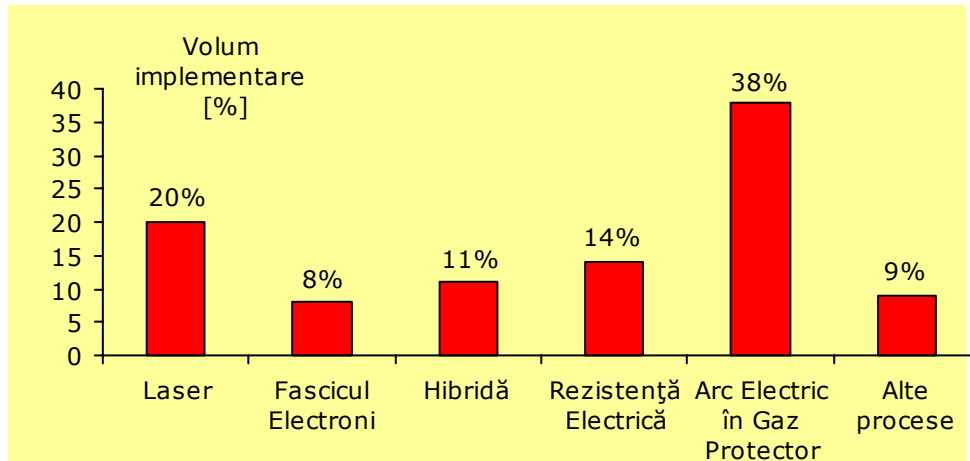


Fig. 1.1 Volumul de implementare a procedurilor de sudare [35]

Datorită complexității, dimensiunilor și masei capului hibrid de sudare, procesul se poate aplica numai în varietăți mecanizată, automatizată sau robotizată. Această stare de fapt impune introducerea în cadrul sistemelor hibride a unor subsisteme de monitorizare și control al procesului. Dacă pentru elementele componente ale sistemului hibrid, în speță componenta laser și componenta arc electric, există dezvoltate astfel de sisteme auxiliare, pentru sistemele hibride literatura de specialitate nu amintește dezvoltări notabile, deși necesitatea se acutizează cu fiecare încercare de implementare a noului procedeu. Acesta este motivul principal al alegerii prezentei teme de cercetare.

Apelarea la senzori nanostructurați a rezultat în urma derulării unei analize a sectorului sistemelor senzoriale pentru instalațiile și echipamentele de sudare. În prezent, pentru sudarea cu arc electric, cele mai uzuale sisteme senzoriale sunt sistemele sensor-arc, sistemele video și sistemele laser pentru urmărirea rostului de sudare, sistemele de sesizare a proximității pentru oprirea procesului, sistemele Hall pentru determinarea vitezei de sudare și clasicii senzori magnetici pentru determinarea valorilor curente ale intensității curentului electric și a distanței dintre capul de sudare și piesa de sudat. Fiecare dintre aceste sisteme prezintă avantaje și dezavantaje în funcție de situația dată în care sunt aplicate. Cu aceste sisteme auxiliare procesele de sudare se derulează cu o eficiență aprioric impusă de utilizator. La fel este și în cazul sistemelor de sudare cu fascicul laser, unde, ca și în cazul sudării cu arc electric, există dezvoltate sisteme auxiliare de sesizare în vederea monitorizării diversilor parametri de proces. Introducerea sudării hibride impune însă dezvoltarea unei noi generații de senzori, caracterizați prin precizii și viteze de reacție crescute. O astfel de clasă de senzori este clasa nanosenzorilor, clasă aflată în plin proces de cercetare și dezvoltare, destinațiile principale ale acestora fiind domeniile militare și medicinei. Ea este compusă din două tipuri de senzori și anume:

- nanosenzori - senzori de dimensiuni nanometrice care sunt mai puțin dezvoltăți datorită tehnologiilor extrem de complicate de realizare având în vedere dimensiunile aprioric impuse de condițiile de utilizare;
- senzori cu elemente nanostructurate - senzori cu dimensiuni la nivel micrometric sau macrometric care au în componență elemente având dimensiuni din domeniul nanometric.

Tendențele cercetărilor actuale sunt îndreptate spre ambele tipuri de nanosenzori din motive foarte bine întemeiate: dacă în domeniul nanosenzorilor cu elemente nanostructurate cercetarea este constantă și are un parcurs bine conturat, domeniul nanosenzorilor cu dimensiuni nanometrice este puternic impulsat de necesitățile medicale ale acestui mileniu. Necesitatea tratamentului anumitor maladii care nu au avut succes prin metode clasice a impulsat comunitatea științifică în dorința de a găsi soluții de rezolvare acestor probleme. Aici domeniul este extraordinar de larg, fără limite mai corect spus, iar știința este împinsă la limita înțelegerii umane având în vedere importanța umanitară a acestui domeniu.

În figura 1.2 este prezentată evoluția pieței nanosenzorilor în SUA.

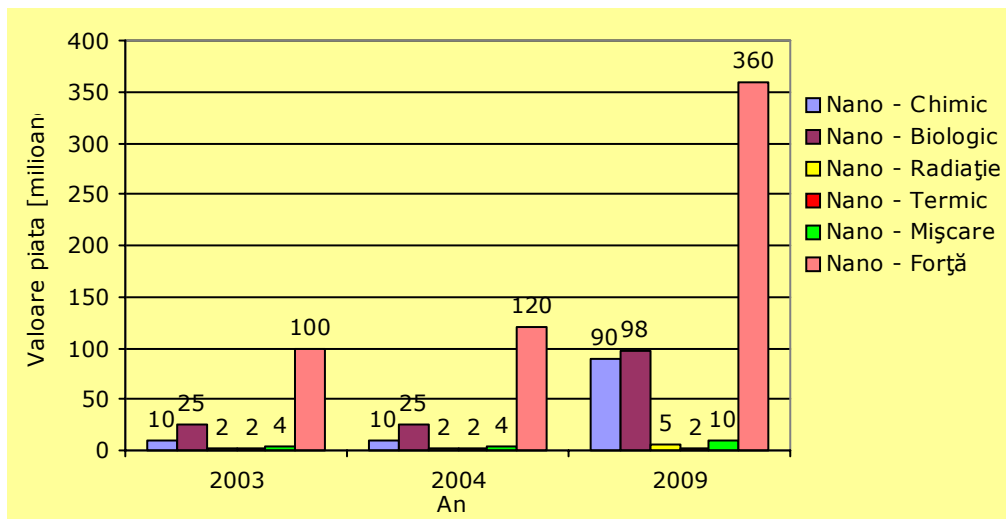


Fig. 1.2 Evoluția pieței nanosenzorilor în SUA [45]

Atingerea scopului propus de către tema de cercetare presupune îndeplinirea unui set de obiective:

- evidențierea principalelor mărimi parametrizate care influențează sensibil procesul de sudare hibridă laser-arc;
- stabilirea mărimilor care vor fi sesizate cu ajutorul senzorilor nanostructurați care vor fi concepuți și realizați;
- studierea proprietăților, a caracteristicilor și a influențelor diverselor mărimi asupra proprietăților și caracteristicilor materialelor nanostructurate utilizabile în sesizare;
- stabilirea materialelor nanostructurate care vor fi utilizate la confecționarea senzorilor nanostructurați;
- conceperea, realizarea, verificarea și optimizarea senzorilor nanostructurați.

Pentru evidențierea principalilor parametri care influențează procesul de sudare hibridă laser-arc, vor fi derulate cercetări teoretice și experimentale asupra acestui tip de proces de sudare. Vor fi evidențiate principalele sale caracteristici, precum și caracteristicile care determină calitatea îmbinărilor sudate. Se vor determina elementele de sistem sau de proces care influențează atât stabilitatea și eficiența procesului de sudare, cât și calitatea îmbinărilor sudate. Dintre acestea se vor alege, pornindu-se de la principiul legii 80/20 a economistului italian Vilfredo Pareto, mărimile cărora li se vor adresa senzorii nanostructurați care vor fi proiectați și realizați.

Cunoscându-se mărimile de importanță majoră în funcționarea stabilă, eficientă și calitativă a sistemelor de sudare hibridă, se va proceda la studierea principalelor tipuri de materiale nanostructurate utilizabile în procese de sesizare. Dintre acestea se vor alege cele mai eficiente din punct de vedere tehnic și economic și se va derula un subprogram de cercetare teoretică și experimentală în sensul proiectării și elaborării unor materiale nanostructurate optime pentru funcția de sesizare a mărimilor stabilite anterior.

Pornind de la caracteristicile funcționale ale materialelor nanostructurate pentru sesizare se va elabora principiile de funcționare a senzorilor, se vor proiecta elementele hardware și software menite punerii în operă a principiilor respective, rezultând astfel senzorii nanostructurați care fac obiectul scopului temei de cercetare. După elaborare senzorii vor fi verificați din punct de vedere funcțional, acestei etape urmându-i optimizare constructiv-funcțională a diverselor elemente, fie ele hardware sau software.

Cercetările sunt complexe și presupun atât dezvoltări teoretice ale unor fenomene fizice care trebuiesc modelate matematic pentru o mai bună înțelegere a influențelor care se manifestă în procesele de sudare hibridă sau de sesizare, cât și confirmări experimentale ale acestora. Astfel, se au în vedere modelări matematice ale influențelor unor parametri de sistem asupra elementelor care determină stabilitatea procesului de sudare și asupra caracteristicilor geometrico-dimensionale și de calitate ale îmbinărilor sudate. În plus, se vor elabora modele matematice ale comportării materialelor nanostructurate utilizate în condiții specifice, precum și modele matematice ale comportării în exploatare a senzorilor nanostructurați proiectați și realizați practic.

Programul experimental, acoperind o plajă largă de domenii (cercetarea sudării hibride, cercetarea materialelor nanostructurate, cercetarea microdispozitivelor electromecanice) s-a derulat în laboratoarele unor centre de cercetare specializate în aceste domenii:

- INCD în Sudură și Încercări de Materiale (ISIM) Timișoara – unde, pe echipamente și sisteme de sudare și de examinare de ultimă generație, autorul a derulat majoritatea experimentărilor de sudare cu laser, WIG și hibridă laser WIG / WIG-laser;
- Universitatea din Craiova – unde autorul a elaborat prin măcinare în mori planetare cu bile și caracterizat morfologic și dimensional nanoparticule magnetizabile utilizate ulterior la elaborarea de lichide inteligente nanostructurate cu comportare magnetică; tot aici autorul a conceput, realizat și optimizat senzorii nanostructurați care constituie tema de cercetare;
- Universitatea de Vest din Timișoara – unde, pe lângă elaborarea în jet de plasmă și caracterizarea de nano- și microparticule, autorul a conceput, realizat, caracterizat și optimizat lichide inteligente nanostructurate cu comportare magnetică;

- INCD pentru Fizica Laserilor, Plasmei și Radiației (INFLPR) București – unde autorul a elaborat prin piroliză laser și caracterizat morfologic și dimensional nanoparticule magnetizabile utilizate ulterior la elaborarea de lichide inteligente nanostructurate cu comportare magnetică;
- INCD pentru Inginerie Electrică (ICPE-CA) București – unde autorul a caracterizat morfologic și magnetic nanopulberile și lichidele inteligente cu comportare magnetică elaborate;

Autorul dorește să mulțumească pe această cale colegilor de la aceste instituții cu renume în cercetarea națională și internațională, în speță Domnului Profesor Doctor Inginer Dorin DEHELEAN (ISIM Timișoara), Domnului Profesor Doctor Inginer Mihail MANGRA (Universitatea din Craiova), Domnului Profesor Doctor Ioan BICA (Universitatea de Vest), Domnului Doctor Inginer Ion MORJAN (INFLPR București), Domnului Profesor Doctor Inginer Wilhelm KAPPEL (ICPE-CA București), precum și Domnului Profesor Doctor Inginer Ladislau VEKAS (Universitatea Politehnica din Timisoara) pentru suportul științific și logistic oferit autorului în munca de cercetare depusă în vederea atingerii țelului propus.

De asemenea, implicarea activă a autorului în colectivele de cercetare a trei proiecte CEEEX, precum și în cadrul unui proiect PNCDI, de tip TD, în care autorul a fost Director de Proiect, s-a constituit într-o unealtă care a contribuit la accelerarea derulării activităților necesare finalizării cercetării propuse.

Unele rezultate obținute în cadrul cercetărilor s-au constituit în subiecte ale unor lucrări științifice făcute publice sau în teme care au făcut obiectul unor cereri de brevetare.

2. Senzori pentru sistemele de sudare

2.1 Generalități

Procesele de sudare sunt procese de fabricație speciale. Această afirmație aparține standardelor SR EN ISO 3834-1 "Condiții de calitate pentru sudare. Sudarea prin topire a materialelor metalice. Partea I: Ghid pentru selecție și utilizare." și SR EN ISO 14731 "Coordonarea sudării. Sarcini și responsabilități" și ea are la bază imposibilitatea, unanim recunoscută, de a se verifica integral rezultatele acestor procese. Din acest motiv, asigurarea calității proceselor de sudare, ca țintă a managementului unui sistem de sudare, presupune, pe lângă o strictă verificare a rezultatului și o urmărire a identității dintre modul real de derulare a procesului și prescripțiile specificației procedurii de sudare, WPS. Dacă pentru un sistem clasic de sudare (sudare cu arc electric cu electrozi înveliți, sudare cu arc electric în mediu de gaze protectoare cu electrod fuzibil, etc.) această urmărire a derulării procesului se rezumă la monitorizarea a 4-5 parametri de proces (de exemplu: curent de sudare, tensiunea arcului, viteza de sudare și înclinarea electrodului, pentru sudarea cu arc electric cu electrozi înveliți), pentru procedeele de sudare noi, având sisteme complexe compuse din mai multe echipamente de sudare și auxiliare, procesul de monitorizare este sensibil mai dificil de organizat și controlat datorită numărului mare de parametri implicați.

În această situație se găsește și sudarea hibridă laser-arc. Sistemul hibrid, compus din două tipuri de echipamente sensibil diferite, operând cu seturi de parametri de proces sensibil diferiți, trebuie monitorizate nu numai simultan, dar și în interdependențe stricte. Această stare de fapt presupune un număr relativ mare de parametri de sistem și de parametri de proces care trebuie evaluați continuu cu ajutorul unor senzori având anumite caracteristici principiale și funcționale. Procedura pare, inițial, simplă. Realitatea este însă diferită. Nu se poate iniția nici o acțiune fără stabilirea judicioasă a mărimilor care trebuie monitorizate. Acestea se aleg în funcție de influențele pe care le manifestă asupra stabilității și caracteristicilor tehnico-economice ale procesului de sudare, precum și asupra calității rezultatului sudării: îmbinarea sudată. Procedura logică este următoarea: după evidențierea experimentală a existenței anumitor influențe în cadrul sistemului de sudare, acestea sunt analizate din punct de vedere al impactului pe care îl au asupra indicatorilor menționați anterior (stabilitatea procesului de sudare, caracteristicile tehnico-economice ale procesului de sudare și calitatea rezultatului sudării). Ordonând în sens descrescător, din punct de vedere al impactului, aceste influențe, trebuie procedat la emiterea unei decizii cu privire la numărul parametrilor care trebuie monitorizați, astfel încât o bună parte dintre fenomenele care se desfășoară în cadrul procesului de sudare să poată fi integral sau măcar parțial monitorizate. Decizia se emite în baza unei alegeri proprii a tehnologului sudor sau utilizând legi concrete specifice, cum ar fi legea lui Pareto. Aceasta stipulează faptul că dacă este posibilă identificarea unui număr de n parametri care influențează un sistem și de asemenea, dacă este posibil a se aranja acești parametri în funcție de influența pe care o au asupra sistemului, atunci primii 20% dintre parametri, în ordinea influenței, intervin cu o pondere de aproximativ 80% din totalul influențelor.

Abia în acest stadiu se poate decide asupra modului de monitorizare. Sunt cunoscute mărimile care trebuie monitorizate și se pot astfel alege senzorii care pot fi utilizați. Rezultă astfel un sistem auxiliar care trebuie adăugat sistemului de sudare și anume sistemul senzorial pentru monitorizare. Acesta din urmă oferă informații curente din cadrul procesului de sudare, rezultatul fiind o simplificare a managementului proceselor de sudare datorită faptului că, prin implementarea programelor de tip expert, sistemele de calcul preiau de la factorul uman aspectul decizional astfel încât procesul de sudare să se desfășoare cât mai rapid și la nivel calitativ adecvat.

Astfel de sisteme auxiliare, sistemele senzoriale, trebuie să fie sisteme cu o înaltă clasă de precizie datorită importanței mărimilor care sunt supuse procesului de sesizare. Un factor important în precizia mijloacelor de sesizare îl constituie modalitatea de proiectare a acestora și comportamentul acestora în condițiile în care se desfășoară procesele de sudare. Domeniul nanotehnologiilor, un domeniu absolut nou în știința actuală, este remarcabil prin soluțiile pe care le oferă pentru realizarea de sisteme senzoriale eficiente. [130,59,21,72,32]

2.2 Mărimi de sesizat în sistemele de sudare

În procesele de sudare există un număr mai mare sau mai mic de parametri care trebuie monitorizați. Acești parametri se pot împărți în două clase, în funcție de proveniența lor:

- parametri de proces;
- parametri de sistem.

Parametrii de proces sunt parametri determinați strict de fenomenele care se dezvoltă în timpul procesului de sudare, pe când parametrii de sistem sunt cei care sunt determinați de natura, structura, geometria și dimensiunile sistemului hardware de sudare.

Cele două clase de parametri capătă diferite structuri în funcție de natura procesului de sudare: sudare prin topire sau sudare prin presiune.

2.2.1 Sudarea prin topire

În cazul sudării prin topire, în funcție de procedeul de sudare utilizat, există mărimi fizice și mărimi geometrice care trebuie monitorizate. Dintre mărimile fizice care influențează procesul de sudare sau care caracterizează starea acestuia, se menționează:

- temperatura:
 - temperatura arcului;
 - temperatura băii de sudare;
 - temperatura piesei de sudat;
 - temperatura diferitelor componente ale echipamentului de sudare;
- viteza:
 - viteza tractorului de sudare;
 - viteza sârmei în dispozitivul de avans sârmă;
 - viteza de pendulare a capului de sudare;
 - viteza de corectare a abaterilor;
- timpul;
- accelerația:
 - accelerația tractorului de sudare;
 - accelerația sârmei în dispozitivul de avans al sârmei;

- accelerația pendulării capului de sudare;
- radiația luminoasă:
 - stabilirea existenței arcului electric;
 - determinarea temperaturii băii de sudare;
 - determinarea nivelului de reflexie al fascicului laser;
 - determinarea nivelului de transparență a pieselor de sudat față de lungimea de undă a fascicului laser;
- intensitatea curentului electric:
 - stabilirea existenței arcului electric;
 - stabilirea puterii de topire;
 - stabilirea adâncimii de pătrundere;
- tensiunea arcului:
 - stabilirea existenței arcului electric;
 - stabilirea puterii de topire;
 - determinarea lungimii arcului;
- debitul:
 - determinarea debitului de gaz protector;
 - determinarea debitului lichidului de răcire;
 - determinarea debitului de gaz carburant și combustibil la sudarea cu flacără;
- presiunea:
 - determinarea presiunii lichidului de răcire;
 - determinarea presiunii gazului de protecție;
 - determinarea presiunilor gazelor carburante și combustibile;
- frecvența:
 - stabilirea existenței vibrațiilor;
 - amorsare înaltă frecvență;
 - determinarea frecvenței de pendulare a capului de sudare;

Dintre mărimile geometrice care manifestă influențe în cadrul procesului de sudare se menționează:

- forma:
 - forma băii de sudare;
 - forma sudurii;
 - forma rostului de sudare;

2.2.2 Sudarea prin presiune

Datorită faptului că sudarea prin presiune este un proces mai simplu comparativ cu sudarea prin topire, numărul de parametri care trebuie monitorizați este mai mic. Cei mai importanți parametri fizici sunt:

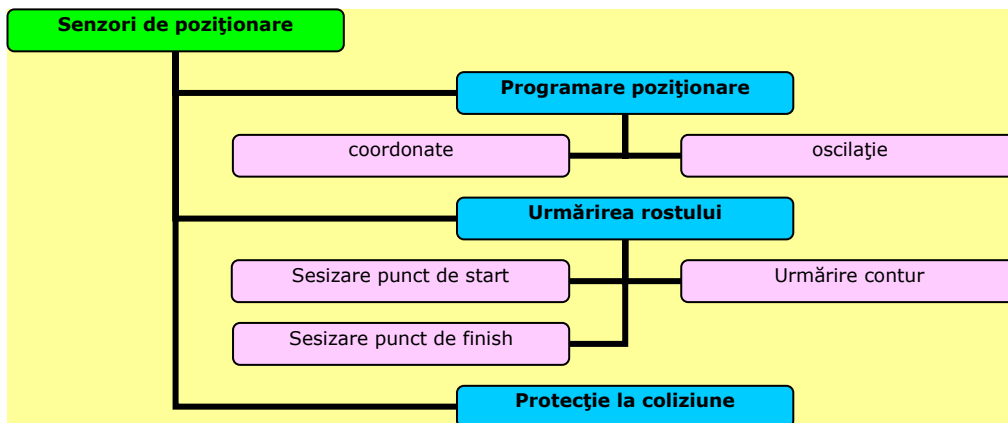
- curentul de sudare;
- tensiunea între electrozi;
- timpul de existență a curentului de sudare;
- forța de apăsare;
- frecvența curentului de sudare;
- viteza de sudare (la sudarea în linie).

Dintre mărimile geometrice ale sistemului de sudare se amintesc:

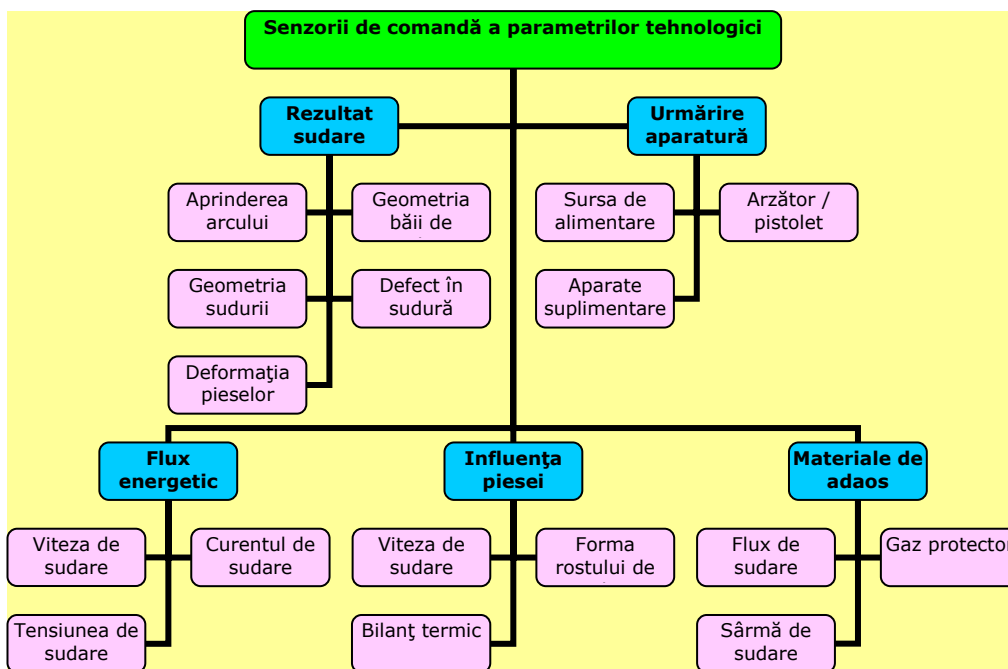
- forma și dimensiunile capetelor active ale electrozilor;
- forma îmbinării sudate (deformațiile componentelor) ;

- forma punctului de sudură;
- poziția relativă a brațelor portelectrod.

În scopul informării sistemului de comandă al echipamentelor industriale, asupra stării și modificărilor din mediul său tehnologic, sunt necesare dispozitive de captare a informațiilor și de conversie a acestora în semnale electrice. Dispozitivele de sesizare a mărimilor poartă numele de senzor, iar cele de conversie a mărimilor dintr-o natură în alta poartă numele de traductor. În figurile 2.1 a și b se prezintă grupele de senzori necesari automatizării proceselor de sudare cu arc electric.



a. Senzori de poziție



b. Senzorii de comandă a parametrilor tehnologici

Fig. 2.1 Grupele de senzori pentru monitorizarea proceselor de sudare

În ceea ce privește senzorii necesari sesizării mărimilor geometrice, după modul de percepere a informației, aceștia pot fi de două feluri:

- senzori cu sesizare prin atingere (tactili);
- senzori cu sesizare fără atingere, situație în care sesizarea se realizează: optic, acustic, inductiv, capacitiv, electromagnetic sau fluidic.

Corespunzător principiilor de sesizare utilizate, numeroase de altfel, senzorii sunt sensibil diferiți; nu se poate concepe un senzor universal, capabil să sesizeze un număr infinit de mărimi. În consecință, se alege un număr minim necesar de tipuri de senzori astfel încât problema tehnologică, rezolvabilă prin sesizare de mărimi, să poată fi soluționată. Este necesar să se dezvolte o paletă cât mai variată și mai cuprinzătoare de senzori care să fie compatibili cu sistemele de comandă numerică sau care să fie conectați direct la un calculator de proces. Deoarece caracterul de adaptabilitate permite extinderea domeniului de aplicare al sistemelor senzoriale, în prezent cercetările în domeniul senzorilor sunt deosebit de extinse.

2.3 Nanosenzori și senzori nanostructurați

În capitolul 1 s-a specificat faptul că în domeniul nanometric fenomenele se manifestă diferit comparativ cu manifestarea din domeniul micro-mili-metric [89,27,72]. Diferența se datorează faptului că proprietățile diferite, date de structura modificată la nivel nanometric, influențează sensibil comportarea generală a materialelor și implicit influențează și comportarea în procesele de sesizare. Cercetările actuale în domeniul nanoștiințelor și nanotehnologiilor au relevat faptul că elementele sesizoare nanometric sau nanostructurate au o dublă comportare în procesele de sesizare:

- își modifică caracteristicile electrice sau optice la apariția unei modificări;
- prin acțiunea lor asupra elementului de sesizat modifică parametrii electrice și magnetici ai ansamblului sesizor.

Așa cum s-a afirmat în capitolul 1, nanosenzorii sunt construiți la nivel nanometric [82,21,32] sau cu elemente nanostructurate (modificate la nivel nanometric). Nanosenzorii comerciali existenți astăzi pe piață sunt, în mare parte, proiectați astfel încât să răspundă unor domenii de larg interes din industrie:

<ul style="list-style-type: none"> ▪ Senzori chimiorezistivi; ▪ Senzori de câmp magnetic; ▪ Senzori de temperatură; ▪ Senzori de grosimi, dimensionări; ▪ Senzori pentru sisteme de devrigrare; ▪ Senzori de proporționalitate substanțe; ▪ Senzori de gaze; ▪ Senzori de unde ultrasonice și infraroșu; ▪ Senzori de defecte în materiale; 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Senzori de curent; ▪ Senzori de deformații mecanice; ▪ Senzori de particule speciale; ▪ Senzori de poziționare; ▪ Senzori de lumină; ▪ Senzori de distanță; ▪ Senzori de înclinație; ▪ Senzori de presiune și debit; ▪ Senzori de vibrații.
--	---

Dintre toate aceste clase de nanosenzori, astăzi, o importanță deosebită se acordă domeniului senzorilor sesizori de gaze, domeniu aflat în plină dezvoltare.

Această stare de fapt se datorează convergenței mai multor ramuri industriale (industria chimică, industria militară, industria medicală, etc.) și sociale spre monitorizarea gazelor. Motivele principale sunt evitarea poluării și asigurarea unor condiții minim-suficiente de securitate.

Ceilalți nanosenzori își găsesc, la rândul lor, aplicații mai mult sau mai puțin extinse la nivelul economiei sau socialului.

În ceea ce privește sistemele de sudare, la nivelul acestora, în funcție de tipul procedurii de sudare utilizat, se pot utiliza majoritatea nanosenzorilor enumerați anterior. În continuare însă, sunt prezentate principiile de funcționare, caracteristicile și aplicabilitatea în cadrul sistemelor de sudare, a nanosenzorilor cu cele mai mari volume de implementare la nivelul industriei europene.

2.3.1 Senzori de focalizare a spotului laser

În procesele de sudare cu fascicul laser, parametrii care influențează stabilitatea procesului și calitatea sudurilor sunt în număr mai mic comparativ cu situația sudării cu arc electric. Aceștia sunt legați direct de puterea fasciculului și de focalizarea lui.

Focalizarea spotului laser în poziția optimă este absolut necesară mai ales la sudarea pieselor cu o configurație aleatoare-non-planară, unde spotul laser trebuie să urmărească contururile suprafeței. Sesizarea nivelului de focalizare se face de obicei cu senzori capacitivi. Măsurarea capacității dintre capul de sudare și piesă se poate realiza atât în situația sudării pulsate cât și în situația sudării continue unde prezența noxelor conduce la incapacitatea de semnaliza, la anumiți senzori, valorile eronate datorită pierderii focalizării spotului laser [22].

Armătura condensatorului este legată la conductorul central al unui cablu coaxial în timp ce cea de a doua armătură este constituită de suprafața țintă vizată de senzor. Principiul senzorului este dat de modificarea distanței geometrice dintre armăturile condensatorului și deci variația capacității în prezența unor materiale conductoare sau dielectrice.

Formula de calcul care stă la baza funcționării senzorului este cea care definește capacitatea unui condensator:

$$C = \frac{k \cdot \epsilon_0 \cdot A}{d} \quad (2.1)$$

unde:

- C – capacitatea condensatorului;
- k – constanta de material a dielectricului din interiorul condensatorului;
- A – suprafața armăturilor;
- d – distanța dintre armături.

În figura 2.2 este prezentată schema de principiu a unui astfel de senzor, respectiv semnalul specific semnalizării defocalizării.

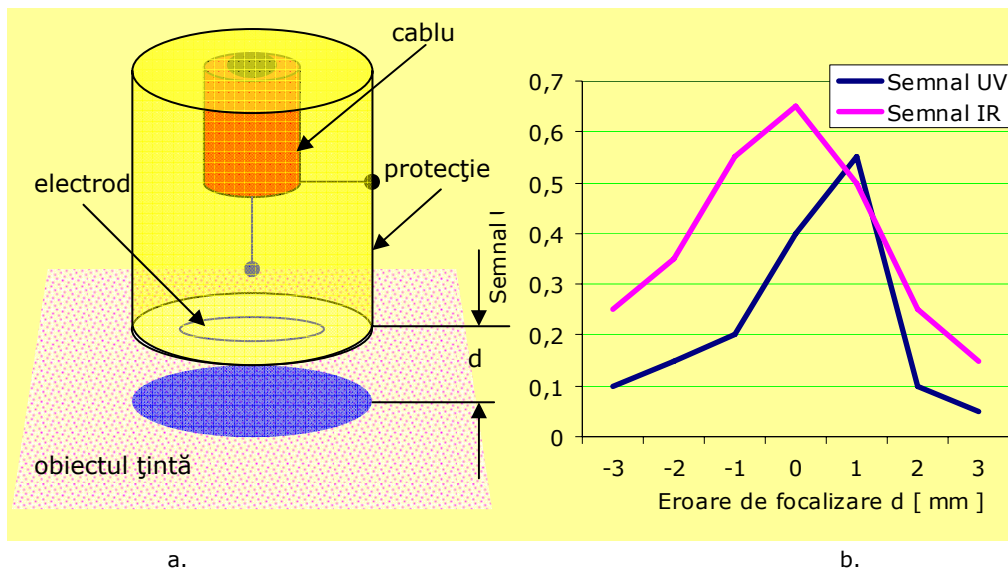


Fig. 2.2 Sensor de focalizare a spotului laser
a. principiul sensorului; b. semnalul specific la defocalizare

2.3.2 Senzor de deformații

Senzorii de deformații sunt extrem de utili în sistemele de sudare convenționale, sau neconvenționale deoarece asigură implementarea unei tehnologii de sudare corespunzătoare din punct de vedere al deformațiilor înregistrate în timpul sudării. La nivel nanometric, deformațiile mecanice pot fi sesizate cu ajutorul nanotuburilor de carbon [1,118] (figura 2.3).

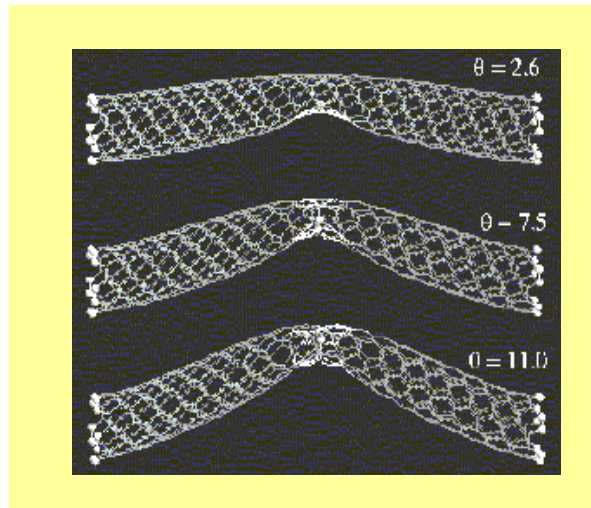


Fig. 2.3 Nanotuburi de carbon supuse la deformații mecanice

Nanotuburile de carbon au o istorie scurtă în ceea ce privește utilizarea efectivă în aplicații tehnice de tipul senzorilor pentru deformații. Pentru evidențierea

proprietăților de sesizare a deformațiilor se utilizează un nanotub de carbon suspendat având o lungime de 600 nm. Principiul sesizării se bazează pe o modificare consistentă a conductibilității electrice a nanotubului, când acesta este deformat radial cu un terminal specific microscoapelor de forță atomică., fenomenul fiind înregistrat la temperatura ambiantă a camerei. Senzorul construit cu ajutorul nanotuburilor de carbon poate fi folosit la determinarea cu precizii foarte ridicate a deformațiilor remanente la sudare.

2.3.3 Senzori de câmp magnetic

Senzorii de câmp magnetic au la bază un fenomen relativ nou cunoscut în fizică și care poartă numele de „efect GMR” (giant magneto-resistance), respectiv „efect AMR” (anisotropic magneto-resistance). Acest fenomen se manifestă printr-o variație considerabilă a rezistenței electrice a materialelor concepute din straturi fine formate din materiale feromagnetice și materiale non-magnetice, la aplicarea unui câmp magnetic. Materialele care au aceste proprietăți sunt materiale ingineresti avansate având drept bază elemente și aliaje ca nichelul, oțelul, cobaltul sau cuprul. Aceste materiale sunt niște compozite formate din mai multe straturi atomice (uzual: 5), straturi având grosimi de aproximativ 150 nm.

Principiul GMR [93] este prezentat în figura 2.4. Din figura 2.4 se remarcă faptul că în lipsa unui câmp magnetic aplicat momentele magnetice ale aliajelor sunt opuse ca sens, iar la aplicarea unui câmp magnetic extern momentele magnetice ale aliajelor se orientează după liniile de câmp magnetic aplicat materialului ingineresc, iar rezistența electrică scade dramatic cu aproximativ 10 până la 15%. Recomandarea dezvoltării senzorilor pe baza efectului GMR este indicată datorită avantajelor indicate de acesta în comparație cu alte metode cum ar fi efectul Hall sau senzor AMR magnetic.

Senzorii de câmp magnetic pot fi implementați în sistemele de sudare hibride laser arc ca și senzori de distanță pentru stabilirea cu precizie a distanței dintre fasciculul laser și capul de sudare WIG, respectiv distanța dintre capul de sudare laser și piesa de sudat.

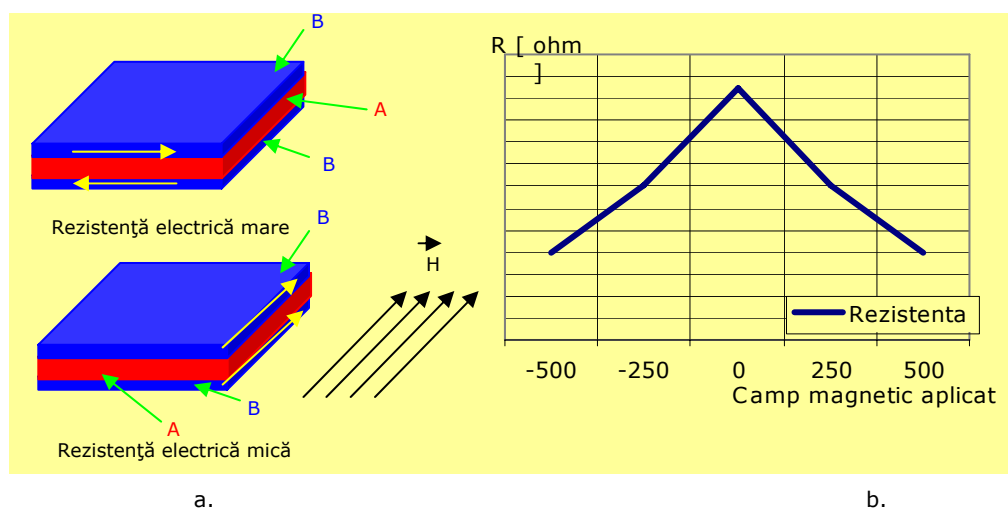
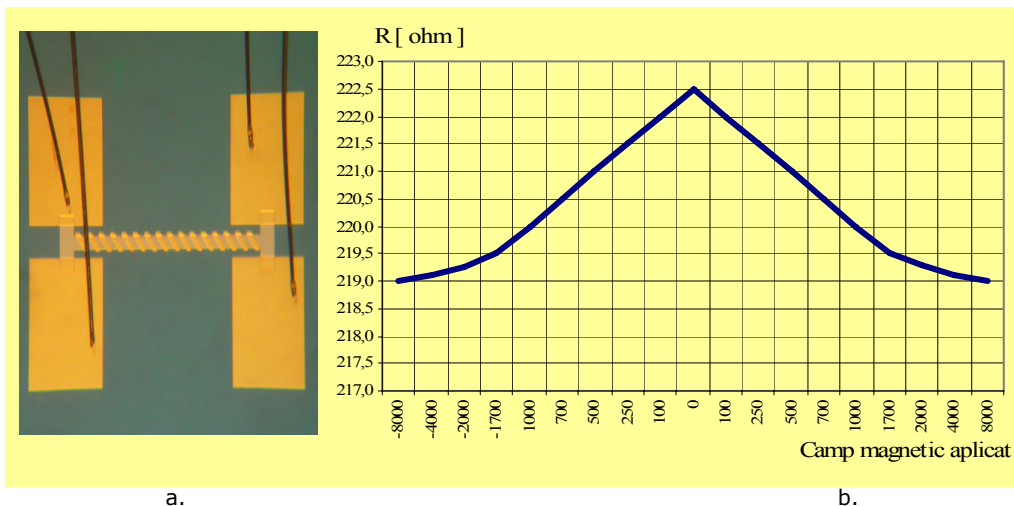


Fig. 2.4 Senzor de câmp magnetic bazat pe efect GMR
a. principiul de realizare; b. variația rezistenței electrice la aplicarea unui câmp magnetic

Caracterizarea câmpului magnetic aplicat este una gaussiană, caracteristica de ieșire este omnipolară, însemnând faptul că materialul prezintă aceleași schimbări în valorile rezistenței pentru un câmp magnetic pozitiv cât și pentru un câmp magnetic negativ.

Principiul de AMR [123] constă în variația rezistenței electrice a materialului la aplicarea unui câmp magnetic extern, modificarea conductibilității fiind dată de anizotropia materialului. În figura 2.5 este prezentat un senzor AMR și comportamentul acestuia la aplicarea unui câmp magnetic extern.



a.

b.

Figura 2.5 Senzor de câmp magnetic bazat pe efect GMR

a. principiul de realizare; b. variația rezistenței electrice la aplicarea unui câmp magnetic

În tabelul 2.1 sunt prezentate avantajele creării de senzori având la bază efectul rezistenței electrice mici, la aplicarea unui câmp magnetic, comparativ cu alte soluții.

Tabel 2.1 Studiu comparativ pentru 3 tipuri de senzori de câmp magnetic

Senzor Avantaje	GMR	HALL	AMR
Dimensiune fizică	Mic	Mic	Mare
Nivel de semnal	Mare	Mic	Mediu
Sensibilitate	Foarte mare	Foarte mic	Foarte mare
Stabilitate termică	Foarte mare	Foarte mic	Mediu
Putere absorbită	Foarte mică	Foarte mic	Foarte mare
Preț	Foarte mic	Foarte mic	Foarte mare

Senzorii de câmp magnetic se pot realiza și cu ajutorul lichidelor magnetice. Nanoparticulele din cadrul lichidelor magnetice se comportă exact ca materialele GMR prezentate mai sus, ele fiind un bun gradiometru datorită orientării nanoparticulelor după liniile de câmp magnetic.

Proprietățile materialelor GMR asigură integritatea acestora indiferent de magnitudinea câmpului magnetic aplicat. Cu ajutorul materialelor cu proprietăți GMR se pot crea mai multe tipuri de senzori de câmp magnetic, cum ar fi magnetometrul sau gradiometrul.

În cadrul sistemelor de sudare senzorii de câmp magnetic pot detecta existența curentului de sudare prin manifestarea sa magnetică în jurul conductorului, precum și în alte aplicații importante cum ar fi determinarea orientării câmpurilor magnetice create de suflaj magnetic.

2.3.3.1 Magnetometrul

Magnetometrul este un senzor de câmp magnetic care detectează intensitatea câmpului magnetic aplicat. Un astfel de senzor este prezentat în figura 2.6. Dimensiunile sale maxime sunt în jurul valorii de 350 μm . Senzorul este configurat ca o punte Wheatstone. Structura serpentinelor din centru și din partea stângă este constituită din materiale GMR și realizează elementul sesizor al magnetometrului [93].

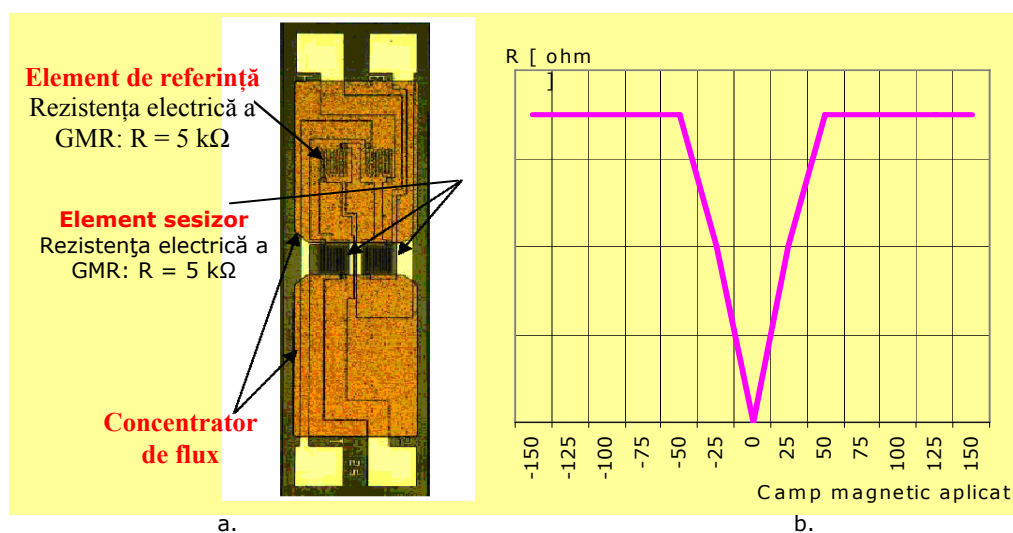


Fig. 2.6 Magnetometru

a. principiul de realizare; b. variația rezistenței la câmp magnetic aplicat

În această configurație rolul concentratorului de flux este de a opri extinderea câmpului magnetic asupra elementului sesizor. Din acest motiv, cei doi rezistori din centru își reduc rezistența electrică la apariția câmpului magnetic, în timp ce celelalte două rezistențe aferente concentratorului de flux nu vor diminua rezistența. Al doilea scop al concentratorului de flux este acela de a varia sensibilitatea senzorului de la caz la caz. Principiul de funcționare al senzorului constă în determinarea reluctanței magnetice minime între elementele active ale senzorului. Efectul indus concentratorului de flux se calculează după formula 2.2:

$$ICM_{\text{element_activ_sesizor}} = CMA \cdot 60\% \cdot \left(\frac{L_{CF}}{d_{CF}} \right) \quad (2.2)$$

unde:

- $ICM_{\text{element_sesizor_activ}}$ – intensitatea câmpului magnetic la elementul sesizor
- CMA – valoarea câmpului magnetic aplicat
- L_{CF} – lungimea concentratoarelor de flux
- d_{CF} – distanța dintre concentratoarele de flux

Pentru senzorul prezentat datele tehnice de ieșire se situează la aproximativ 350 mV la aplicarea unui câmp magnetic de 100 Gauss utilizând o sursă de alimentare de 5 V.

2.3.3.2 Gradiometrul

Gradiometrele sau diferențialul de câmp magnetic este un senzor a cărui manifestare constă în faptul că la plasarea acestuia într-un câmp magnetic, valoarea semnalului de ieșire este nulă. Aceasta se explică prin faptul că toate cele 4 rezistoare sunt expuse aceluiași câmp magnetic, și deci își modifică toate rezistența electrică. În acest caz nu există concentrator de flux sau orice alt scut protector care să mențină rezistența GMR neafectată. O reprezentare simplă a unui gradiometru este prezentată în figura 2.7. Principiul de sesizare al câmpului magnetic este cel diferențial. Astfel la expunerea unei ramuri a punții echilibrate de rezistoare unui câmp magnetic, efectul va consta în apariția unei tensiuni date de căderile de tensiune diferite ce se regăsi pe ramurile expuse unor câmpuri magnetice cu valori diferite [93].

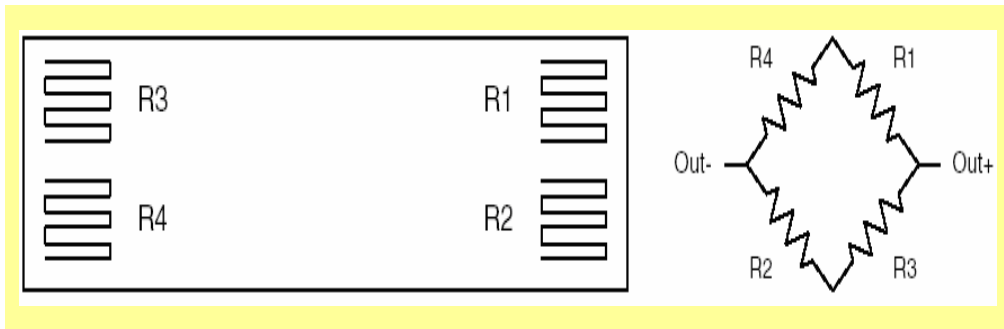
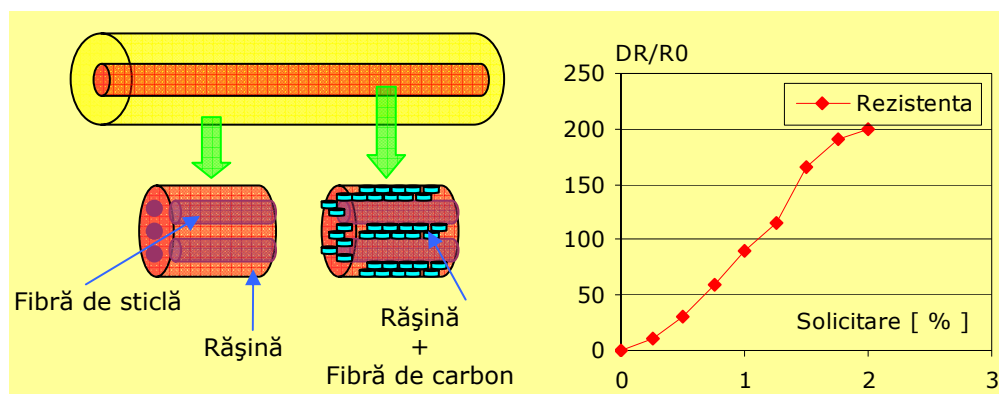


Fig. 2.7 Gradiometru

Deoarece toate cele 4 rezistoare din punte contribuie la semnalul de ieșire al senzorului, teoretic, se poate atinge un semnal de ieșire de aproximativ 700 mV. Practic, semnalul de ieșire este mai mic, în jurul domeniului de valoare 50 – 200 mV. Uzual, gradiometrul este proiectat cu două punți de rezistoare, câte una la fiecare capăt al senzorului.

2.3.4 Senzor de discontinuități în material

Materialele compozite ranforsate cu fibre, având conductibilitate electrică variabilă, au fost [44] proiectate cu scopul de a se dezvolta materiale cu capacitate de autodiagnoză structurală. În plus, ele au și abilitatea de a memora defectele apărute. Acest deziderat este realizat datorită modificării ireversibile a rezistenței electrice dependente de istoricul tensiunilor la care a fost supus materialul. Această proprietate a materialului compozit este atribuită prin adăugarea la materialul compozit a fibrelor de carbon sau a particulelor de carbon. În figura 2.8 sunt prezentate realizarea unui astfel de senzor și variația rezistenței electrice odată cu apariția discontinuităților de material.



a. realizarea fibrelor ranforsate b. variația rezistenței electrice cu solicitarea

Fig. 2.8 Senzor pentru determinarea discontinuităților în material

Senzorii de defecte de material pot fi utilizați fie în examinarea îmbinărilor sudate, fie în sesizarea manifestării tensiunilor și a deformațiilor remanente la sudare.

2.3.5 Senzor de radiație infraroșie și ultrasonică

Detectarea radiației infraroșii [77] este un element important în procesele de comandă de la distanță. În aceeași situație este și detectarea radiației ultrasonice. Sesizarea acestor importante elemente se poate realiza cu ajutorul unei pelicule subțiri de material feroelectric.

Filmele subțiri de material feroelectric sunt preparate prin metoda sol – gel sau prin procese de descompunere a unui cuplu metal – organic și suprapunerea unor straturi sub formă de membrane cu grosimi de până la un micrometru sau puțin peste un micrometru. Materialul din membrană este realizat din Si și se aplică ca o plăcuță, de preferință printr-un procedeu de gravare a siliciului pe plăcuța dielectrică. Matricea senzorială care sesizează radiația infraroșie constă într-un microbolometru (dispozitiv pentru măsurarea energiei radiante) realizat din membrană de $Ba_{1-x}Sr_xTiO_3$ sau $BaTiSn_xO_3$.

Principiul de realizare a senzorului constă în conectarea în serie a mai multor condensatoare care sunt alimentați în curent continuu. Modificarea tensiunii la punctul median din conexiunea serie arată prezența radiației infraroșii. Senzorul de radiație ultrasonică constă în aplicarea unui film subțire piezoelectric pe suprafața membranei. Oscilația membranei sub acțiunea presiunii ultrasonice și tensiunea piezoelectrică a filmului piezoelectric este acceptată pe post de semnal de prezență a radiației ultrasonice. Senzorii de radiație infraroșie sunt utilizabili în sistemele de sudare pentru sesizarea amorsării arcului în cadrul proceselor automate de sudare cu arc electric. Senzorii de radiație ultrasonică pot fi utilizați la detectarea amorsării de fisuri la rece în cadrul unor structuri sudate complexe.

2.3.6 Senzori de gaze

În nanotehnologie, detectarea gazelor este unul dintre cele mai dezvoltate domenii. Numeroase și variate soluții de sesizare [92,140,96,122] au fost dezvoltate

În acest sens. Două dintre toate soluțiile propuse au șanse foarte ridicate de a deveni utilizate la scară largă: nanosârmele [80] și nanopanglicile. [66,121] Așa cum sugerează și numele, nanopanglicile sunt obiecte solide având formă dreptunghiulară uniformă în secțiune. Până acum, nanopanglicile au fost sintetizate în primă fază din oxizi metalici și semiconductori. Studii recente au impus panglicile de SnO_2 pe post de detectoare foarte sensibile de NO_2 . În figura 2.9 este prezentat un model molecular de nanopanglică de SnO_2 .

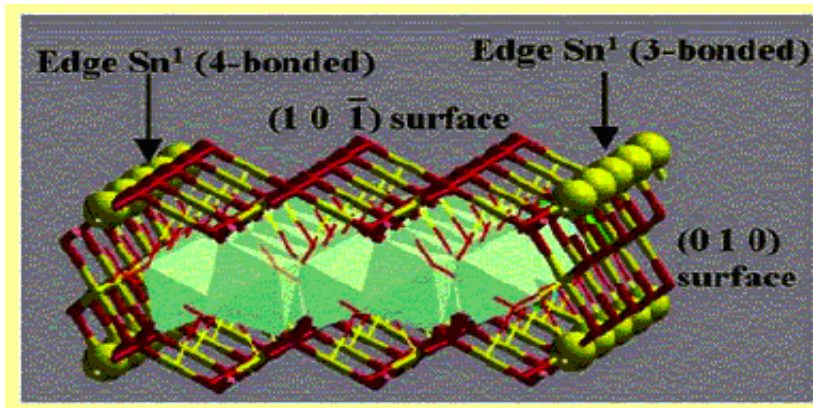


Fig. 2.9 Model molecular de nanopanglică de SnO_2 [19]

Prin absorbția acestor gaze, conductibilitatea electrică a panglicilor scade cu mai mult de un ordin de mărime. În sens invers, este posibilă și eliberarea nanopanglicii de SnO_2 de impregnarea gazelor anterior absorbite, prin expunerea acestora la lumina ultravioletă. După un astfel de tratament conductibilitatea electrică a panglicii revine la valoarea inițială.

Acest tip de senzor prezintă câteva avantaje, dintre care se amintesc:

- Temperatură de operare scăzută
- Prezintă o activitate pe toată suprafața raportată la volum

Sesizarea prin modificarea rezistenței semiconductorului este realizată printr-un strat poros cu proprietăți bune de detecție și un electrod care asigură măsurarea rezistenței electrice a stratului. Stratul sesizor constă într-un mic grăunte de oxid cu mărime de ordinul a câteva sute de nanometri. Distanța dintre electrod și stratul sesizor este de asemenea de ordinul a câtorva sute de nanometri până la $1 \mu\text{m}$. Se poate afirma că senzorul este unul de limită fiind considerat o dată ca un nanosenzor, dar și ca microsenzor.

În ceea ce privește sistemele de sudare, senzorii de gaze sunt utilizați pentru detectarea hidrogenului rezultat din arderea eventualelor grăsimi, precum și a hidrogenului provenind din buteliile în care s-a introdus gaz de protecție sau gaz comburant având anumite conținuturi de apă.

2.3.7 Senzor de temperatură

Un termometru la nivel nano [84] (figura 2.10) a fost realizat de curând de cercetătorii japonezi. Dacă până de curând nanosenzorii de temperatură funcționau numai în vid, ultimul tip de senzor funcționează în atmosferă, are un diametru între $10\text{...}150 \text{ nm}$ și este confecționat dintr-un nanotub de carbon umplut cu galiu lichid.

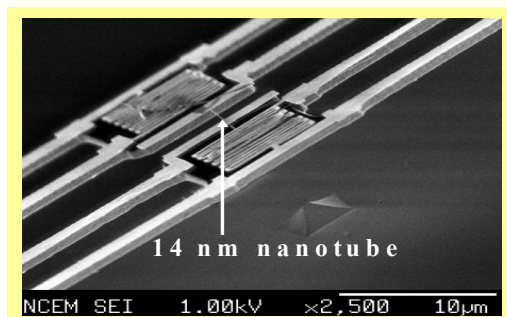


Fig. 2.10 Nanotermometrul cu galiu lichid

Domeniul de măsurare este cuprins între $323\text{...}823^{\circ}\text{K}$ spre deosebire de vechiul nanotermometru care nu depășea ca capacitate de măsurare temperatura de 50°K . Nanotermometrul cu galiu funcționează pe principiul modificării volumului de galiu din interiorul nanotubului la modificarea temperaturii, experimentele arătând faptul că volumul de galiu se modifică liniar cu variația temperaturii în intervalul $50 - 500^{\circ}\text{C}$ [53]. Senzorii de temperatură pot fi utilizați în monitorizarea temperaturii la nivelul componentelor sistemului hibrid de sudare pentru avertizare și/sau comandă.

2.3.8 Senzori de presiune

Acest tip de senzori [108,95,68,109] prezintă o importanță deosebită în procesele industriale unde sesizarea unor presiuni, tensiuni, etc. este vitală pentru controlarea unui proces sau pentru menținerea în stare de funcționare optimă a anumitor echipamente. Un senzor de presiune [11] care transformă presiunea în lumină este prezentat în figura 2.11.

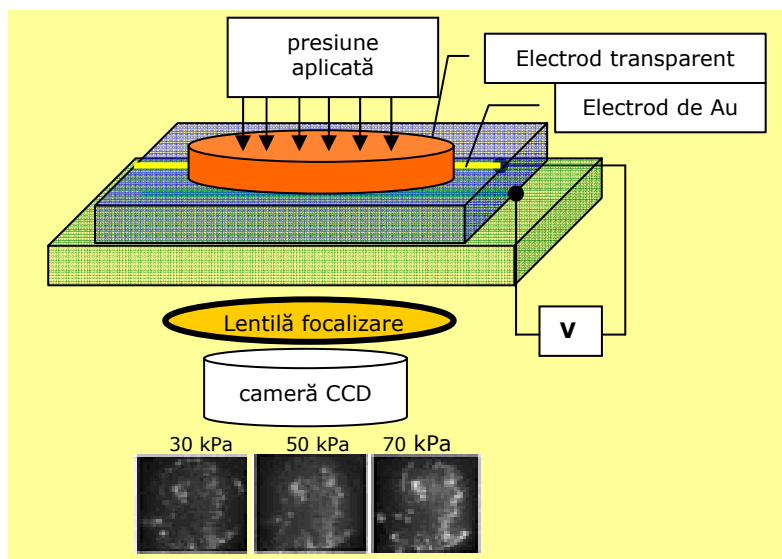


Fig. 2.11 Senzor de presiune optic

Senzorul este compus dintr-un nanodispozitiv electro-optic cu o grosime de 100 nm proiectat să transforme presiunea în lumină. Sensibilitatea este comparativă cu cea degetului uman și este de 10 ori mai bună decât orice senzor tactil dezvoltat până în prezent.

Așa cum s-a arătat și în paragrafele anterioare un element semnalul furnizat de senzor este reprezentat de variația conductibilității electrice.

În cazul sistemelor de sudare senzorii de presiune pot monitoriza curgerea gazelor de protecție, combustibile, carburante sau plasmagene, parametrul presiune fiind important atât pentru starea de funcționare a echipamentelor de sudare (presiunea lichidului de răcire), cât și pentru derularea în bune condiții a procesului de sudare (curgerea gazelor amintite mai sus sau forța de apăsare în cazul sudării prin presiune).

2.3.9 Senzor de apreciere distanță

Măsurările distanțelor cu precizie foarte ridicată [67,125] se realizează uzual cu ajutorul fasciculului laser. Realizarea de laseri semiconductori în domeniul nano a condus la creșterea preciziei de măsurare. În figura 2.12 este prezentat un laser semiconductor pe baza căruia se poate realiza un senzor de măsurare distanțe.

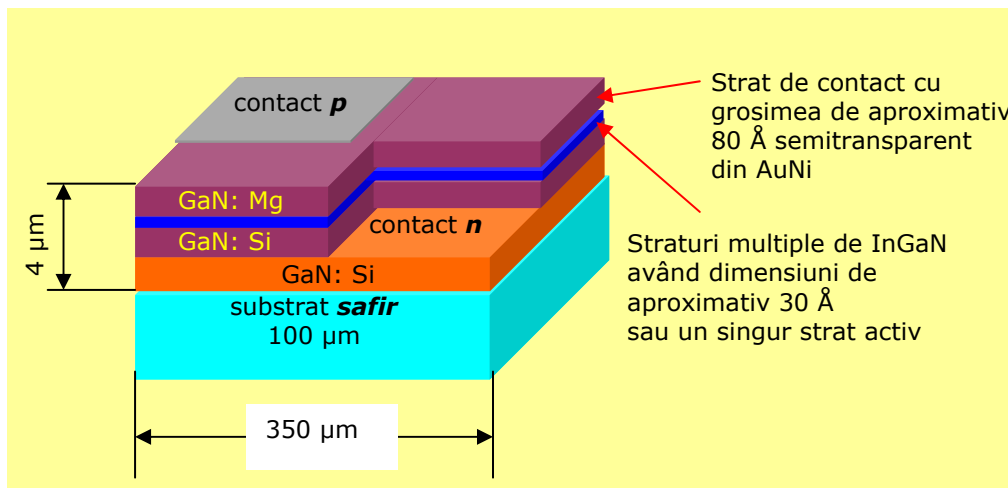


Fig. 2.12 Straturi semiconductoare la un dispozitiv laser [67]

În cadrul sistemelor de sudare, un astfel de senzor poate monitoriza distanța pe care trebuie să o parcurgă un tractor de sudare, starea de deformare a componentelor de sudat sau poziția relativă a două componente, cum ar fi capul de sudare laser și pistolul MIG/MAG sau WIG în cazul sudării hibride.

2.3.10 Senzori de debit

Ca și în cazul nanosenzorilor de presiune, o aplicație importantă a nanotehnologiilor o reprezintă sesizarea debitului unui lichid sau gaz. Unul dintre multitudinile de tipuri de senzori are la bază un nanotub de carbon prin care se scurge lichidul sau gazul. Sesizarea se realizează prin modificarea unei tensiuni de ieșire.

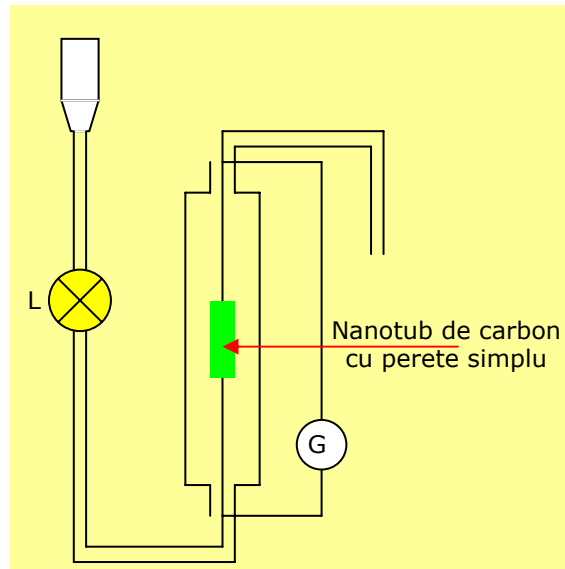


Fig. 2.13 Curgerea fluidelor prin nanotuburi de carbon [38]

În figura 2.13 este prezentată curgerea gazului sau a lichidului printr-un nanotub de carbon și răspunsul acestuia. Principiul de sesizare constă în apariția unei tensiuni electrice datorită împrăstierii electronilor în ambele direcții datorită momentelor de transfer ale purtătorilor de sarcină. De remarcat este faptul că acest senzor se poate realiza prin utilizarea unui nanotub de carbon cu perete simplu ceea ce reduce complexitatea de realizare a senzorului spre deosebire de nanotuburile de carbon cu perete dublu care se realizează în condiții complexe. Acest tip de senzor poate fi folosit la sesizarea debitului de gaz protector în timpul procesului de sudare.

2.3.11 Senzori de vibrații

Comportamentul suspensiilor coloidale de particule nanometrice în condiții de presiune și vibrații a condus la realizarea unor senzori de vibrații utilizați în construcția amortizoarelor. În figura 2.14 este prezentat un senzor de vibrații cu lichide magnetoreologice.

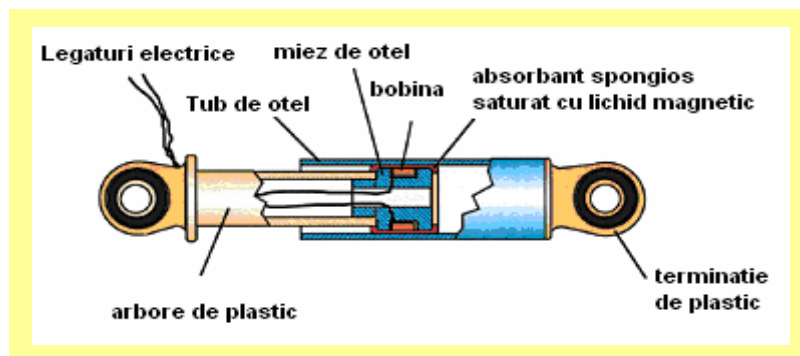


Fig. 2.14 Senzor de vibrații cu lichide magnetoreologice [51]

Principiul de sesizare a sensorului constă în modificarea rezistenței electrice la apariția unei presiuni asupra lichidului magnetoreologic, aceasta datorându-se aglomerării de particule în zona supusă presiunii externe. Un astfel de senzor este utilizabil la monitorizarea transportului sârmei de sudare prin tubul de ghidare la sudarea MIG/MAG sau la ieșirea din starea optimă de funcționare a echipamentelor de sudare utilizate.

2.3.12 Senzori de înclinare cu lichide magnetice

Acești senzori poartă numele de inclinometre [10,104,106,102,105] iar datorită faptului că utilizează lichide magnetice și proprietățile acestora poartă numele de inclinometre magnetofluidice. Utilizând variația inductanței unei bobine în funcție de nivelul lichidului magnetic aflat în miezul acesteia, s-au construit inclinometre cu sensibilitate ridicată.

În figura 2.15 este prezentat un ansamblu senzorial compus dintr-un senzor de tip inclinometru și un senzor de debit funcționând după legea lui Bernoulli. Sistemul este compus din două bobine secundare, legate în opoziție, și aflate în interiorul bobinei primare. Tensiunea U este nulă când tubul cu lichid magnetic este în poziție orizontală, și crește odată cu unghiul de înclinare. Senzorul de presiune: constă dintr-un tub în formă de U conținând un fluid magnetic până la jumătatea ramurilor verticale; în jurul fiecărei ramuri există câte o bobină alimentată în punte având inductanțele L_1 și L_2 funcție de poziția miezului magnetic constituit de fluid. Senzorul de înclinare: este constituit la rândul său dintr-un tub în formă de U cu fluid magnetic și bobine, de inductanțe L_1' și L_2' ; acest senzor este practic identic cu cel anterior și sesizează diferența de presiune creată de diferența de nivel a fluidului în ramurile verticale ale tubului la înclinarea acestuia. Principiul de sesizare constă în faptul că fluidul parcurge bobinele menționate și modifică inductanța unui circuit electric. Semnalul de ieșire este dat în tensiune care poate fi preluat cu ajutorul unui amplificator operațional.

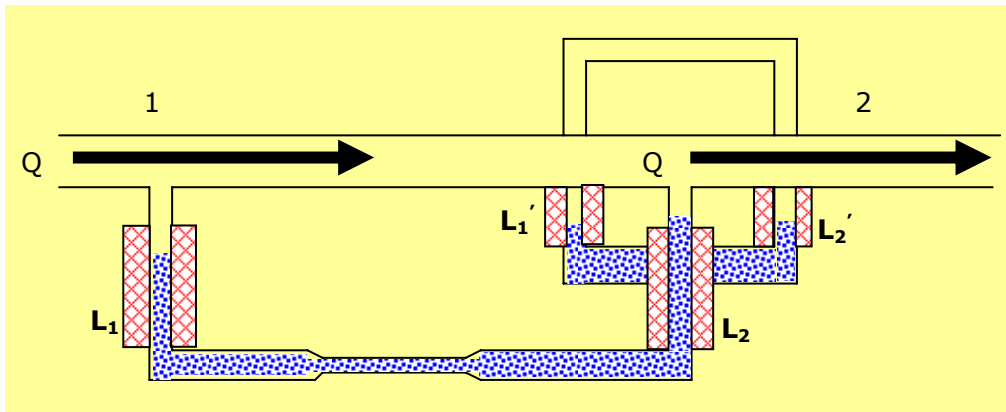


Figura 2.15 Senzori de înclinare și debit [10,104,106,102,105]

Inclinometrele se pot utiliza în sistemele de sudare pentru a poziționa relativ două componente a căror poziție influențează strict funcționarea sistemului de sudare sau rezultatul procesului de sudare.

2.4 Materiale nanostructurate pentru senzori

Pornind de la cele prezentate anterior se observă faptul că principalele materiale nanostructurate utilizabile pe post de elemente active de sesizare sunt:

- fluidele inteligente cu comportare magnetică (lichidele magnetice);
- compozitele de tip sandwich realizate din straturi cu grosimi nanometrice;
- nanofibrele conductoare electric (nanosârmele);
- nanotuburile de carbon.

Alegerea celui mai potrivit material nanostructurat, pentru o aplicație dată, are la bază două criterii esențiale:

- comportarea reactivă, în sensul manifestării unei reacții măsurabile la apariția sau modificarea unui fenomen sau a unei mărimi;
- accesibilitatea, în sensul acceptării facile a costurilor de achiziție de către utilizator.

Având în vedere caracteristicile materialelor prezentate va trebui ales tipul sau tipurile de material care vor fi utilizate în confecționarea senzorilor pentru sistemul hibrid de sudare. În plus, acțiunea este îngreunată de faptul că necunoscând încă mărimile care vor fi supuse monitorizării cu ajutorul senzorilor ce se vor proiecta și construi, nu se poate vorbi decât despre materialele nanostructurate cu potențial de sesizare care să asigure sesizarea unui număr mare de mărimi specifice funcționării sistemului hibrid.

Data fiind această stare de fapt, se apelează la cel de-al doilea criteriu de alegere și anume accesibilitatea. Accesibilitatea presupune fie achiziționarea materialului la prețuri care să asigure costuri de producție scăzute pentru senzorii realizați, fie posibilitatea de elaborare proprie a materialului respectiv, în aceeași condiție privind costurile. Această din urmă variantă este cea mai avantajoasă, ea asigurând posibilitatea realizării de materiale nanostructurate având exact caracteristicile dorite pentru o funcționare corespunzătoare în procesul de sesizare.

Dintre cele 4 materiale nanostructurate, amintite mai sus, singurul care îndeplinește criteriul privind accesibilitatea obținerii sale este fluidul inteligent cu comportare magnetică (lichidul magnetic). Acesta este singurul material care poate fi și realizat în regie proprie relativ ușor și, în plus, există și un volum de cunoștințe suficient pentru elaborarea, caracterizarea, optimizarea și exploatarea sa.

Pe lângă acestea, lichidul magnetic prezintă un potențial ridicat de sesizare, în sensul că el se manifestă reactiv în cazul variației sau existenței câmpurilor magnetice, câmpuri care se manifestă la rândul lor în cazul existenței majorității mărimilor electrice sau magnetice.

După stabilirea mărimilor de proces sau de sistem care se vor stabili pentru sesizare se va proceda la elaborarea unor fluide inteligente cu comportare magnetică posibil a fi utilizate în confecționarea de senzori pentru sesizarea mărimilor respective.

Pentru o imagine de ansamblu privind potențialul de sesizare al lichidelor magnetice, în continuare, se vor efectua unele experimentări de evidențiere a manifestărilor reactive ale acestora.

2.5 Evidențierea potențialului de sesizare al fluidelor nanostructurate inteligente cu comportare magnetică

Utilizând un fluid nanostructurat cu comportare magnetică comercial au fost derulate unele experimentări de evidențiere a potențialului de sesizare al acestor tipuri de materiale nanostructurate. Experimentele au constat atât în relevarea reacțiilor acestora la variațiile mediului ambiant, cât și la reacțiile pe care le provoacă prin propria structură compozită asimilabilă unui metal magnetic fluid.

Pentru experimentări a fost utilizat un fluid magnetic nanostructurat comercial identificat prin codul LM-0.

2.5.1 Comportarea fluidului în prezența câmpurilor magnetice

Experimentările derulate în vederea evidențierii comportării fluidului inteligent cu comportare magnetică [10,90,129,91,73] în prezența câmpurilor magnetice au constat în urmărirea și analiza reacțiilor măsurabile ale materialului nanostructurat LM-0 atunci când este străbătut de liniile unui câmp magnetic.

Primul experiment a constat în introducerea fluidului LM-0 în câmpul magnetic produs de către un magnet permanent și urmărirea evoluției fizice a masei acestuia (figura 2.16).

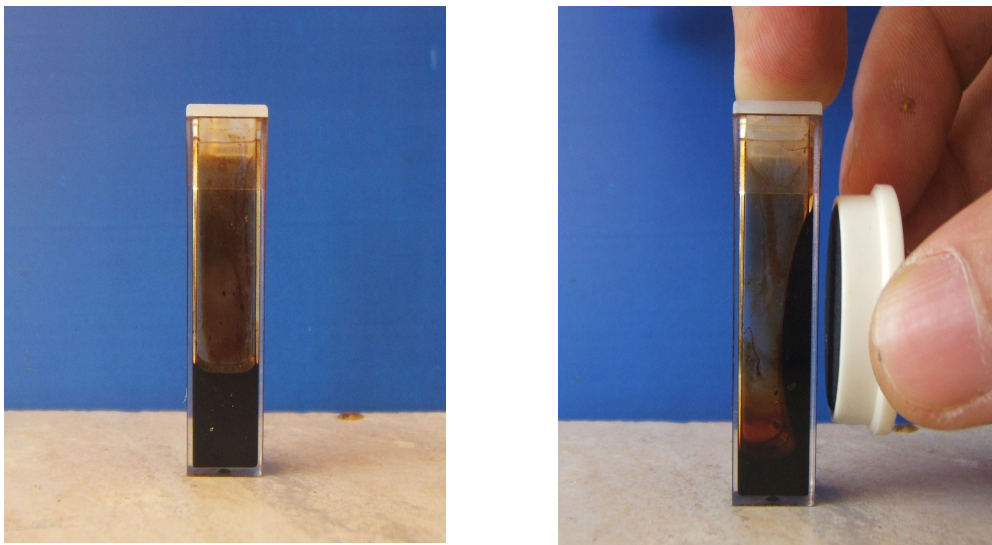
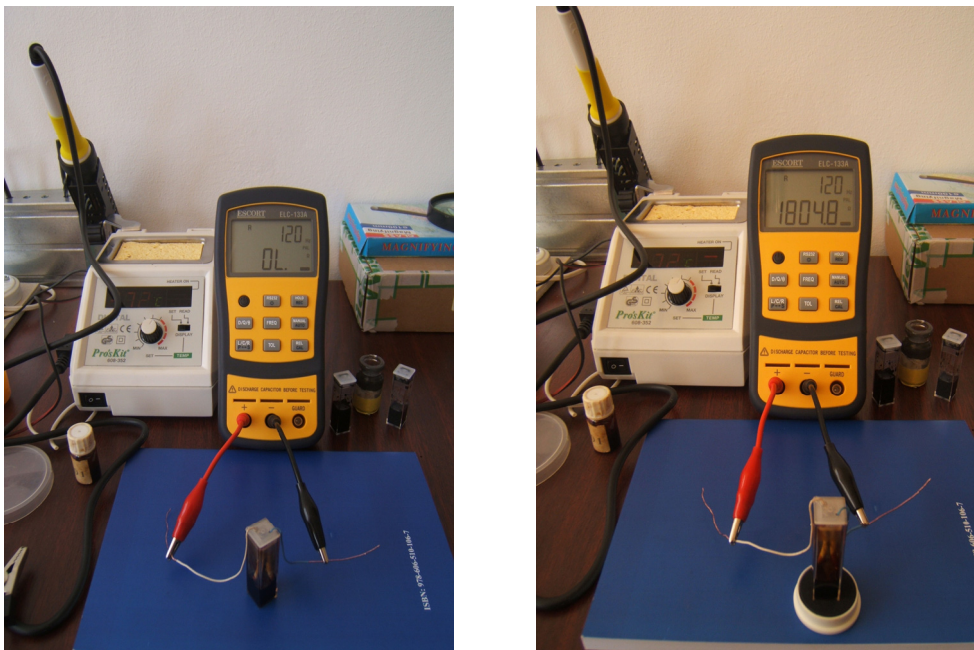


Fig. 2.16 Evoluția masei de lichid magnetic aflat în câmpul unui magnet permanent [10,90,129,91,73]

Se observă, așadar, că lichidul magnetic este atras de către magnet, el tinzând să ocupe cea mai apropiată poziție față de acesta din urmă. Această reacție a lichidului magnetic LM-0 poate fi exploatată în cadrul unor senzori de proximitate, al unor senzori de câmp magnetic și implicit al unor senzori de curent.

Cel de-al doilea experiment a constat în analiza evoluției structurale și a proprietăților lichidului magnetic nanostructurat, la introducerea acestuia într-un câmp magnetic. Pentru aceasta, pornind de la faptul că materialul nanostructurat de tip lichid magnetic este asimilabil unui metal lichid magnetizabil, s-a verificat

conductibilitatea electrică a acestuia. Materialul nanostructurat a fost introdus într-un tub, conform figurii 2.17 (a,b).



a.

b.

Fig. 2.17 Experiment efectuat pentru evidențierea conductibilității electrice a LM-0
a. conductibilitate nulă în lipsa câmpului magnetic; b. conductibilitate bună la aplicarea unui câmp magnetic extern

La capetele tubului au fost montați doi electrozi, ambii conectați la volumul de fluid LM-0 conținut de tub. Cei doi electrozi sunt conectați de asemenea la un echipament de măsurare a rezistențelor electrice.

Inițial, mediul ambiant al lichidului magnetic a fost menținut nealterat, lichidul magnetic fiind într-un echilibru dinamic relativ, la nivel macroscopic. În condiția absenței oricăror perturbatori din zona tubului cu lichid ohmetrul a indicat o valoare nulă pentru rezistență. Aceasta arată faptul că particulele metalice erau relativ uniform distribuite în masa fluidului purtător, neexistând legături între ele, astfel încât conductibilitatea electrică a fost practic inexistentă. Ulterior, tubul cu lichid magnetic a fost introdus într-un câmp magnetic constant. Liniile de câmp orientate longitudinal au orientat particulele după dipolul magnetic al câmpului aplicat. Acestea s-au aglomerat în șiruri paralele cu liniile de câmp, formând adevărați conductori virtuali care au închis circuitul electric construit la capetele tubului cu lichid. Astfel, ohmetrul a înregistrat o valoare a rezistenței electrice. Așadar, în prezența câmpului magnetic lichidul a devenit conductor, pierderile fiind relativ mici. Această proprietate a fluidului inteligent cu comportare magnetică poate fi exploatată în cadrul unor soluții de elemente active de sesizare a diverselor câmpuri magnetice.

2.5.2 Reacții provocate de structura metalică fluidă magnetizabilă

Cantitatea mare de particule metalice uniform dispersate în masa fluidului purtător poate fi asimilat unui metal fluid care îmbină armonios proprietățile specifice curgerii fluidelor vâscoase cu proprietățile metalelor.

Experimentul de evidențiere a acestei îmbinări armonioase a constat în conducerea unui fluid magnetic în interiorul unei bobine cu ajutorul unei minipompe manuale. Utilizarea minipompei a fost posibilă datorită proprietăților de curgere ale fluidului magnetic. Pe parcursul curgerii fluidului în interiorul bobinei au fost efectuate continuu măsurări ale inductanței bobinei (figura 2.18 a. și b.).

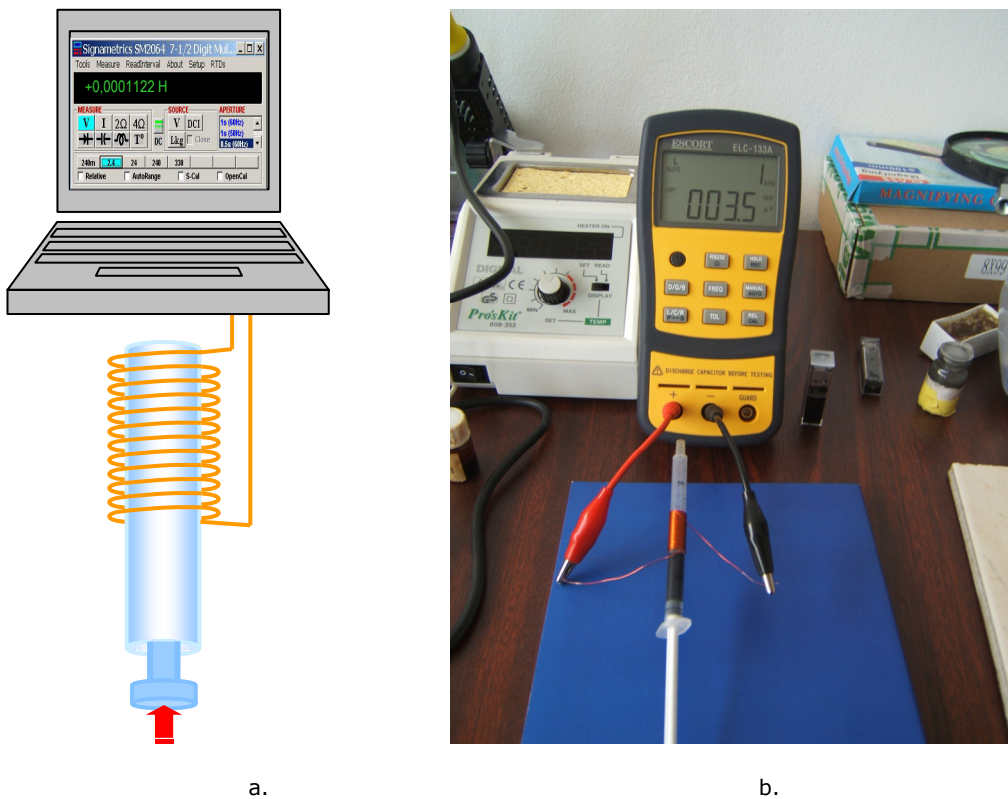


Fig. 2.18 Schema și o imagine din timpul experimentului efectuat cu „metalul fluid” LM-0
a. Principiul de realizare al experimentului; b. Imagine din timpul experimentului realizat

Experimentul a confirmat ipoteza apriorică ce a stat la baza proiectării experimentului, potrivit căreia o creștere a volumului de metal introdus în interiorul bobinei va conduce la o creștere a inductanței bobinei (figura 2.19). [105]

Acest efect, produs de introducerea lichidului magnetic în interiorul bobinei, arată faptul că lichidul magnetic se comportă ca un material feromagnetic solid. În ansamblul său coloana de fluid s-a comportat ca și miez magnetic în interiorul bobinei utilizate în cadrul experimentului.

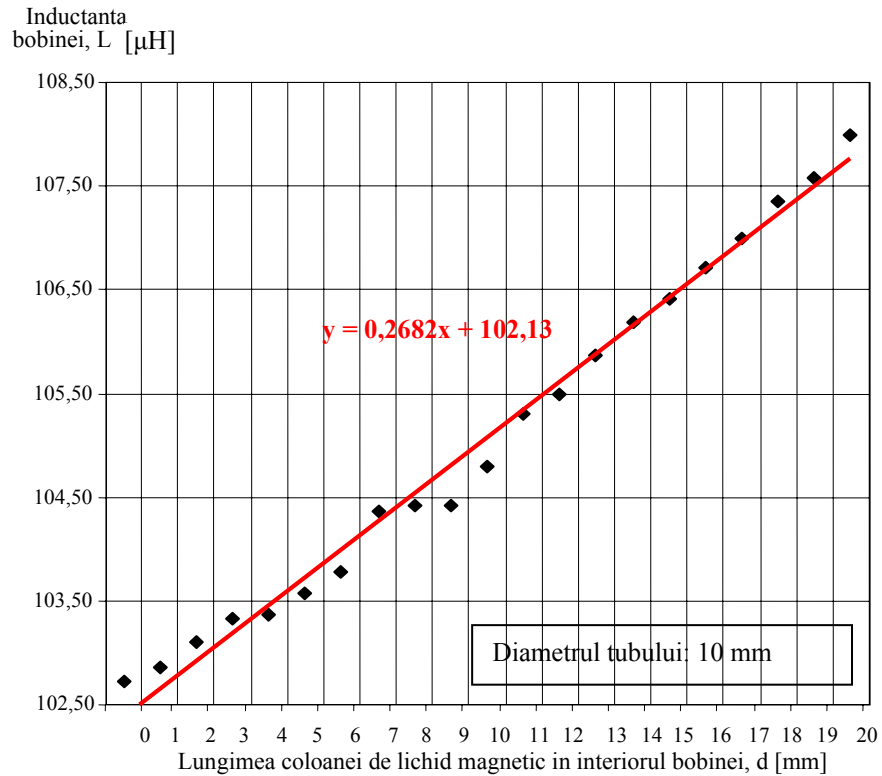


Fig. 2.19 Valorile măsurate ale inductanței pentru un diametru al tubului de 10 mm

Efectul poate fi exploatat în aplicații de sesizare cum ar fi senzori de poziție, senzori de înclinare, senzori de presiune, senzori de debit, senzori de vibrații și în multe alte aplicații caracterizate prin mișcarea elementului activ de sesizare la apariția modificării mărimii monitorizate.

Manifestările evidențiate în cele 3 experimente demonstrează disponibilitatea fluidului nanostructurat de a fi utilizat în procese de sesizare pe post de element activ.

3. Sudarea hibridă laser-arc

3.1 Generalități

Creșterea productivității proceselor de sudare reprezintă una dintre direcțiile prioritare ale cercetării în domeniul sudării. Soluțiile principale aduse de cercetători sunt legate de introducerea de noi procedee de sudare caracterizate prin rate de depunere și viteze de sudare ridicate, dezvoltarea de noi variante ale procedeelor de sudare existente, mecanizarea/automatizarea/robotizarea proceselor de sudare și dezvoltarea de noi materiale de sudare caracterizate prin rate de topire ridicate și randamente supraunitare. Sudarea hibridă laser-arc reprezintă o dezvoltare recentă, caracterizată prin viteze de sudare ridicate și pătrunderi în materialul de bază superioare procedeelor de sudare cu laser. După cum îi spune și numele sudarea hibridă laser-arc constă în realizarea unui tandem funcțional, compus dintr-un fascicul laser și un arc electric de sudare.

Până în prezent, studiile privind eficiența acestui nou procedeu de sudare s-au axat în principal asupra sistemelor ce conțin echipamente pentru sudare cu laser bazate pe pământuri rare (cristale), cum este laserul Nd-YAG, laseri bazați pe puteri mici și medii (până la 10 kW). Nu sunt neglijați însă nici laserii de putere mare (până la 50 kW) cu CO₂, laseri care pot fi utilizați la realizarea unor pătrunderi mari și la sudarea cu viteze crescute. În figura 3.1 este prezentat principiul sudării hibride laser-arc.

În literatura de specialitate termenul de „sudare hibridă laser-arc” se completează prin simbolul Nd-YAG – WIG (MIG) sau WIG (MIG) – Nd-YAG, simbol ce arată ordinea față de direcția și sensul de sudare a poziționării relative a celor două capete active (Nd-YAG – WIG (MIG) înseamnă că laserul precedă fiind urmat de arcul electric, WIG (MIG) – Nd-YAG înseamnă că arcul electric evoluează în fața fascicului laser). Este un procedeu care se bazează pe combinarea și cuplarea acțiunii radiației laser (CO₂ sau Nd-YAG) cu procesul de descărcare electrică în arc (WIG, plasmă / microplasmă sau MIG/MAG) într-o zonă unică de procesare, făcând posibilă evitarea dezavantajelor pe care le implică fiecare proces considerat separat și exploatarea avantajelor specifice acestora.

Introducerea sudării hibride laser-arc are și o motivație legată de calitatea îmbinării sudate. Astfel, dacă sudarea laser prezintă avantajele majore de a produce suduri cu aspect plăcut și de a fi utilizată cu succes la materiale cu grosimi mari, ea prezintă un dezavantaj major constituit din faptul că echipamentul utilizat este pretențios și scump, solicitând în plus o infrastructură destul de complexă. În ceea ce privește pătrunderea maximă la sudarea laser, specialiștii acceptă de comun acord că aceasta este în jurul valorii de 10 – 15 mm. Aceste limitări au încurajat în ultimii ani studiul procedurii de sudare hibridă laser-arc. Studiul acestor soluții a început în urmă cu aproximativ 15 ani, în diferite centre de cercetare, însă abia în ultimii 5-10 ani a început să cunoască o dezvoltare sensibilă. Lipsa de cunoaștere care caracterizează acest procedeu de sudare nu a permis elaborarea de standarde sau producerea în serie a echipamentelor de sudare, toate aceste aspecte fiind în plină dezvoltare în prezent [19].

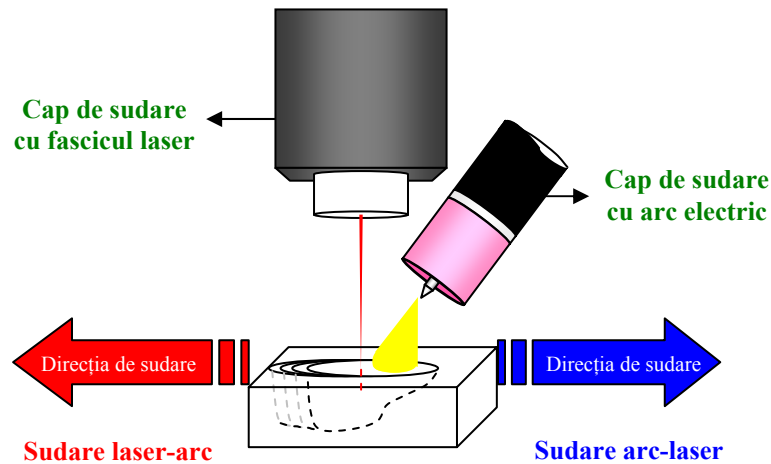


Fig. 3.1 Principiul sudării hibride laser-arc

Analizând caracteristicile sudării hibride, se constată un număr semnificativ de avantaje, comparativ cu alte procedee de sudare, avantaje dintre care se amintesc:

- Viteze de sudare relativ mari, comparativ cu procedeele care compun sistemul hibrid;
- Tensiuni și deformații remanente de valori relativ mici;
- Sudare cu o singură trecere chiar și pentru materiale de bază cu grosimi relativ mari;
- Automatizare facilă a procedurii;
- Consumuri energetice scăzute, comparativ cu alte procedee care oferă rezultate similare în ceea ce privește caracteristicile geometrico-dimensionale ale sudurilor;
- Emisii de noxe reduse ca volum;
- Flexibilitate ridicată;
- Posibilitate de operare cu rosturi cu deschideri mai mari;
- Investiție inițială medie.

Aceste avantaje au condus la creșterea atenției acordate proceselor de sudare hibridă în general și a procedurii de sudare hibridă laser-arc sau arc-laser în special. Ca orice sistem tehnic, sudarea hibridă prezintă și dezavantaje, printre acestea numărându-se:

- Necesitatea aplicării în regim mecanizat a procesului;
- Necesitatea realizării de sisteme de monitorizare a procesului;
- Limitarea gradelor de libertate ale ansamblului hibrid de sudare, datorită complexității acestuia;
- Metalul vaporizat eliberat datorită procesului de topire și reacțiilor chimice care au loc are o influență negativă atât asupra electrodului de wolfram, care va fi supus la rândul lui unei temperaturi extrem de ridicate, cât și asupra lentilei finale a capului de sudare cu fascicul laser, a cărei durată de viață scade sensibil dacă procesul nu este stabilizat corespunzător.

Pentru evidențierea avantajelor specifice sudării hibride laser-arc, comparativ cu sudarea clasică cu fascicul laser, este de ajuns specificarea faptului că

În cazul sudării hibride rosturile înguste nu necesită prelucrări deosebite, așa cum cere procedeul de sudare cu fascicul laser.

Intrarea în zona sudării hibride, care s-a dovedit a fi o combinație sinergică între sudarea cu fascicul laser și sudarea convențională cu arc electric, prezintă avantajul posibilității de realizare a unei umpleri corespunzătoare a rostului, posibilitate datorată acțiunii capului de sudare cu arc electric, păstrând în același timp avantajele unei pătrunderi mari datorate acțiunii fasciculului laser.

Nu de puține ori în sistemele hibride laser-arc sunt utilizați laseri cu CO₂. Avantajul principal al utilizării unor astfel de sisteme hibride constă în faptul că ele pot genera puteri mari. Dezavantajul major, comparativ cu sistemele utilizând laseri cu cristale, este dat de rigiditatea sistemului. În cazul sistemelor cu laseri Nd-YAG flexibilitatea sistemului este dată de faptul că fasciculul laser poate fi transportat prin fibre optice (flexibile de altfel) în orice punct într-o vecinătate de ordinul metrilor sau chiar mai mult.

Avantajele și dezavantajele proceselor convenționale de sudare cu fascicul laser și cu arc electric de tip MIG/MAG, considerate separat, sunt prezentate în tabelul 3.1 în antiteză cu cele ale procesului de sudare hibridă laser-arc MIG/MAG:

Tabel 3.1 Studiu comparativ al procesului de sudare hibrid cu procesele de sudare componente

Sudarea cu fascicul laser	
Avantaje	Dezavantaje
Viteză mare de sudare	Prezintă formațiuni cu porozitate
Temperatură mică indusă	Slabă acoperire a rostului
Zonă mică influențată termic	Fisurare în sudură
Pătrundere mare	
Viteză de sudare mare	
Sudarea cu arc electric de tip MIG/MAG	
Avantaje	Dezavantaje
Bună acoperire a rostului	Viteză mică de sudare
	Pătrundere mică
	Temperatură mare injectată
Sudarea hibridă laser-arc de tip MIG/MAG	
Avantaje	Dezavantaje
Eliminarea porozităților	Funcționare în regim mecanizat/automatizat/robotizat impusă de gabaritul și greutatea capului de sudare hibrid, ceea ce presupune costuri suplimentare specifice implementării procedurii de sudare. În același timp impunerea funcționării în regim mecanizat se transformă în avantaj prin creșterea productivității procedurii.
Îmbunătățirea calității sudurii	
Îmbunătățirea geometriei sudurii	
Toleranță largă a rostului	
Pătrundere mare	
Viteză mare de sudare	

3.2 Elemente de fizica procesului hibrid de sudare laser-arc

Sudarea hibridă laser-arc reprezintă un domeniu de activitate în continuă dezvoltare aplicabilitatea sa regăsindu-se în ramurile industriale care necesită o productivitate mărită cum ar fi șantierele navale unde volumul de îmbinări sudate este foarte ridicat. Astfel, literatura de specialitate tratează cu mare atenție acest

domeniu cu scopul identificării de noi aplicații pentru eficientizarea proceselor industriale prin creșterea productivității, obținerea unor adâncimi de pătrundere considerabile, calitate superioară a îmbinărilor sudate, etc.

Cercetarea [111] procesului hibrid de sudare laser-arc se regăsește în întreg spectrul științific de la sudabilitatea materialelor [71,65] și obținerea de îmbinări sudate cu calitate superioară [117,54,49,30,33,60] până la stabilitatea procesului. [55,33,135]

Un domeniu important în care sudarea hibridă laser-arc se aplică cu succes este cel al industriei de automobile [127,81,39,64] unde este aplicat cu succes procedeul de sudare laser-MIG. [119]. Deasemenea domeniul naval este un mare producător de îmbinări sudate datorită volumului mare de oțel utilizat la construcția navelor, procesul de sudare hibridă laser-MAG fiind o componentă prioritară. [50,29,143]

Reducerea costurilor de producție este o strategie comună firmelor din domeniu industrial care utilizează sudarea ca și procedeu de îmbinare. Procedeul de sudare hibridă laser-MAG se aplică cu succes și în cazul îmbinării conductelor utilizate la transportul gazelor. [26]

Cunoașterea procesului de sudare hibrid laser-arc are la bază modelarea acestuia, înțelegerea fizicii procesului hibrid pentru evidențierea efectului sinergic pe care acesta îl induce. Astfel, cercetările au fost direcționate în principal către obținerea de modele teoretice matematice care să poată furniza informații științifice de calitate în elaborarea prescripțiilor de sudare. [144] Pentru a putea obține efectul sinergic al sudării hibride laser-arc trebuie cunoscute caracteristicile fizico-chimice-metalurgice-funcționale ale procedeului de sudare în sine. Studii ale acestor aspecte au fost realizate începând cu ultimii 10 ani, acordându-i-se în prezent un volum mare din totalul activităților de cercetare-dezvoltare [19]. Variantele procesului hibrid cu cele mai ridicate rate de dezvoltare sunt cele de tipul: laser Nd-YAG – arc WIG / MIG/MAG / Plasma / Microplasma. [100]

În cadrul prezentei lucrări se vor prezenta atât rezultatele unor studii ale autorului, cât și rezultate din literatura de specialitate, asupra sudării hibride laser – WIG și laser – MIG/MAG. Această alegere s-a făcut în dorința de a se aprofunda cunoștințele de bază și specifice din domeniul procedeelor de sudare hibridă laser-arc pentru care se dorește dezvoltarea de senzori nanostructurați. Cercetările au avut drept scop evidențierea parametrilor de proces și de sistem care conduc la stabilizarea procesului hibrid laser-arc, la obținerea efectului sinergic și implicit la creșterea productivității și a calității îmbinărilor sudate.

Așa cum s-a afirmat anterior, principiul general al procedeelor de sudare cu arcul electric constă din utilizarea drept sursă termică, destinată topirii materialelor de bază și a materialului de adaos, a unei descărcări electrice în gaz ionizat. Arcul electric este parte componentă a circuitului electric și este caracterizat de faptul că posedă propriul câmp magnetic. Rezistența electrică a arcului electric de sudare este dependentă de intensitatea curentului furnizat de sursa de alimentare a echipamentului și de gradul de ionizare al mediului de protecție utilizat. Gradul de ionizare al gazelor existente în spațiul de arc electric poate fi crescut sau scăzut prin utilizarea unui fascicul laser. Astfel, prin utilizarea unui fascicul laser s-a obținut o ionizare suplimentară a arcului electric, precum și o creștere a numărului de purtători de sarcină care se deplasează prin spațiul de arc electric. Acest fenomen a condus la creșterea conductivității și implicit la reducerea căderii de tensiune pe arcul electric, deci implicit la reducerea pierderilor cauzate de căderile de tensiune pe elementele circuitului. Caracteristica tensiune – curent pentru cele două cazuri studiate este prezentată în figura 3.2.

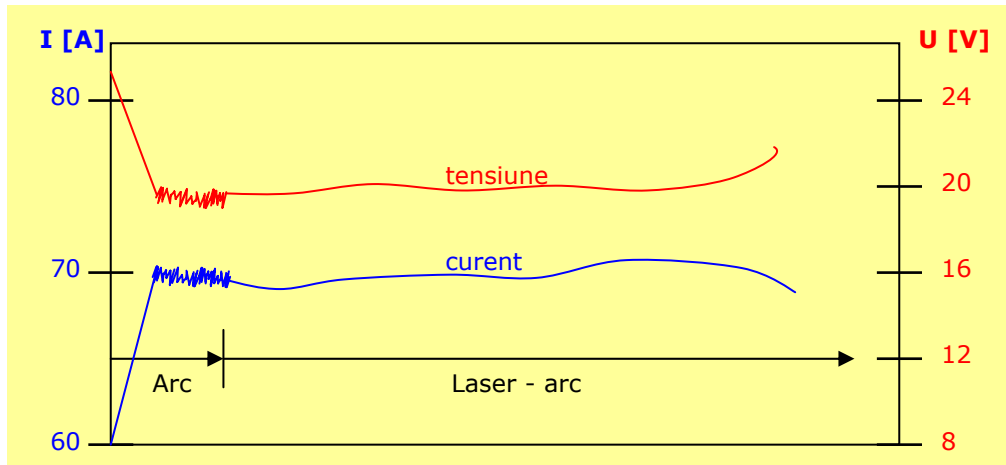


Fig. 3.2 Stabilitatea arcului electric în regim convențional și în sistem hibrid laser-arc [126]

Din figură se observă faptul că arcul electric devine mult mai stabil în cazul sudării hibride laser – arc comparativ cu sudarea convențională cu arc electric.

3.2.1 Caracteristicile fizice ale sudării hibride laser – WIG

Așa cum s-a afirmat anterior, sudarea hibridă laser-arc este încă în stadiul de cercetare. Informațiile prezentate în majoritatea lucrărilor de specialitate se referă la sudarea hibridă laser-MIG/MAG. La sudarea hibridă laser – WIG, printr zonele rămase neexplorate, a rămas de investigat și influența pe care fasciculul laser o exercită asupra proceselor de ionizare din spațiul de arc. Cercetări în acest sens, cu valoare importantă pentru activitățile ulterioare de dezvoltare de sisteme senzoriale, au fost efectuate de către autor, iar principalele rezultate sunt prezentate în cadrul prezentului capitol. Cercetările derulate vizează și transferurile energetice sub formă de căldură la nivelul materialelor de bază. Pe lângă aceste aspecte, în cadrul capitolului se evaluează influența lungimii de undă a laserului asupra parametrilor de sudare.

Influența fasciculului laser asupra procesului de sudare în varianta sudării hibride Nd-YAG – WIG, sau WIG – Nd-YAG, este caracterizată de următoarele aspecte:

- Intensitatea curentului prin arc crește o dată cu scăderea rezistenței electrice. Prin combinarea acțiunii fasciculului laser cu acțiunea arcului electric, temperatura din coloana arcului va crește foarte mult; acest fapt va conduce la o creștere a emisiei de ioni pozitivi și de electroni;
- Al doilea aspect important este dat de contracția arcului. Se știe că o diferență foarte mare între temperatura din arcul electric și mediul înconjurător conduce la o contracție a arcului electric. Fasciculul laser crește temperatura arcului și cu toate acestea fenomenul de contracție nu se dezvoltă;
- Există materiale care la lumina ambientală reflectă aproape în totalitate radiația laser, aspect care dăunează nu numai eficienței procesului, dar și aparaturii din încăperile în care are loc procesul de sudare. Datorită arcului electric suprafața materialului care se dorește a se suda este

puternic încălzită, fapt care va îmbunătăți pătrunderea fascicului laser în materialul de bază.

3.2.1.1 Influența condițiilor și a parametrilor de sudare asupra pătrunderii

3.2.1.1.1 Influența vitezei de sudare asupra pătrunderii în material

Viteza de sudare reprezintă un parametru esențial în cadrul proceselor de sudare, ea participând direct la determinarea energiei liniare. În plus, viteza de sudare determină nivelul productivității unui proces de sudare. Din acest punct de vedere, creșterea vitezei de sudare, în condițiile păstrării nealterate a calității îmbinării sudate, este un criteriu de bază în dezvoltarea procedeele de sudare. Cercetările derulate în acest sens și prezentate în literatura de specialitate, pentru un sistem hibrid de sudare compus dintr-un laser având puterea $P_L = 110 \text{ W}$ și un echipament de sudare WIG utilizând un curent de sudare $I_s = 100 \text{ A}$ în protecție argon, au evidențiat Sudurile realizate prin procedeul de sudare hibridă sunt mai late decât în cazul celorlalte două procedee de sudare utilizate în experimentări (WIG convențional și laser convențional). [86]

Pentru realizarea experimentărilor de sudare hibridă laser-arc și evidențierea influenței condițiilor și parametrilor de sudare s-a conceput și realizat un ansamblu care realizează împreună cu dispozitivul de sudare cu laser și pistolul WIG un ansamblu de sudare hibridă laser-arc. Se prezintă în figura 3.3 echipamentul de sudare hibridă laser-arc astfel construit.

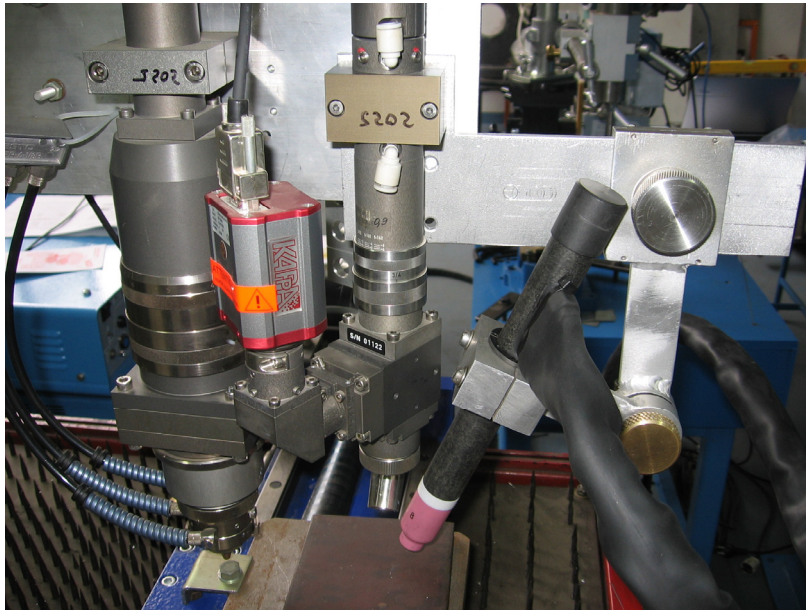


Fig. 3.3 Ansamblul de sudare hibridă laser-arc

Condițiile de realizare ale experimentului sunt următoarele: distanța dintre electrodul de wolfram și fascicului laser $d = 3,12 \text{ mm}$, unghiul dintre laser și pistolul WIG $\beta = 27^\circ$ iar parametrii de sudare sunt prezentați în tabelul 3.2.

Tabel 3.2 Parametrii de sudare ai ansamblului hibrid de sudare Laser-WIG

Laser Nd-YAG				
Putere puls [W]	Durată puls [ms]	Frecvență de repetiție [Hz]	Energie puls [J]	Puterea medie [W]
2500	3	15	7,5	112,5
WIG				
Tensiunea de sudare [V]			Curent de sudare [A]	
22			18	

Rezultatele cercetărilor experimentale efectuate pentru studiul influenței vitezei de sudare asupra pătrunderii în material sunt prezentate (figura 3.4).

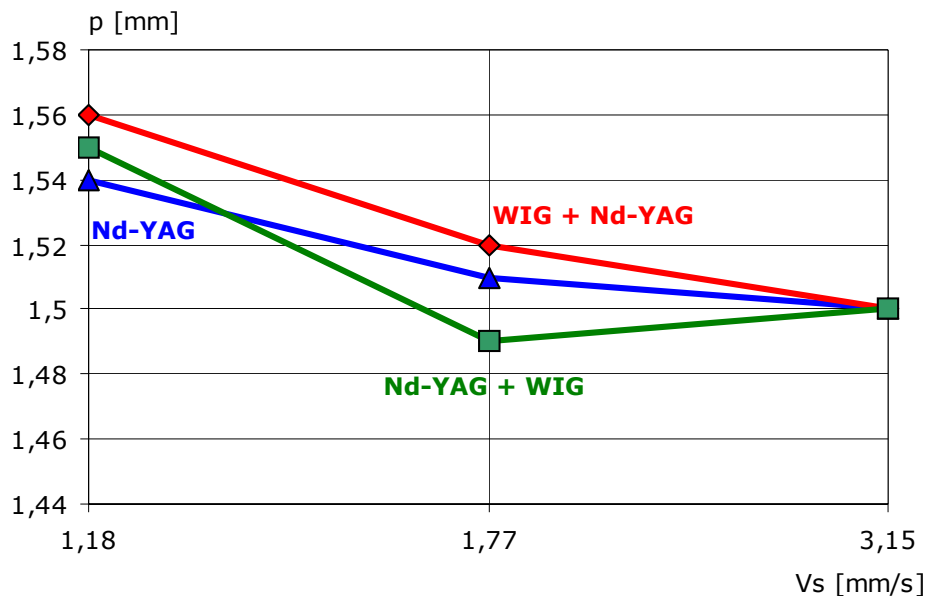


Fig. 3.4 Pătrunderea în funcție de viteza de sudare

Analiza macroscopică a sudurilor evidențiază următoarele aspecte:

- Pătrunderea specifică sudării hibride WIG – Nd-YAG este sensibil mai mare decât pătrunderea dată de sudarea cu laser pentru întreg domeniul de viteze verificat.
- Eficiența aplicării sudării hibride devine discutabilă la valori mici ale grosimilor materialelor de bază, unde, pentru viteze de sudare mai mari decât 2 mm/s, eficiența procedurii de sudare hibridă este comparabilă cu cea a procedurii de sudare convențională cu laser.

3.2.1.1.2 Influența poziționării relative a celor două capete de sudare componente ale sistemului hibrid asupra pătrunderii în materialul de bază

Distanța dintre electrodul de wolfram și fasciculul laser este unul dintre elementele de sistem care manifestă o influență puternică asupra stabilității

procesului de sudare și asupra caracteristicilor geometrico-dimensionale ale sudurilor. Per ansamblu, distanța dintre vârful electrodului de wolfram al capului de sudare WIG și fasciculul laser influențează pătrunderea în materialul de bază în sensul creșterii pătrunderii o dată cu scăderea acestei distanțe, evoluția pătrunderii având loc după curbe aproximativ parabolice [86].

Condițiile de realizare ale experimentului sunt următoarele: viteza de sudare $v_s = 3,15$ mm/s, unghiul dintre laser și pistolul WIG, $\beta = 27^\circ$ iar parametrii de sudare sunt prezentați în tabelul 3.3.

Tabel 3.3 Parametrii de sudare ai ansamblului hibrid de sudare Laser-WIG

Laser Nd-YAG				
Putere puls [W]	Durață puls [ms]	Frecvență de repetiție [Hz]	Energie puls [J]	Puterea medie [W]
2500	3	15	7,5	112,5
WIG				
Tensiunea de sudare [V]			Curent de sudare [A]	
22			18	

În ceea ce privește influența sa asupra pătrunderii în materialul de bază, experimentările derulate în aceleași condiții ca și în cazul experimentărilor anterioare au evidențiat corelațiile prezentate în figura 3.5.

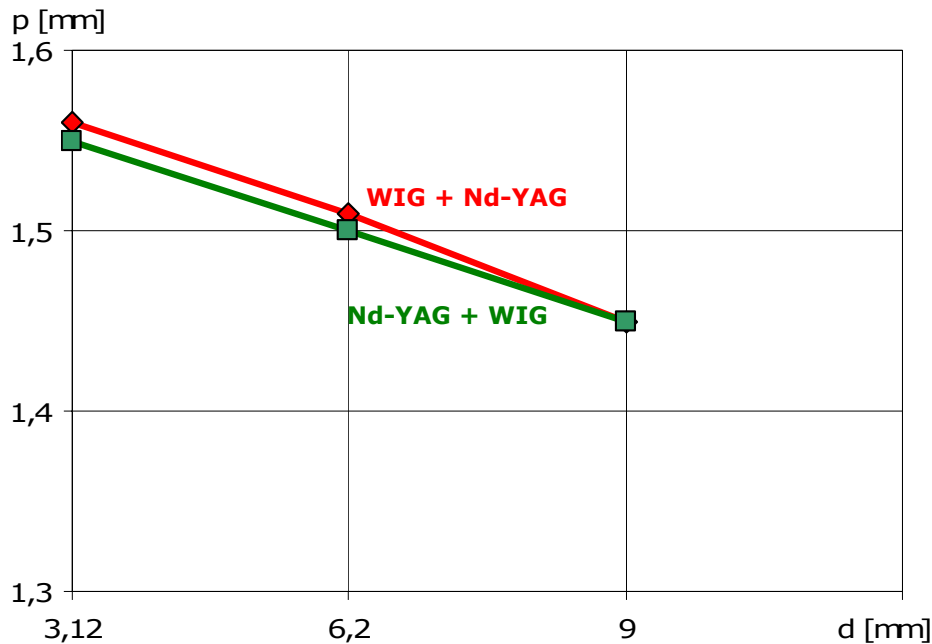


Fig. 3.5 Pătrunderea în funcție de distanța dintre vârful electrodului și fasciculul laser

Concluziile care se pot trage în urma analizei dependențelor prezentate în figura 3.4 sunt următoarele:

- La sudarea WIG – Nd-YAG pătrunderea capătă valori semnificative (0,13 mm) atunci când distanța dintre vârful electrodului de wolfram și fasciculul laser este limitată superior la valoarea de 3 mm;
- La o distanță de 9 mm între electrodul de wolfram și fasciculul laser procedeul de sudare nu mai este hibrid existând doar două procedee de sudare independente (sudare convențională WIG și sudarea cu laser)
- Pătrunderea depinde și de procedeul conducător în construcția sistemului hibrid. Astfel, ea este mai mare atunci când procedeul de sudare hibridă este de tip WIG – Nd-YAG situație în care, în medie, pătrunderea este mai mare cu aproximativ 10% față de situația în care conducător este procedeul de sudare cu fascicul laser (Nd-YAG – WIG);

Poziționarea relativă a celor două capete componente presupune nu numai asigurarea unei anumite distanțe între acestea. Un parametru important al poziționării este unghiul dintre cele două capete de sudare. De cele mai multe ori, datorită dimensiunilor de gabarit ale celor două capete de sudare nu se poate ajunge la valori mici ale distanței dintre acestea decât modificând unghiul dintre ele. Condițiile de realizare ale experimentului sunt următoarele: $v_s = 3,15$ mm/s, distanța dintre electrodul de wolfram și fasciculul laser $d = 6,2$ mm iar parametrii de sudare sunt prezentați în tabelul 3.4.

Tabel 3.4 Parametrii de sudare ai ansamblului hibrid de sudare Laser-WIG

Laser Nd-YAG				
Putere puls [W]	Durată puls [ms]	Frecvență de repetiție [Hz]	Energie puls [J]	Puterea medie [W]
2500	3	15	7,5	112,5
WIG				
Tensiunea de sudare [V]			Curent de sudare [A]	
22			18	

În figura 3.6 este prezentată influența unghiului dintre capetele de sudare asupra pătrunderii în materialul de bază.

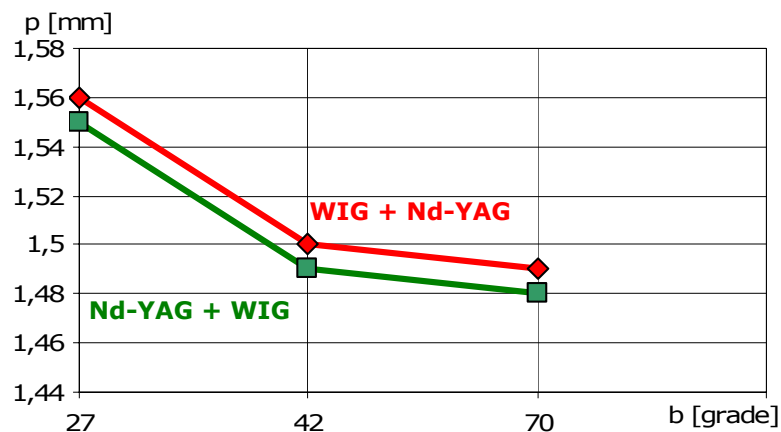


Fig. 3.6 Pătrunderea în funcție de unghiul dintre electrodul de wolfram și fasciculul laser

Concluziile care se pot trage în urma analizei dependențelor prezentate în figura 3.5 sunt următoarele:

- La sudarea WIG – Nd-YAG pătrunderea capătă valori semnificative (1,56 mm) atunci când unghiul dintre dispozitivul laser și pistolul WIG este de 27° ;
- Comparativ cu studiul anterior se poate observa că sudarea hibridă laser-arc devine similară sudării cu laser pentru un unghi de aproximativ 42° .

3.2.1.1.3 Influența procedului conducător al procesului hibrid de sudare asupra pătrunderii în materialul de bază

Un alt aspect urmărit constă în cercetarea cantității de energie absorbite din rețeaua de alimentare. În figura 3.7 este prezentată energia necesară absorbită în cadrul procesului de sudare hibrid laser-arc comparativ cu energiile absorbite de cele două procedee considerate independent pentru obținerea pătrunderii.

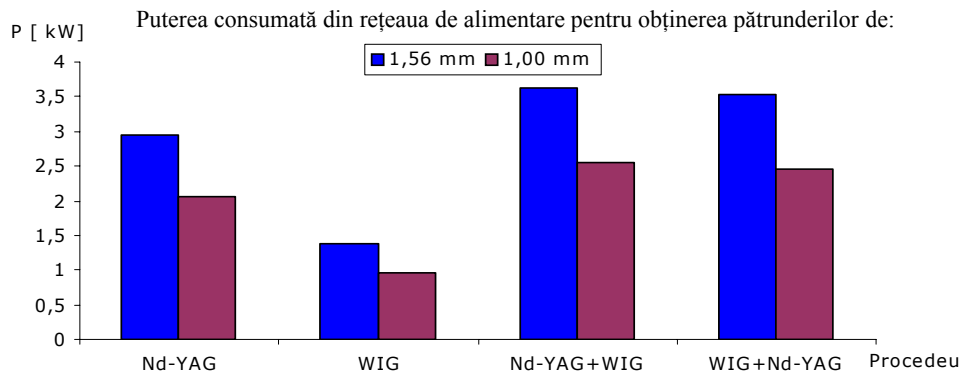


Fig. 3.7 Eficiența energetică a sudării hibride laser-arc

Din figura 3.7 rezultă că în cazul sudării hibride laser-arc energia absorbită de la rețeaua de alimentare este mai mică decât suma energiilor absorbite de cele două procedee considerate independent pentru obținerea pătrunderii solicitate.

Condițiile de realizare ale experimentului sunt următoarele: $v_s = 3,15$ mm/s, distanța dintre electrodul de wolfram și fasciculul laser $d = 6,2$ mm iar parametrii de sudare sunt prezentați în tabelul 3.5.

Tabel 3.5 Parametrii de sudare ai ansamblului hibrid de sudare Laser-WIG

WIG – Nd-YAG				
Putere puls [W]	Durată puls [ms]	Frecvență de repetiție [Hz]	Energie puls [J]	Puterea medie [W]
2500	3	15	7,5	112,5
Tensiunea de sudare [V]			Curent de sudare [A]	
22			18	
Laser Nd-YAG				
Putere puls [W]	Durată puls [ms]	Frecvență de repetiție [Hz]	Energie puls [J]	Puterea medie [W]

2900	3	15	7,5	112,5
Arc electric WIG				
Tensiunea de sudare [V]		Curent de sudare [A]		
15		40		

Concluzia care se extrage din graficul prezentat în figura 3.9 se poate exprima prin relația 3.1:

$$E_{\text{sudare_hibrida_WIG-YAG}} < E_{\text{sudare_laser_Nd-YAG}} + E_{\text{sudare_WIG}} \quad (3.1)$$

unde:

- $E_{\text{sudare_hibrida_WIG-YAG}}$ - energia absorbită la sudarea hibridă laser-arc;
- $E_{\text{sudare_laser_Nd-YAG}}$ - energia absorbită la sudarea cu laser Nd-YAG.
- $E_{\text{sudare_WIG}}$ - energia absorbită din rețea la sudarea WIG

Deci, energia electrică absorbită de la rețeaua de alimentare în procesul de sudare hibridă laser - WIG este mai mică decât energia electrică absorbită în procesul de sudare cu laser considerat independent ceea ce conferă o eficiență energetică în cadrul sudării hibride laser-arc. O altă observație care se evidențiază constă în faptul că arcul WIG influențează foarte puțin din punct de vedere energetic în cazul experimentelor, acest lucru fiind datorat și faptului că pătrunderile obținute sunt mici.

3.2.1.1.4 Parametrii de proces care exercită influențe determinante asupra pătrunderii în material

Conform literaturii de specialitate [3] parametrii de proces importanți în realizarea pătrunderii în materialul de bază sunt: puterea fascicului laser, puterea arcului prin valorile curentului de sudare și tensiunii arcului, viteza de sudare precum și natura și debitul gazelor de protecție utilizate. Calitativ, influențele acestor parametri arată conform figurii 3.8.

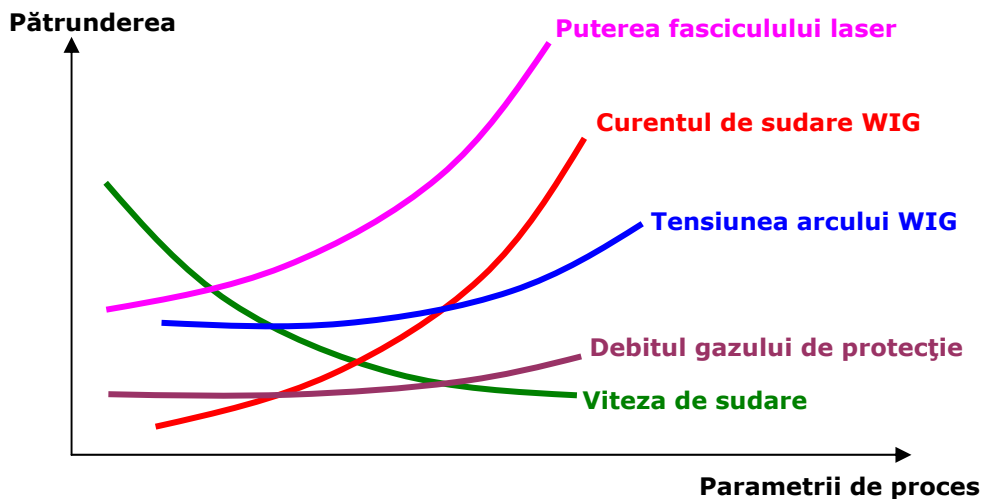


Fig. 3.8 Influențele introduse de parametrii de proces asupra pătrunderii

Sursa termică utilizată într-un proces de sudare prin topire este caracterizată, pentru un anumit set de parametri de proces, de o anumită putere de topire. Pentru această putere de topire, în funcție de tipul materialului de bază, rezultă un anumit volum de metal topit și implicit o anumită pătrundere de topire. Creșterea puterii de topire a sursei va produce o cantitate mai mare de metal topit, dar și o pătrundere din ce în ce mai mare. Cum puterea de topire a sursei este determinată de anumiți parametri ai sursei, rezultă faptul că de acești parametri va depinde implicit și pătrunderea.

Fasciculul laser, ca sursă termică pentru sudare, este caracterizat de o putere proprie, putere care influențează pregnant capacitatea sa de topire. Pentru un material de bază dat (cu o reflexivitate dată și un număr de caracteristici de transfer termic date), creșterea puterii proprii a fasciculului laser conduce la creșterea puterii de topire, a volumului de metal topit și a pătrunderii în materialul de bază.

La fel ca și în cazul fasciculului laser, și arcul electric, ca sursă termică pentru sudare, este caracterizat de o putere proprie. Fiind o manifestare electrică a materiei arcul electric are doi parametri definatorii din punct de vedere al puterii proprii: curentul prin arc și tensiunea arcului. Creșterea fiecăruia dintre acești doi parametri, menținându-se celălalt parametru constant conduce (prin definiția puterii electrice: $P=U \cdot I$), la o creștere liniară a puterii. Creșterea simultană a celor doi parametri definatorii conduce la creșterea aproape parabolică a puterii proprii a arcului electric. Ca sursă de sudare însă, vorbind despre puterea de topire, pe lângă curentul prin arcul electric (acceptat și sub numele de curent de sudare) și tensiunea arcului electric mai intervine un parametru cu ajutorul căruia se caracterizează cantitatea de căldură introdusă în materialul de bază și implicit volumul de metal topit și pătrunderea: viteza de sudare (viteza de deplasare a sursei termice). Forma matematică a influenței vitezei de sudare se deduce din ecuațiile câmpului termic în condițiile de deplasare a sursei termice. Conform definiției energiei liniare la sudare, viteza de sudare influențează invers proporțional cantitatea de căldură introdusă în materialul de bază și implicit pătrunderea în materialul de bază:

$$E_l = \frac{U_{arc} \cdot I_{sudare}}{v_{sudare}} \quad [\text{J/cm}] \quad (3.2)$$

unde:

- E_l – energia liniară la sudare
- U_{arc} – tensiunea din coloana arcului electric
- I_{sudare} – curentul de sudare
- v_{sudare} – viteza de sudare

Așadar, atât pentru sursa termică fascicul laser, cât și pentru sursa termică arc electric, parametrii definatorii ai puterii proprii definesc în același sens și puterea de topire și cantitatea de metal topit și pătrunderea în materialul de bază. Considerând această influență pentru un material de bază dat, din ecuațiile câmpului termic rezultă o influență complex parabolică, ea fiind derulată în spațiu și nu după o anumită direcție.

În ambele situații, fasciculul laser și arcul electric (în cazul procedeelor de sudare WIG, MIG/MAG și cu plasmă) sunt însoțite de un gaz de protecție. Orientarea acestuia, dinspre sursa termică spre baia de metal, face ca presiunea pe care acesta o exercită asupra băii (presiune dată de presiunea și de debitul propriu al jetului de gaz de protecție) să aibă un efect benefic asupra pătrunderii. Modelarea matematică

a acestui efect este dificilă, fiind vorba despre deformarea unui volum de lichid neuniform compozițional și anizotrop. Experimental s-a observat însă faptul că influența (creșterea pătrunderii) nu este pregnantă, ea făcându-se simțită numai la variații mari ale debitului de gaz de protecție (creșteri cu 5-6 l/min ale debitului).

3.2.1.2 Influența condițiilor de operare și a parametrilor de sudare asupra stabilității procesului de sudare hibridă laser - WIG

Existența fascicului laser în imediata vecinătate sau chiar în contact cu arcul electric, introduce o influență pozitivă asupra stabilității generale a arcului WIG. Pentru a putea evidenția influența pozitivă a fascicului laser asupra stabilității arcului electric este necesară clarificarea unor aspecte legate de fizica interacțiunii dintre arc și fasciculul laser, aspecte evidențiate prin observări directe ale zonei de interacțiune:

- În condiții normale de operare arcul electric își selectează singur calea dintre electrod și piesă, cale care corespunde celei mai mici rezistențe electrice. Din acest motiv arcul WIG nu are o direcție stabilă, el modificându-și direcția după zonele cu conductibilitate electrică superioară. În cazul sudării hibride, arcul se manifestă mult mai stabil din punct de vedere al direcției de evoluție. Aceasta se explică prin absorbția de către arcul WIG a unei cantități, mai mare sau mai mică, din energia fascicului laser. Acest consum energetic conduce la deionizarea spațiului de arc și implicit la reducerea rezistenței electrice a coloanei arcului. [46]
- Datorită existenței aportului termic asigurat de către fasciculul laser suprafața piesei de sudat se vaporizează, vaporii de metal urcând prin coloana arcului. Atomii de metal prezintă o ionizare scăzută și se ionizează mult mai ușor decât atomii din gazul inert de protecție, ceea ce conduce la o conductivitate mărită, deci un canal de plasmă stabil. [46]
- Un arc este considerat instabil atunci când deviază necontrolat de la distanța cea mai mică dintre electrod și piesa care se sudează, efectul fiind o sudură neregulată ca formă și direcție. [46]

3.2.1.2.1 Influența fascicului laser la sudarea cu un curent de valori mici

În cazul sudării convenționale WIG pată anodică prezintă cu o oarecare instabilitate, arcul WIG deplasându-se necontrolat în timp ce capul de sudare își urmează mișcarea tehnologică după un traseu prestabilit, dat de specificația procedurii de sudare. În figura 3.9 este prezentat efectul introducerii fascicului laser în arcul WIG asupra stabilității arcului, stabilitate vizibilă prin forma sudurii. [46].

Condiții derulare experiment, conform [46]:Putere laser, $P_L = 500 \text{ W}$,Unghiul dintre electrod și capul de sudare cu fascicul laser, $\beta = 60^\circ$,

Polaritatea curentului la capul WIG: directă

Curentul de sudare, $I_s = 50 \text{ A}$ Viteza de sudare, $v_s = 4 \text{ mm/s}$,Gazul de protecție, Ar + 5 % H_2 ,

Material de bază, S 355

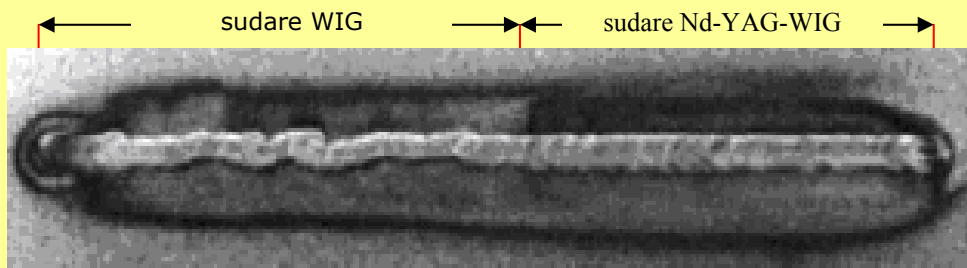


Fig. 3.9 Influența laserului asupra arcului WIG la sudarea cu un curent mai mic de 100 A [49]

Din figură se observă cum în zona de sudare prin procedeul convențional WIG cordonul de sudură este neregulat datorită faptului că spotul anodic este instabil și sare într-un mod imprevizibil. Experimentul a arătat faptul că la apariția fascicului laser, arcul devine stabil iar cordonul de sudură are un aspect normal.

3.2.1.2.2 Influența fascicului laser la sudarea în câmp magnetic asimetric

Tot [46] prezintă și rezultatele proprii în ceea ce privește influența fascicului laser la sudarea în câmp magnetic asimetric. În aceste condiții, în momentul pătrunderii arcului electric în zona cu câmp magnetic puternic, acesta va fi distorsionat devenind instabil și producând o baie de sudare neregulată (figura 3.10).

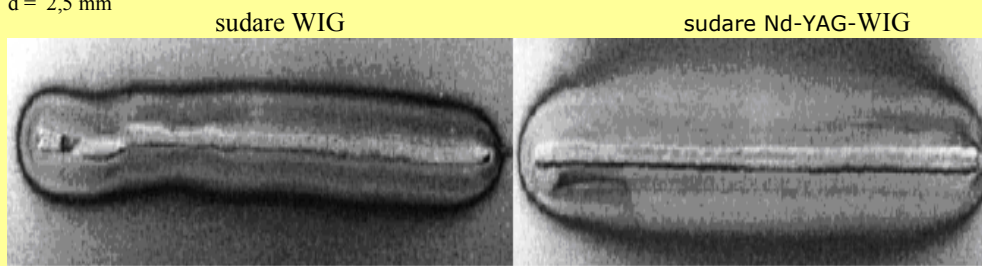
Condiții derulare experiment, conform [46]:Putere laser, $P_L = 500 \text{ W}$,Unghiul dintre electrod și capul de sudare cu fascicul laser, $\beta = 60^\circ$,

Polaritatea curentului la capul WIG: negativă

Curentul de sudare, $I_s = 110 \text{ A}$ $d = 2,5 \text{ mm}$ Viteza de sudare, $v_s = 8 \text{ mm/s}$,Gazul de protecție, Ar + 5 % H_2 ,

Material de bază, S 355

distanța dintre laser și arc



a.

b.

Fig. 3.10 Influența fascicului laser asupra arcului electric la sudarea în prezența unui câmp magnetic exterior asimetric a. influența materialului feromagnetic asupra stabilității arcului electric; b. stabilizarea arcului electric cu ajutorul fascicului laser [46]

Pentru obținerea unui câmp magnetic asimetric un material feromagnetic a fost poziționat la jumătatea distanței de pe ruta urmată în vederea sudării. Astfel s-a obținut un câmp magnetic superior în zona de mijloc față de extremitățile piesei de sudat. S-a constatat faptul că atunci când arcul electric trece prin dreptul materialului feromagnetic acesta nu rămâne în poziție verticală, ci tinde să aibă o deplasare către laterală ceea ce conduce la o sudură neregulată. [46]

3.2.1.2.3 Influența fascicului laser în obținerea efectului sinergic în cadrul procesului de sudare hibridă

Conform celor prezentate anterior, un aspect foarte important pentru care se preferă în prezent sudarea hibridă este tocmai faptul că fascicul laser stabilizează arcul electric. Mecanismul de stabilizare a arcului electric cu ajutorul fascicului laser constă în amplificarea proceselor de ionizare care au loc în coloana arcului WIG, amplificare datorată următoarelor fenomene fizice care se manifestă ca urmare a interacțiunii dintre fascicul laser și arcul WIG:

- Încălzirea directă a coloanei arcului cu ajutorul fascicului laser; [46]
- Modificarea compoziției materiei existente în plasma arcului, prin vaporizarea metalului de pe suprafața piesei care se sudează; acest fenomen are loc în zona de acțiune a laserului, zonă care se ionizează accelerat, ionii conținuți de vaporii de metal înlocuind ionii din gazul de protecție. Acest proces implică un consum redus de energie pentru menținerea arderii constante a arcului. [46]

Ambele situații prezentate mai sus conduc la următoarele efecte:

- are loc o creștere a conductibilității coloanei arcului WIG prin existența unui număr mare de ionii de metal; [46]
- are loc o îmbunătățire a stabilității coloanei arcului WIG care, astfel, reușește să se opună forțelor perturbatoare și fenomenului intrinsec de orientare după zonele cu rezistență electrică scăzută. [46]

3.2.2 Fizica sudării hibride laser – MIG/MAG

Sudarea hibridă laser – MIG se utilizează la realizarea de suduri cu pătrundere mare, unde este necesar aport de material pentru umplerea rostului de sudare, îmbinările fiind caracterizate și prin pătrunderi semnificative obținute la viteze de sudare comparative cu cele specifice sudării laser și chiar mai mari decât acestea. Viteza de sudare mare conduce la o încălzire mai mică a pieselor de sudat, comparativ cu sudarea MIG/MAG, pentru o putere echivalentă.

Specific acestei variante a procedurii hibrid laser-arc este faptul că cele două procese din componența sistemului hibrid pot fi cuplate împreună într-un singur proces caracterizat printr-o baie de sudură comună sau pot fi combinate pentru sudarea în serie. În cel de-al doilea caz însă efectul sinergic specific sudării hibride scade în intensitate până la dispariție, o dată cu creșterea distanței dintre cele două capete active componente ale sistemului hibrid. Literatura de specialitate oferă informații diferite cu privire la poziționarea relativă optimă dintre cele două capete, poziție care să conducă la obținerea unei pătrunderi superioare sau la o stabilizare îmbunătățită a procesului de sudare, etc. [57]

În continuare se vor prezenta principalele caracteristici ale sudării hibride laser-MIG/MAG.

3.2.2.1 Influența condițiilor și a parametrilor de sudare asupra pătrunderii în material

3.2.2.1.1 Influența vitezei de sudare asupra pătrunderii în material

Studiile efectuate pentru evidențierea influențelor asupra pătrunderii la sudarea hibridă laser – MAG, în condițiile specificate anterior, își propun să pună în evidență nivelurile maxime ale pătrunderii, compararea acestor valori cu cele specifice sudării convenționale cu fascicul laser și cu cele specifice sudării convenționale MIG/MAG, considerate separat.

Rezultatele experimentărilor de sudare descrise de literatura de specialitate [57] evidențiază și în cazul sudării hibride laser-MIG/MAG aceeași evoluție a curbei care descrie dependența dintre pătrunderea în materialul de bază și viteza de sudare (figura 3.11)

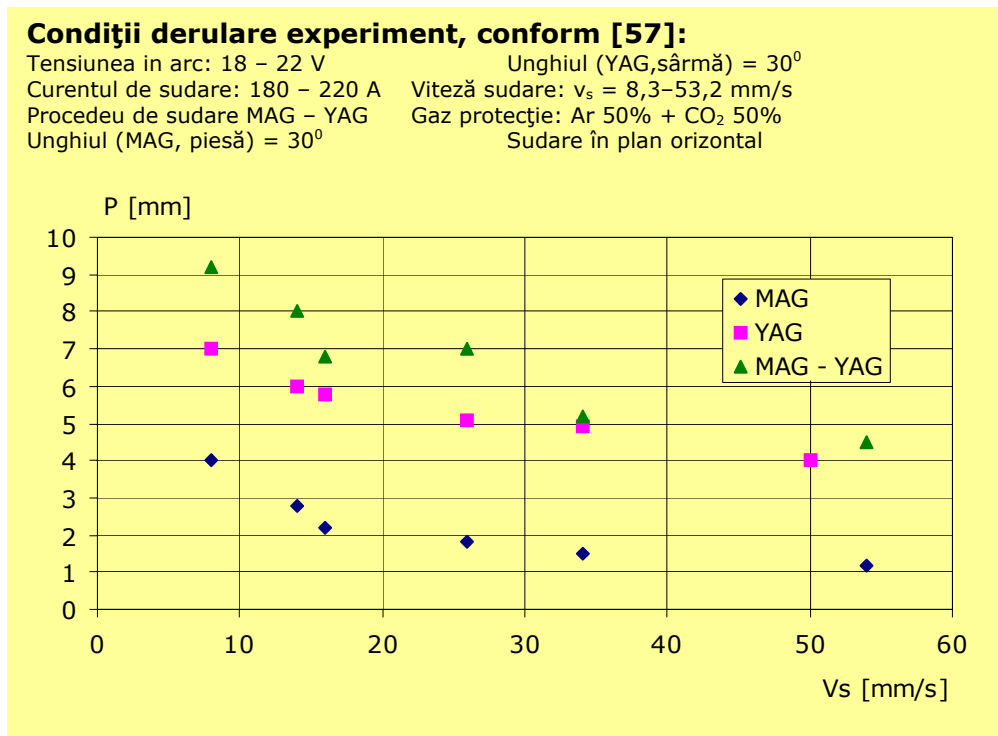


Fig. 3.11 Influența vitezei de sudare asupra pătrunderii în material [57]

Valorile prezentate grafic în figura 3.11 evidențiază faptul că pentru aceeași viteză de sudare pătrunderea realizată prin sudare hibridă este cu 20% mai mare decât cea realizată prin sudare laser. În același timp, autorii specifică faptul că o influență puternică a manifestat și unghiul dintre capul de sudare laser și capul MIG, nespecificând însă cantitativ această influență.

3.2.2.1.2 Influența poziției capului de sudare MIG/MAG față de fasciculul laser asupra pătrunderii în material

Influența poziției capului de sudare MIG/MAG față de fasciculul laser asupra pătrunderii în material a fost raportată sub aspectul influenței distanței dintre fasciculul laser și capul de sudare MIG/MAG. În figura 3.12 este prezentată variația pătrunderii în materialul de bază în funcție de distanța dintre cele două capete componente ale sistemului hibrid, conform raportării [57].

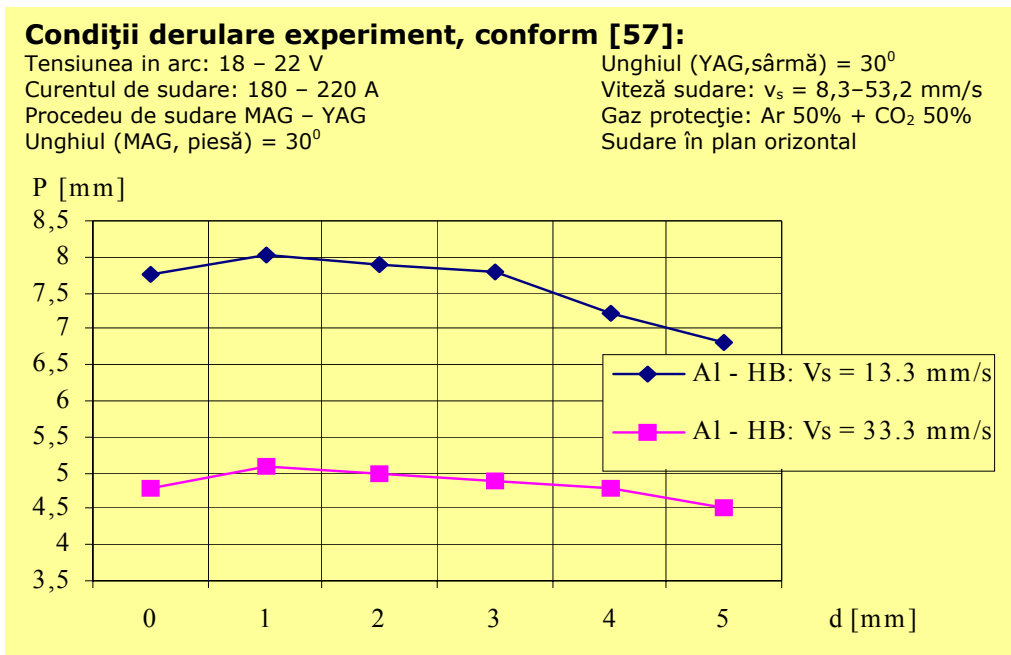


Fig. 3.12 Influența poziției relative a capului de sudare față de fasciculul laser [57]

Analizând curbele prezentate în figura 3.12 se concluzionează faptul că distanța dintre capul de sudare laser și capul de sudare MIG influențează pătrunderea în material, în sensul creșterii pătrunderii o dată cu scăderea distanței dintre cele două, maximul având loc pentru distanța $d = 1$ mm. Există însă situații în care distanța optimă dintre laser și arcul MIG se situează într-un interval mai larg cu ar fi 2-4 mm [99]

3.2.2.1.3 Influența procedurii conducător al procesului hibrid de sudare asupra pătrunderii în materialul de bază

În paragraf este prezentată influența procedurii conducător al procesului hibrid de sudare asupra pătrunderii în materialul de bază. În figura 3.13 este prezentată dependența pătrunderii în material în condițiile de sudare următoare. [56]

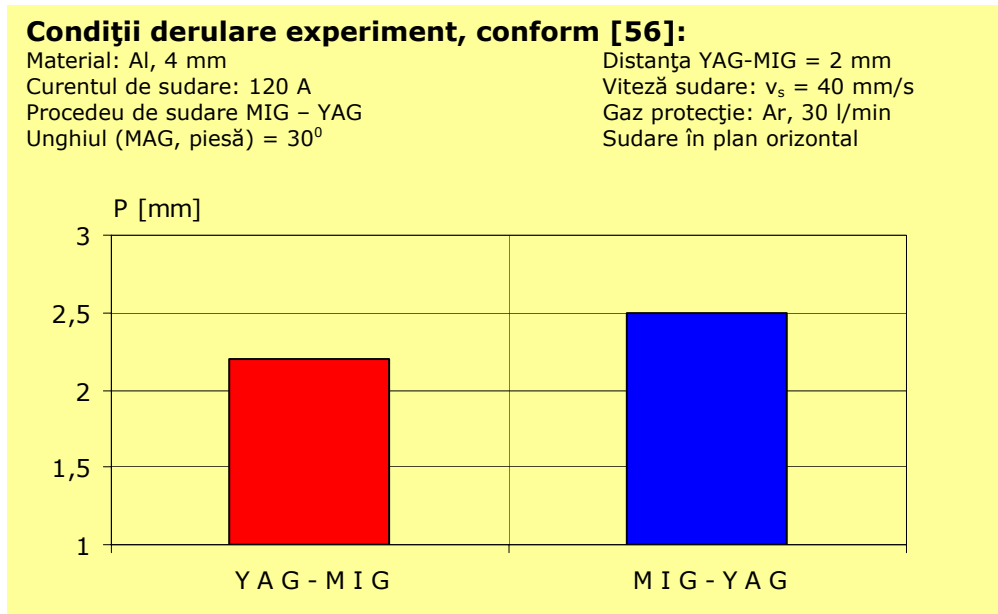


Fig. 3.13 Influența procedurii conducător asupra pătrunderii în material [56]

Se observă din figura 3.13 faptul că pătrunderea în materialul de bază este cu cca 12% mai mare în condițiile în care procedeul conducător este procedeul MIG față de cazul în care procedeul conducător este procedeul laser.

3.2.2.2 Influența condițiilor și a parametrilor de sudare asupra geometriei și calității sudurilor

3.2.2.2.1 Influența procedurii conducător asupra geometriei sudurii

Raportări ale influențelor diversilor parametri de proces sau de sistem asupra geometriei sudurii sunt prezentate relativ des în literatura de specialitate [56]. Toate lucrările raportează o deschidere mai mare a rostului sudurii în cazul în care conducător este procedeul de sudare cu laser. În același timp, din punct de vedere al calității sudurilor, un consens în raportări este deținut de posibilitatea relativ ridicată de a obține pori în metalul sudurii în cazul în care conducător este același procedeu: procedeul de sudare cu fascicul laser. În figura 3.14 sunt prezentate unele rezultate din literatura de specialitate.[56]

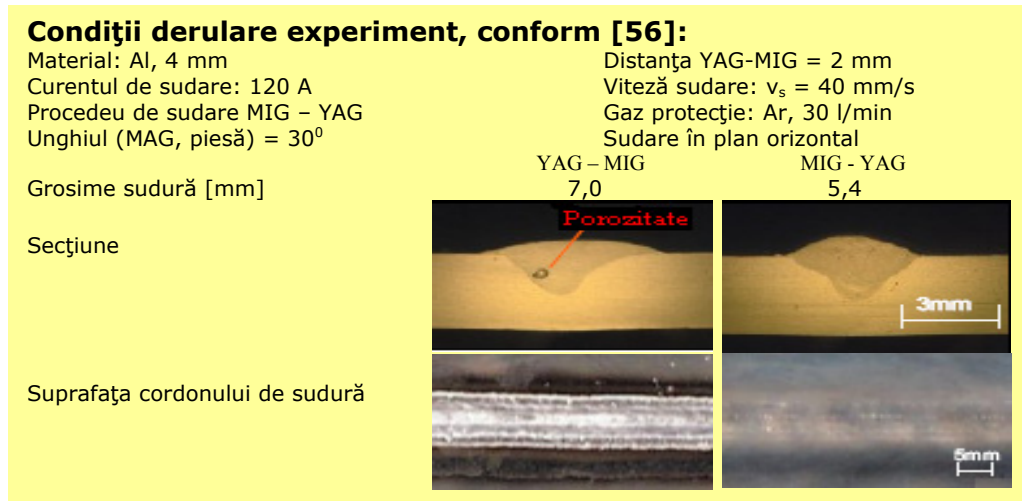


Fig. 3.14 Influența procedului asupra aspectului sudurii [56]

Din figura 3.14 rezultă următorul aspect demn de relevat:

- cordonul de sudare este mai îngust în cazul în care procesul de sudare hibrid este condus de procedeul MIG (sudare hibridă MIG – YAG)

3.2.2.2 Influența puterii fasciculului laser asupra geometriei sudurii

Puterea fasciculului laser din ansamblul hibrid de sudare influențează, pe lângă stabilizarea procesului prin încălzirea suplimentară a coloanei arcului, și aspectul și geometria sudurii. În figura 3.15 este prezentată această influență. [132]

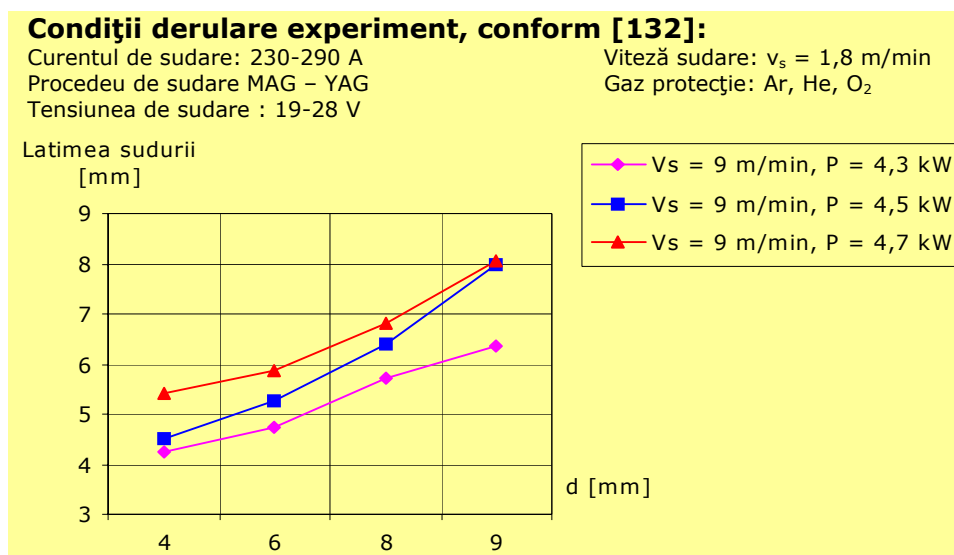


Fig. 3.15 Influența puterii laserului asupra geometriei sudurii [132]

Suprafața sudurii realizate prin sudare hibridă laser-arc este, în general, netedă, asemănătoare celei realizate prin procedeul convențional de sudare cu fascicul laser. Cu cât puterea laserului este mai mare cu atât suprafața este mai netedă.

3.2.2.3 Caracteristicile mecanice ale îmbinărilor sudate

Principalele aplicații ale sudării hibride, în prezent, sunt legate de construcțiile navale. Aici fiind vorba despre îmbinări lungi și relativ groase, sudarea hibridă a putut să își pună în evidență principalele avantaje. Interesați în obținerea unor îmbinări cu calități superioare celor precedente, realizate prin procedeele de sudare MIG/MAG, sub strat de flux sau cu electrozi înveliți, specialiștii în sistemele de sudare au efectuat comparații ale caracteristicilor mecanice ale îmbinărilor realizate prin aceste procedee cu cele ale îmbinărilor realizate prin sudare hibridă laser-arc. În tabelul 3.5 sunt prezentate rezultatele unui astfel de studiu, materialul de bază fiind, bineînțeles, un oțel pentru construcții navale. [53]

Tabel 3.5 Studiu comparativ privind duritatea materialului sudurii și al zonei influențate termic pentru mai multe procedee de sudare [53]

Parametrii de sudare				
Procedeu de sudare		LASER	LASER-ARC	ARC-LASER
Viteza de sudare v_s [m/min]		1	1.4	1.5
Putere LASER P_L [kW]		11	14	10
Curent de sudare I_s [A]		0	193	420
Tensiunea de sudare U_s [V]		0	21.4	40.6
Viteza de avans a sârmei v_{as} [m/min]		0	6.9	16.2
Duritatea îmbinării sudate [HV5]				
Procedeu sudare	Sub strat de flux	Laser	Laser-arc	Arc-laser
Sudura				
Maxim	188	255	231	248
Bază	175	238	219	234
Zona afectată termic ZIT				
Maxim	173	241	215	248
Vârf: Bază	165	228	207	222
Bază: Bază	157	202	187	179

Vârful valoric al durității obținute în îmbinarea sudată este de 231 HV5, iar pentru zona influențată termic s-a obținut 215 HV5, aceste valori fiind caracteristice sudării hibride laser-arc ele fiind mai mici decât cele obținute la sudarea cu laser spre exemplu unde valorile se ridică la 255 HV5 pentru îmbinarea sudată și la 241 HV5 pentru zona influențată termic.

Viteza de sudare este un parametru care influențează procesul de sudare hibrid atât în ceea ce privește stabilitatea acestuia cât și în ceea ce privește pătrunderea în materialul de bază și calitatea îmbinărilor sudate. În figura 3.16 este prezentată influența vitezei de sudare asupra durității îmbinării sudate la sudare hibridă YAG-MAG fără preîncălzire, respectiv cu preîncălzire pentru diferite temperaturi de preîncălzire. [63]

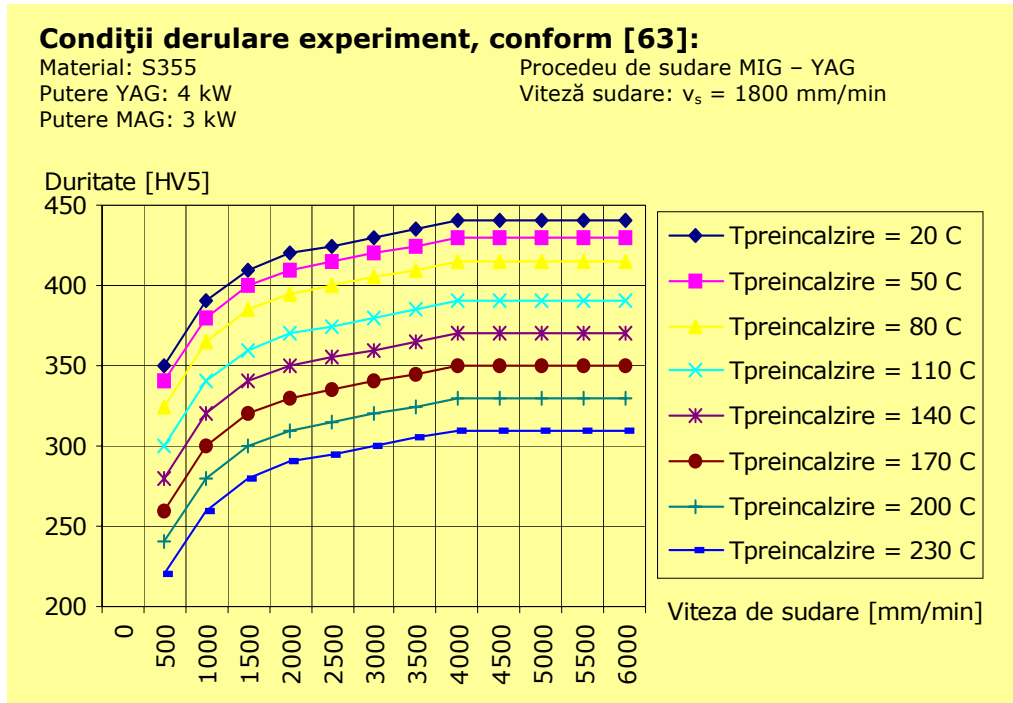


Fig. 3.16 Dependența durtății de viteza de sudare la sudarea hibridă laser-arc

Se observă în figura 3.15 faptul că, la fel ca și în cazul altor procedee de sudare prin topire, efectuarea unei preîncălziri reduce durtatea materialului sudurii prin reducerea vitezei de răcire. În același timp, creșterea vitezei de sudare, în contrabalansare cu efectul introdus de preîncălzire, introduce un efect invers, în sensul creșterii durtății. Acest lucru este datorat aportului termic inferior datorat vitezelor mari de sudare. [63]

3.2.2.4 Influența parametrilor de sudare asupra stabilității procesului de sudare hibridă laser – MIG/MAG

Cunoașterea influențelor pe care fasciculul laser le exercită asupra procesului de sudare, asupra stabilității arcului MIG/MAG, asupra calității sudurii și asupra cantității de căldură introdusă în piesele de sudat este esențială pentru stabilirea regimurilor de sudare.

3.2.2.4.1 Influența puterii laserului asupra scurtcircuitelor

Experimentările de sudare efectuate de diverși autori au evidențiat modificări ale scurtcircuitărilor specifice sudării MAG în regim de scurtcircuit, la trecerea de la sudarea MAG convențional la sudarea hibridă. Rezultatele raportate ale unui astfel de experiment sunt prezentate în figura 3.17. [124]

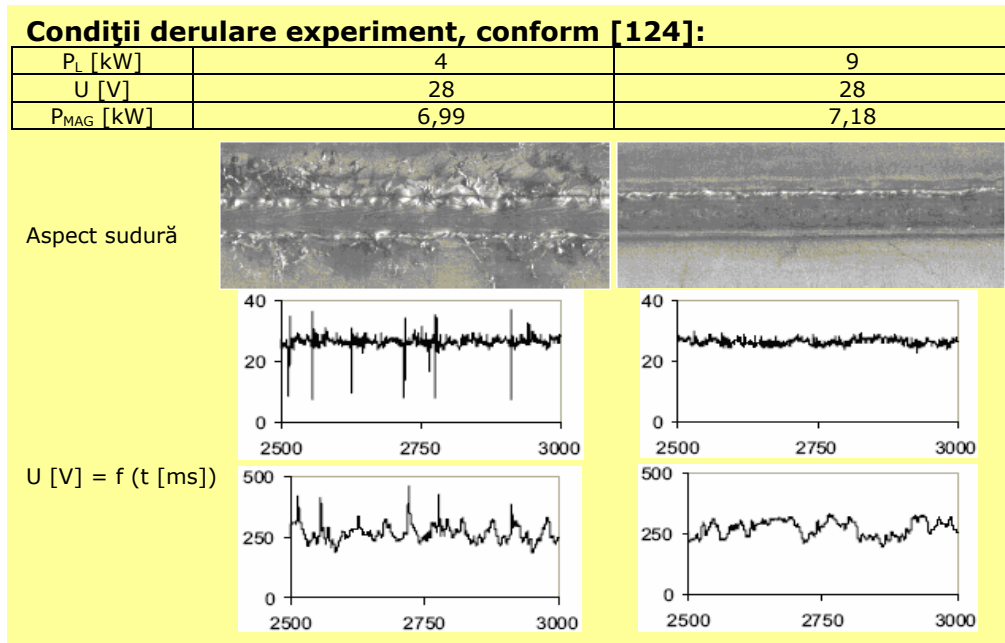


Fig. 3.17 Influența puterii laserului asupra scurtcircuitelor

În figura 3.17 se observă faptul că pentru un laser cu puterea de 9 kW, procesul este mai stabil și de asemenea calitatea sudurii este mai bună decât în cazul laserului cu puterea de 4 kW. Creșterea puterii laserului și a puterii arcului MAG scade numărul de scurtcircuite ceea ce are o mare influență asupra modului de transfer.

3.2.2.4.2 Influența puterii laserului asupra stabilității petei catodice

Modul în care poate fi controlat transferul de material la sudarea hibridă laser – MAG și anume în ce mod influențează fasciculul laser transferul de metal prin arcul MAG a fost raportat de [110], care, a realizat un experiment constând în obținerea unei descărcări electrice între o sârmă de titan (anod) și o placă de titan (catod). Fluctuația petei catodice a fost înregistrată video, secvențe ale înregistrării fiind prezentate în figura 3.18.

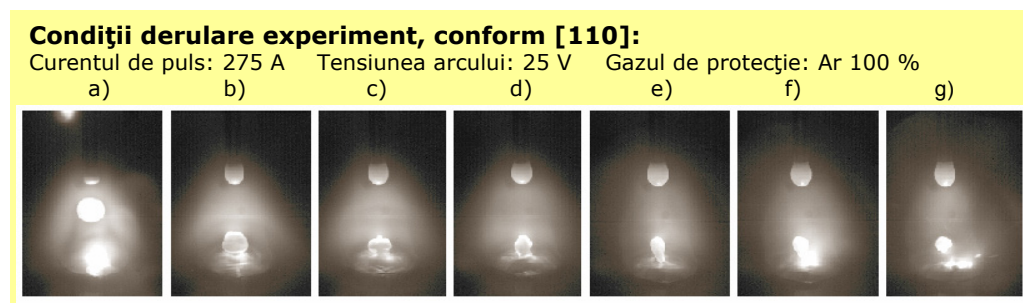


Fig. 3.18 Deviația petei catodice

Înregistrările video au evidențiat următoarele:

- un spot catodic a fost observat că formează în partea superioară a metalului picături de material și acestea reprezintă prima sursă de stropire din procesul de sudare;
- arcul va fi forțat să curgă prin intermediul picăturii ceea ce conduce la apariția unor forțe electromagnetice interioare picăturii;
- în figura e) și f) se constată o puternică deformare a învelișului picăturii datorită unei gâtuirii și o componentă a forței magnetice va fi direcționată spre partea superioară absolut perpendicular deoarece forța este perpendiculară pe toate punctele din plan;
- în figura g) se constată că direcția de deplasare a picăturii este schimbată, ea orientându-se către suprafața băii de sudare.
- estimarea conform literaturii de specialitate [110] este că în acest caz aproximativ 20 % din volumul picăturii este pierdut sub formă de stropire.
- s-a constatat deasemenea faptul că apare o modificare a poziției catodului față de suprafața băii de sudare, rezultatul fiind evident apariția unor suduri neregulate.

Introducerea fasciculului laser produce efecte pozitiv asupra acestor fenomene, în sensul că stabilizează pata catodică. Influența fasciculului laser asupra stabilității petei catodice este evidențiată în figura 3.19.



Fig. 3.19 Stabilizarea petei catodice sub acțiunea laserului [110]

3.2.2.4.3 Influența radiației laserului asupra reducerii tensiunii din arc

Influența radiației laser asupra arcului electric se reflectă și prin scăderea tensiunii din arc. Dacă în condițiile unei unde de curent pulsant cu pragul menținut constant la 40 A, în lipsa laserului, se constată o valoare a tensiunii din arc de aproximativ 22,5 V, în urma introducerii fasciculului laser prin arc sau chiar tangent arcului tensiunea acestuia din urmă scade considerabil și urmează un curs stabil așa cum reiese din figura 3.20.

Condiții derulare experiment, conform [110]:

Curentul de puls: 275 A Tensiunea arcului: 25 V Gazul de protecție: Ar 100 %

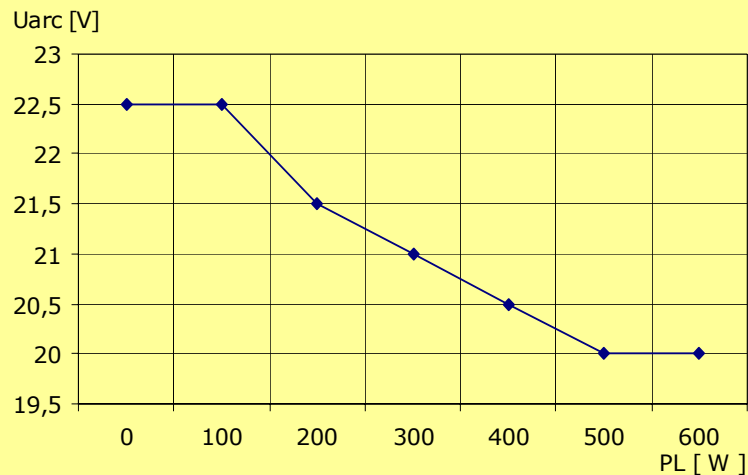


Fig. 3.20 Influența radiației laser asupra tensiunii din arc

3.3 Stabilirea parametrilor pentru a căror monitorizare se vor elabora senzorii nanostructurați

Conform celor prezentate anterior există două tipuri de parametri care influențează stabilitatea procesului de sudare hibridă și caracteristicile sudurilor realizate prin acest procedeu:

- parametri de sistem – parametri care definesc geometria sistemului de sudare hibridă;
- parametri de proces – parametri strict definitorii pentru procesul de sudare hibridă.

Parametrii de sistem care au manifestat influențe sensibile în cadrul procesului de sudare sunt:

- unghiul dintre capul de sudare cu fascicul laser și capul de sudare cu arc electric, β ;
- distanța dintre vârful electrodului de wolfram și fasciculul laser, d ;

Parametrii de proces care au manifestat influențe sensibile în cadrul procesului de sudare sunt:

- curentul prin arcul de sudare WIG, I_s ;
- puterea fasciculului laser, P_L ;
- viteza de sudare, v_s ;
- tensiunea arcului, U_a ;
- debitul gazului de protecție, D_g .

Calitativ, aranjând acești parametri în ordinea gradului de influențare pe care îl exercită, se creează o imagine relativ clară asupra fenomenelor care se derulează în timpul procesului. În același timp, se primesc informații cu privire la punctele în care ar trebui acționat, astfel încât prin intervenții relativ reduse să rezulte efecte ample asupra stabilității procesului de sudare și asupra caracteristicilor îmbinărilor sudate.

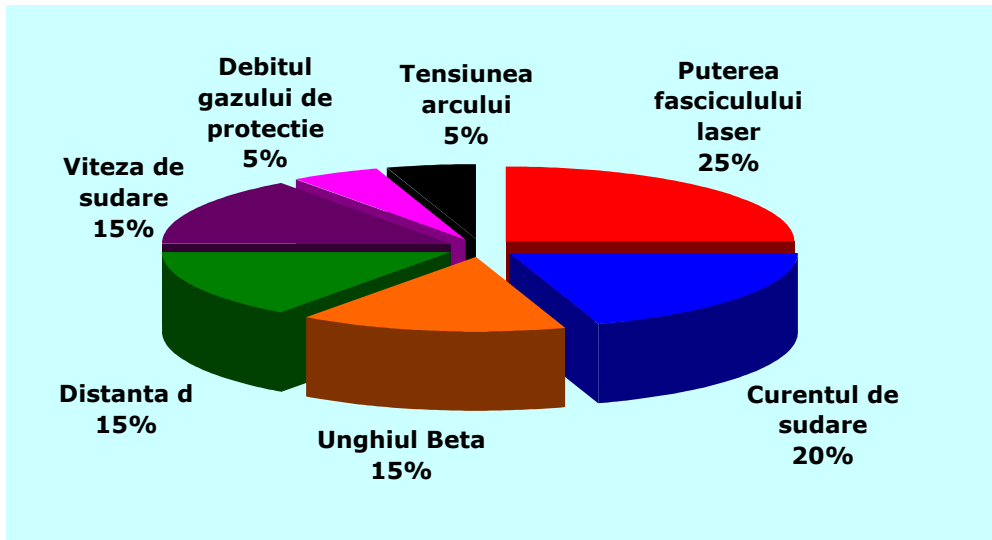


Fig. 3.21 Nivelurile aproximative ale influențelor manifestate în timpul procesului de sudare

Conform principiul legii 80/20 a economistului italian Vilfredo Pareto, acționând asupra primilor 20% dintre factori se pot face corecții ample ale procesului de sudare.

Singuri parametrii „puterea fasciculului laser” și „curentul de sudare WIG” asigură presiuni asupra sistemului de cel puțin 20%.

Din cei 7 factori de influență 20% înseamnă 1,4 factori. Mărin­d câmpul de acțiune se pot accepta 2 factori de influență asupra cărora, dacă se introduc modificări forțate, se poate interveni cu modificări ale procesului de sudare care să efectueze corecții într-un volum de aproximativ 80%.

Monitorizarea și corectarea valorilor primilor doi factori de influență va conduce așadar la o corectare amplă a procesului. Pentru acești doi parametri, care se dovedesc a fi parametri de proces, ar trebui să se elaboreze senzori pentru monitorizare.

Urmărind evoluția pieței senzorilor pentru sisteme de proces, se constată următoarele:

- există elaborate sisteme de tip wattmetru pentru surse laser, funcționând în baza unor senzori optici cu un design extrem de complex. Cunoștințele existente cu privire la utilizarea de materiale nanostructurate în procese de sesizare nu evidențiază caracteristici ale materialelor cunoscute până în prezent pentru realizarea de astfel de senzori;
- senzori de curent există dezvoltați în număr foarte mare și funcționând după diverse principii. În plus, costurile lor sunt relativ scăzute și introducerea de noi senzori nanostructurați nu ar putea asigura costuri de fabricație mai mici decât cele existente.
- în ambele situații nu se necesită precizii și viteze de lucru ridicate ale senzorilor. Cum acestea sunt avantajele principale ale senzorilor nanostructurați, nu se justifică introducerea de noi senzori, de tip nanostructurat pentru monitorizarea celor doi parametri.

Acestea fiind considerațiile legate de monitorizarea primilor 2 parametri, se propune aceeași analiză pentru următorii factori de influență.

Unghiul β dintre cele două capete de sudare componente ale sistemului hibrid, împreună cu distanța dintre acestea, d , au dovedit o forță de influență semnificativă asupra pătrunderii și asupra stabilizării arcului WIG.

Pentru unghiul β se propune proiectarea și realizarea unui senzor de tip inclinometru. Materialul nanostructurat care ar putea fi utilizat la confecționarea acestui tip de senzor este fluidul inteligent cu comportare magnetică, cunoscut și sub numele de lichid magnetic.

Distanța d este un parametru a cărui determinare este posibilă prin contact direct între senzor și fiecare dintre cele două componente ale sistemului hibrid. Există și două situații în care nu este necesar contact direct și anume cazul senzorilor optici și cazul senzorilor magnetici. Din nefericire ambele tipuri de senzori vor fi bruiți de către funcționarea sistemului hibrid: câmpul magnetic din jurul capului de sudare cu arc va brui orice senzor magnetic se montează în imediata sa vecinătate, iar lumina emisă de arcul electric, acoperind un spectru larg de frecvențe va brui senzorii optici care se montează în apropierea arcului electric. Așadar, numai senzorii de contact sunt fezabili pentru monitorizarea acestei mărimi. Din acest motiv nu se vor proiecta senzori pentru această mărime.

Viteza de sudare, v_s , influențează caracteristicile geometrico-dimensionale ale sudurilor. Potențialul său de influență este relativ ridicat. Chiar dacă există sisteme senzoriale pentru determinarea vitezei, se propune proiectarea și realizarea unui senzor nanostructurat pentru monitorizarea acestui parametru. Costul lui poate să nu depășească costurile senzorilor uzuali, deci proiectarea este fezabilă.

Cum sistemele hibride de sudare funcționează numai în regim mecanizat, automatizarea procesului este una dintre dezideratele cercetătorilor. Se propune așadar participarea la această muncă de asigurare a tuturor condițiilor necesare a fi îndeplinite pentru realizarea automatizării, prin propunerea unui senzor care să determine starea de mișcare a sistemului hibrid. Senzorul are rolul de a determina momentul pornirii tractorului de sudare care transportă sistemul hibrid de sudare.

4. Nano- și microfluide inteligente pentru senzori

4.1 Structura și proprietățile fluidelor inteligente cu comportare magnetică

4.1.1 Structura fluidelor inteligente cu comportare magnetică

Conceptul de dispozitive și tehnologii inteligente este în strânsă legătură cu cel de "smart materials". Suspensiile magnetoreologice (MRSs), fluidele electrorologice (ERFs) și elastomerii, aliajele cu memorie a formei (SMA) și piezoelectricii sunt materiale cu proprietăți fizice comandabile. Funcția lor de răspuns (de tip mecanic, electric sau combinații ale acestora) este dependentă de acțiunea unui câmp (magnetic, electric sau combinații ale acestora – după cum materialul are proprietăți electrice, magnetice sau combinații ale acestora).

MRSs sunt o clasă de materiale a căror proprietăți reologice [113,114,20], electrice [6,7,4,5,14,15,17,12,13] și termice [12] se modifică în câmp magnetic exterior. Modificările au loc aproape instantaneu și sunt dependente de intensitatea câmpului magnetic aplicat și fracția volumică a fazei magnetizabile.

Producerea de MRSs cu proprietăți fizice remarcabile [24] face posibilă realizarea de dispozitive și tehnologii inteligente. Bogatele și diversele realizări în domeniu [36] necesită o sistematizare a principalelor comunicări privind dispozitive și tehnologii ce au la bază MRSs.

Urmare acestor considerații, în cele ce urmează se vor prezenta producerea de suspensii magnetoreologice, dispozitive și tehnologii cu suspensii magnetoreologice.

Fluidele inteligente cu comportare magnetică sau ferrofluidele sunt suspensii coloidale ultrasensibile cu proprietăți magnetice. Ele au trei componente principale:

- Lichid de bază (în principiu orice lichid)
- Particule magnetice ultrafine (de regula Fe_3O_4 , Fe sau Co)
- Stabilizant care este o substanță tensoactivă cu lanț lung ce acoperă fiecare particulă cu un strat monomolecular)

Datorită dimensiunii foarte reduse a particulelor magnetice (3 – 20 nm), a densității mari de particule coloidale ($10^{23}/\text{cm}^3$) și a stratului stabilizant solubil în lichidul de bază, particulele se integrează practic în structura lichidului fapt ce conferă proprietățile unui „fluid inteligent cu comportare magnetică” chiar și în prezența unui câmp magnetic puternic și neuniform, cu acțiune destabilizantă asupra oricărei suspensii obișnuite.

În funcție de natura lichidului de bază și a solidului magnetic disparat au fost elaborate numeroase procedee de obținere. Primele lichide magnetice s-au realizat prin măcinarea umedă timp îndelungat (peste 1000 ore) a magnetitei, metodă aplicată pe scară largă, în special de firma americană *Ferofluidics*. Ulterior s-a

răspândit metoda precipitării chimice, mult mai eficientă, care permite obținerea unei game largi de fluide magnetice la prețuri accesibile.

Fluidele inteligente cu comportare magnetică, figura 4.1, conțin particule magnetice cu un diametru mediu de aproximativ 10 nm în lichide cu vâscozitate ridicată. Particulele prezintă un singur domeniu magnetic, motiv pentru care ele pot fi considerate ca fiind mici magneți permanenți, agitați termic într-un lichid purtător. Principala caracteristică a ferofluidelor este combinația dintre comportarea normală a lichidului și proprietățile super-paramagnetice induse de particulele magnetice din structură. Aceasta permite utilizarea forțelor magnetice pentru controlarea proprietăților și a curgerii lichidului, fapt care deschide largi posibilități de aplicare a acestor materiale nanostructurate.

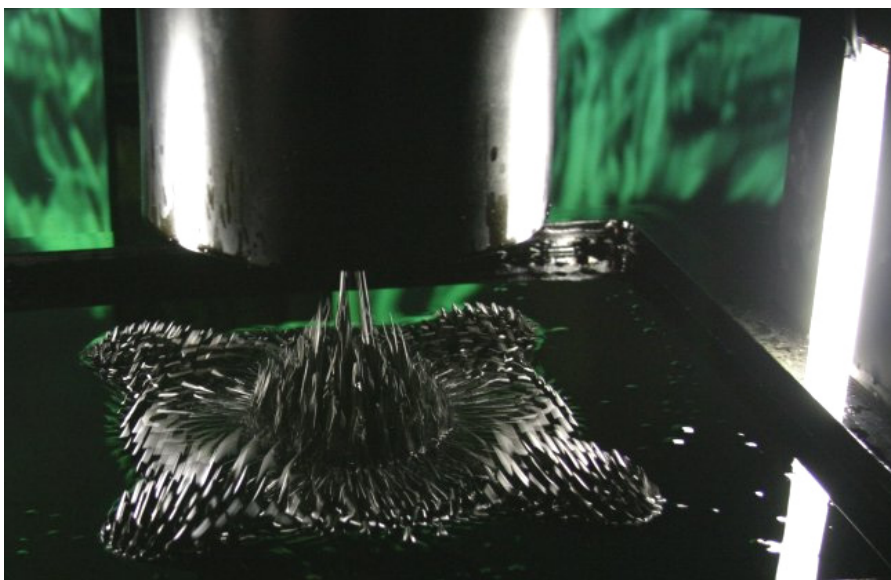


Fig. 4.1 Nanofluid magnetic

Din moment ce forța magnetică ce acționează în interiorul lichidului este proporțională cu magnetizarea lichidului, înseamnă că se pot obține forțe magnetice în interiorul lichidului având valori mari și pentru câmpuri magnetice cu intensități relativ mici.

Prepararea de MRSs prin metoda amestecului mecanic [75] este realizată având la bază microparticulele de Fe-Co, Fe-Ni și $\text{Fe}_2(\text{CO})_9$ dispersate într-o soluție de ulei silonic cu acid stearic. MRSs astfel obținute nu sunt stabile în timp.

Dispersarea fazei magnetizabile [79] se realizează prin agitarea amestecului format din matricea lichidă și microparticule. Pentru menținerea dispersiei se utilizează nanoparticule [75] de Fe_3O_4 , particule submicronice de organo-clay [70], microsferă de polystiren-acetoncetoxietil-metacrilat [23] cu nanoparticule de Fe_3O_4 , stabilizare electrostatică [131] și respectiv prin utilizarea de matrici lichide cu valori mari ale vâscozității [6,7,84] etc.

Aditivii [75,70,23,131,101] împreună cu microparticulele magnetizabile formează structuri stabile în volumul lichidului de bază. De exemplu [139] utilizând guax-gum se generează în uleiul silonic structuri de tip celulă. În fiecare celulă

este prinsă o microparticulă de fier. Structura celulară creată are un înalt grad de elasticitate.

La aplicarea câmpului magnetic, microparticulele de fier se aliniază în direcția liniilor de câmp iar celulele se deformează. Celulele cu microparticulele de fier revin la starea inițială la anularea câmpului magnetic.

Studiile efectuate [139] de Wu și colaboratorii arată că rata de sedimentare a fazei solide este de 2-3 % într-un interval de trei luni.

Utilizarea de matrici lichide cu densități ρ_{lm} apropiate de cele ale microparticulelor magnetizabile ρ_s , conduc la o bună stabilitate a MRSs.

Timpul de sedimentare [139] a fazei solide este dat de relația 4.1:

$$t_{sed} \cong \frac{3d \cdot \xi}{4\pi \cdot a^3 \cdot (\rho_{lm} - \rho_s) \cdot g} \rightarrow \infty \quad (4.1)$$

unde

- d – distanța,
- a – este raza medie a microparticulelor magnetizabile,
- g – accelerația gravitațională,
- ξ – este coeficientul de frecare.

Bednarek [6,7,4,5] utilizează ca lichid de bază rășini epoxidice în care dispersează mecanic particule de grafit cu dimensiuni ce nu depășesc 0,5 μm . Obține o matrice lichidă vâscoasă și electroconductoare. Particule din fier-siliciu, obținute prin măcinarea tolelor de transformator, sunt introduse în matricea lichidă. Se obține un amestec cu proprietăți electroconductoare și stabil în timp.

4.1.1.1 Stabilizarea particulelor magnetice

Asupra particulelor coloidale dintr-un fluid inteligent cu comportare magnetică acționează forțele de respingere:

- electrostatică;
- sterică;

respectiv forțele de atracție:

- Van der Waals
- magnetică.

Pentru a obține lichidul magnetic stabil este necesar a se realiza un echilibru dinamic între aceste tipuri de forțe. Stabilitatea unui fluid magnetic este asigurată de dimensiunea redusă a particulelor magnetice dispersate în lichidul de bază, deoarece mișcarea browniană se opune eficient tendinței de aglomerare și de sedimentare a particulelor. Aglomerările sunt rezultatul interacțiunilor magnetice dintre particule, iar sedimentarea este favorizată de câmpul gravitațional sau de acțiunea câmpurilor magnetice puternice și neuniforme. [10]

Menținerea stabilității în aceste condiții se realizează prin stabilizarea sterică (în medii organice), electrostatică (în medii apos) sau prin inhibarea creșterii difuze a particulelor cu diferite adaosuri metalice (în mercur).

Îndeplinirea condițiilor amintite, realizarea de particule magnetice ultrafine și acoperirea acestora cu stratul stabilizant, face procesul de obținere a fluidelor magnetice complex și dificil, astfel că, deocamdată, ele sunt produse în cantități specifice comercializării de numai un număr limitat de producători, prețurile fiind din acest motiv relativ ridicate.

4.1.1.2 Interacțiunea electrostatică

Interacțiunea electrostatică joacă un rol esențial în obținerea fluidelor inteligente cu comportare magnetică pe bază de apă și respectiv prin metoda coprecipitării ionilor metalici: Fe^{2+} în Fe^{3+} , CO^{2+} cu Fe^{3+} , Ni^{2+} cu Fe^{3+} și altele până la realizarea chemosorbției stabilizantului pe particula metalică. Obținerea particulelor coloidale în soluții apoase este indisolubil legată de existența stratului electric dublu în apropierea suprafeței lor. Absorbția ionilor din soluție este principala cale de formare a stratului electric dublu.

4.1.1.3 Interacțiunea sterică

Interacțiunea sterică între particulele coloidale apare atunci când pe suprafața acestora se absorb lanțuri de polimeri, ale căror grupări sunt, de asemenea, absorbite pe suprafața particulei. Interpunerea între particule a acestor lanțuri de molecule liniare sau polimeri, conduce la sporirea fenomenului de aglomerare, sistemul de particule coloidale devenind stabil.

4.1.1.4 Interacțiunea Van der Waals

Interacțiunile Van der Waals dintre molecule sunt de 3 tipuri:

- Interacțiuni dipol – dipol;
- Interacțiuni dipol – dipol indus;
- Interacțiuni de dispersie.

Interacțiunile de dispersie sunt datorate interacțiunii electronilor din orbitalii unei molecule și dipolii oscilanți induși de ei în altă moleculă. Aceste forțe sunt de „rază scurtă de acțiune”.

4.1.1.5 Interacțiunea magnetică

Densitatea de particule într-un fluid inteligent cu comportare magnetică este de ordinul 10^{23} particule/ m^3 . În situația în care aceste particule ar ajunge în contact, ele s-ar aglomera. Energia de interacțiune dipol – dipol scade cu distanța dintre particule și cu diametrul particulelor magnetice.

4.1.1.6 Sedimentarea gravitațională

Particulele coloidale tind să se sedimenteze gravitațional. Matematic, aglomerarea de particule într-un anumit punct al fluidului, este exprimabilă prin nivelul concentrației de particule coloidale în punctul respectiv. Acest parametru [10] variază cu înălțimea h a coloanei de lichid care conține punctul în care se face analiza, după relația 4.2:

$$c(h) = c_0 \cdot e^{\left[-\frac{4}{3} \pi \cdot r^3 \cdot (\rho - \rho_0) \frac{g \cdot h}{k \cdot T} \right]} \quad (4.2)$$

unde:

- $c(h)$ – concentrația de particule la înălțimea h a coloanei de lichid;
- c_0 – concentrația inițială de particule;

- ρ_0, ρ – densitatea inițială și finală la înălțimea h a lichidului cu particule coloidale;
- h – înălțimea lichidului cu particule coloidale;
- k – constanta lui Boltzman;
- T – temperatura;
- r – raza particulelor coloidale;
- g – accelerația gravitațională.

Într-un fluid inteligent cu comportare magnetică având particule cu diametrul $d = 10$ nm, dispersate în apă, concentrația lichidului scade la c/e , pentru $h = 15$ cm.

Viteza v de sedimentare a particulelor [10] se poate calcula iterativ cu ajutorul relației 4.3:

$$\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 \cdot (\rho - \rho_0) \cdot g - 6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot (r + \delta) \cdot v \quad (4.3)$$

unde:

- η – vâscozitatea lichidului;
- r – raza particulelor;
- δ – grosimea stratului stabilizant;
- v – viteza de sedimentare a particulelor;
- ρ_0, ρ – densitatea inițială și finală la înălțimea h a lichidului cu particule coloidale.

Pentru $\delta = 0$, viteza calculată din relația de mai sus este: $v = 20$ $\mu\text{m}/\text{zi}$.

4.1.1.7 Sedimentarea magnetică

Într-un gradient de câmp magnetic, asupra particulelor acționează forța de translație [10]:

$$\vec{F} = (\vec{m} \cdot \nabla) \cdot \vec{H} \quad (4.4)$$

unde:

- \vec{m} – vectorul moment magnetic;
- \vec{H} – vectorul câmp magnetic.

Dacă există o orientare a câmpului magnetic aflat în acțiune în direcția axei Ox , atunci:

$$F_x = m \cdot \frac{dH}{dx} \quad (4.5)$$

Deplasării particulei magnetice i se opune forța de frecare:

$$F_c = 6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r \cdot v \quad (4.6)$$

unde:

- η – vâscozitatea dinamică lichidului;
- r – raza particulei;
- v – viteza particulei.

La echilibru dinamic din relațiile de mai sus, viteza v de deplasare a particulei devine:

$$v = \frac{m}{6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r} \cdot \frac{dH}{dr} = \frac{Md^2}{18 \cdot \eta} \cdot \frac{dH}{dx} \quad (4.7)$$

unde:

- M – magnetizația particulei magnetice;
- d – diametrul particulei magnetice;
- η – vâscozitatea dinamică a lichidului magnetic;
- $\frac{dH}{dx}$ – gradientul câmpului magnetic.

În multe aplicații, fluidele inteligente cu comportare magnetică sunt supuse la gradienti de câmp magnetic mari. De exemplu: într-un gradient de câmp magnetic de ($10^8 \dots 10^9$), viteza v de deplasare a particulelor magnetice este de: $v = 5$ mm/zi. Concluzia este că, în aplicații practice, efectul de sedimentare magnetică a particulelor nu poate avea loc.

4.1.2 Particule magnetizabile din structura fluidelor inteligente cu comportare magnetică și influența lor asupra proprietăților acestora

Particulele magnetizabile [107] utilizabile la elaborarea de fluide inteligente cu comportare magnetică pot fi de mai multe tipuri, din punct de vedere al naturii. Două dintre cele mai utilizate tipuri sunt:

- nanocompozitele pe bază de Fe sau Fe_2O_3 ;
- feritele de bariu dure de tip W ($BaFe_{19}O_{27}$).

Fiecare dintre acestea se pot constitui relativ ușor în materiale pulverulente având comportări magnetice favorabile unei funcționări corespunzătoare în componența unui fluid inteligent magnetizabil. Producerea acestor pulberi magnetice cu dimensiuni nano- și micrometrice prezintă atât o importanță științifică cât și una aplicativă. Interesul științific este în legătură cu proprietățile lor fizice, altele decât cele ale materialului din care provin [136]. Pe de altă parte, interesul științific este și în legătură cu mecanismele care conferă acestor pulberi forme diverse și dimensiuni prestabilite [37,61,112,34].

Metodele de elaborare a pulberilor nano- și micrometrice pot fi grupate în două grupe mari:

- grupa metodelor fizice;
- grupa metodelor chimice.

Metodele chimice au la bază co-precipitarea compușilor din fier, cobalt sau nichel în medii bazice cu formarea de particule fin dispersate în lichide de bază [37].

Metodele fizice [61,112,34] constau în pulverizarea unui metal aflat în stare solidă, utilizând unele procedee care operează cu plasmă [120], cu arc electric [137] sau cu fascicul laser [8,11]. Descompunerea termică de compuși organometalici în plasma capacitivă [31] sau în plasma de microunde [97] face parte din categoria metodelor fizico-chimice de elaborare a pulberilor magnetice de dimensiuni nano- și micrometrice.

Vaporizarea și descompunerea termică pot fi privite ca reacții chimice [34], dat fiind faptul că produșii de reacție condensează pe atomii sau moleculele de gaz. În funcție de natura, presiunea și debitul produselor de reacție rezultă particule cu dimensiuni și forme [34,120,137,8,11] de interes pentru unele actuale și viitoare

aplicații. Interesul aplicativ al pulberilor magnetizabile de dimensiuni nano- și micrometrice este în legătură cu realizarea de suporturi de informație de ultra-înaltă densitate [87], producerea de senzori de câmp magnetic [94,25,76] și, nu în ultimul rând, elaborarea de nano- și microfluide magnetizabile [37, 61, 58] inteligente, precum și de suspensii magnetoreologice [115, 85].

Particulele ultrafine de grafit, fin dispersate în nanofluide magnetizabile, conferă acestora electroconductivitate, proprietate utilă în tehnici de separare electromagnetică [61, 128] a materialelor pulverulente. În schimb, nanoparticulele de tipul Fe-C sunt utile la mărirea contrastului röntgen [141], iar microparticulele formate prin polimerizarea în plasmă a oxizilor de fier cu pulberi de grafit, cunoscute sub denumirea de FC-4, se utilizează în oncologie [78].

Particulele cu dimensiuni cuprinse între 1,8 μm și 8 μm sunt utilizate la producerea de suspensii magnetoreologice [115]. Proprietățile fizice ale acestora sunt influențate de câmpul magnetic aplicat. Electro- și termoconductibilitatea suspensiilor magnetoreologice este comandată de intensitatea câmpului magnetic exterior [94, 25, 76, 85, 98].

Modificarea sensibilă a proprietăților reologice, în câmp magnetic, face posibilă utilizarea suspensiilor magnetoreologice la realizarea de etanșări rotitoare la vid înaintat și presiuni ridicate, la producerea de amortizoare [142] și de ambreiaje [18], la finisarea ultrafină a suprafețelor cu geometrii diverse [116], la posibile tratamente oncologice [88, 9], etc.

Ceea ce se consideră de un real interes pentru tema abordată este elaborarea de pulberi magnetizabile nano- și micrometrice în game de dimensiuni și cu forme prestabilite utilizabile în procese de sesizare. Aceasta presupune obținerea prin procesul de elaborare a particulelor a unor proprietăți care să poată fi exploatate facil în sesizarea existenței sau a modificării unor parametri de proces sau a unor fenomene de proces. Pentru aceasta este necesară cunoașterea legăturii dintre morfologia particulelor și mecanismele de formare a pulberilor magnetizabile nano- și micrometrice la nivelul unui jet de plasmă. În baza datelor obținute se poate trece la conceperea instalației și a tehnologiei privind elaborarea pulberilor magnetizabile nano- și micrometrice.

4.1.2.1 Nanocompozitele pe bază de Fe_2O_3

Nanocompozitele pe bază de Fe_2O_3 prezintă comportare superparamagnetică atunci când dimensiunile lor sunt în jurul valorilor de 4-6 nm. Dintre toate aceste structuri, maghemita (faza gama a oxidului de fier) este studiată intens, cel mai recent pentru „bastonașe” (nanorod) cu cristalinitate ridicată și proprietăți magnetice specifice [40]. Nanoparticule metalice încapsulate în straturi de carbon grafitice au atras un interes major ca noi nanomateriale datorită proprietăților unice și posibilităților aplicații în înregistrări magnetice și pentru manipularea materialelor radioactive sau sensibile la aerul atmosferic [48]. Fierul pur încapsulat în carbon ar putea fi un excelent material magnetic moale (soft) care prezintă o magnetizare de saturație ridicată. S-a raportat frecvent faptul că proprietățile magnetice sunt dependente de dimensiunile particulelor. Trebuie accentuat aici puternicul impact al nanostructurilor magnetice în medicină și biologie:

- pentru sistemele de conducere la țintă a medicamentelor;
- pentru acoperiri de suprafață bioactive a nanoparticulelor magnetice;
- în aplicațiile de hipertermie.

Deși cunoscuți de mult în istorie, oxizii de fier au suscit un interes crescând în ultima decadă datorită unor extrem de importante proprietăți fizico-chimice. Aceste proprietăți pot fi utilizate în cataliză, electro-magnetism, pigmenți, ca absorbânți în ecosferă, etc. Diferite tehnici cu dezvoltare recentă urmăresc elucidarea proprietăților interioare și de suprafață ale oxizilor de fier. Datorită dimensiunilor mici (în domeniul nanometrilor) și gradului de dezordine al multor cristalite de oxizi, acești compuși prezintă o comportare specifică în cadrul diferitelor aplicații: mineralogie, chimia mediului (absorbânții, oxidanți), știința solurilor, industriile de tehnologii chimice.

Există 16 compuși ai oxidului de fier împărțiți în oxizi, hidroxizi și oxid hidroxid. Reținând aici numai oxizii de fier (compuși ai fierului cu oxigenul) se pot menționa următoarele forme:

- hematita α -Fe₂O₃,
- magnetita Fe₃O₄,
- maghemita γ -Fe₂O₃, β -Fe₂O₃, ϵ -Fe₂O₃,
- wurstite FeO.

Hematita este un oxid foarte răspândit și extrem de stabil constituindu-se de multe ori drept membrul de sfârșit al transformărilor chimice a celorlalți oxizi.

Magnetita este un material ferimagnetic negru, conținând atât Fe^{II} cât și Fe^{III}.

Maghemita γ -Fe₂O₃ este un material ferimagnetic roșu-brun, izostructural cu magnetita, dar deficient în lăcașuri cationice. Este un material magnetic foarte important și este produs în mod clasic prin încălzirea altor oxizi/hidroxizi de fier în prezența unor materiale magnetice. Maghemita sintetică prezintă adeseori forme suprastructurale ce provin din ordonarea cationilor și a golurilor. Aceste fenomene sunt în directă legătură cu dimensiunea cristalitelor și cu cantitatea de Fe^{II} prezentă în structură.

4.1.2.2 Nanoparticulele de ferită de bariu de tip W (BaFe₁₉O₂₇)

Din punctul de vedere al compoziției chimice, feritele sunt oxizi dubli pe bază de Fe₂O₃ combinat cu oxidul altui element metalic, notat uzual și general MeOn. Formula lor generală este de forma: XMeOn.4Fe₂O₃.

În cazul în care $n > 1$, Me este ionul unui metal bivalent. Dacă raza acestuia $r_{Me} < 1\text{\AA}$ se formează ferita MeOFe₂O₃, (MeFe₂O₄) cu structură spinelică și care nu corespunde elaborării de fluide cu comportare magnetică întrucât este nemagnetică. Dacă $r_{Me} > 1\text{\AA}$ se pot forma două tipuri de ferite MeFe₂O₄, respectiv MeO.6Fe₂O₃, (MeFe₁₂O₁₉) ambele cu structură hexagonală. Dintre acestea numai compusul MeO.6Fe₂O₃, numit hexaferită, are proprietăți fizice corespunzătoare pentru fabricarea fluidelor inteligente cu comportare magnetică.

Unul dintre sistemele cel mai intens studiate este sistemul BaO-Fe₂O₃ cu diagrama de echilibru redată în figura 4.2 a. Între feritele corespunzătoare acestui sistem, cel mai important este compusul MeFe₁₂O₁₉, (MeO.6Fe₂O₃) numit și hexaferită sau ferită de tipul M. Feritele de tip M au fost studiate atât pentru cunoașterea proprietăților fizice, cât și din punctul de vedere al tehnologiei de elaborare, interesul fiind determinat de faptul că, până în prezent, s-au dovedit optime din ambele puncte de vedere (tehnic și economic) pentru fabricarea fluidelor magnetice. Compușii de tipul M sunt deosebit de importanți și prin faptul că pe baza lor se pot obține soluții solide ternare prin substituirea ionilor de Ba, Sr, Pb sau Ca cu ionii unui metal bivalent din prima serie de tranziție sau combinații de Li³⁺ și

Fe^{3+} . Dacă se analizează sistemul ternar $\text{MeO}-\text{BaO}-\text{Fe}_2\text{O}_3$, cu diagrama redată în figura 4.2 b., se pot ușor identifica soluțiile solide pe bază de compus a căror compoziție chimică rezultă din tabelul 4.1.

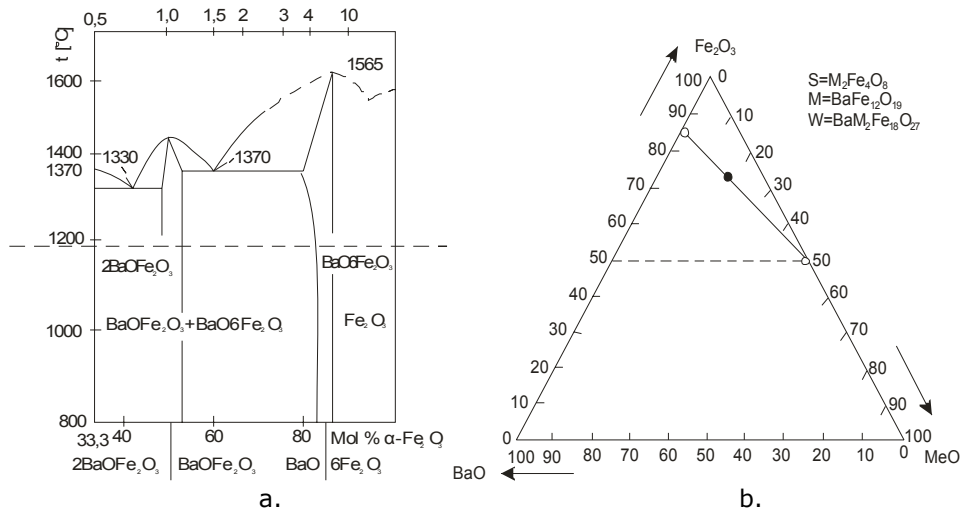


Fig. 4.2 Diagrama de echilibru a sistemului $\text{BaO}-\text{Fe}_2\text{O}_3$ și cea a sistemului $\text{MeO}-\text{BaO}-\text{Fe}_2\text{O}_3$ [141]

Tabel 4.1 Compoziții ale feritelor din sistemul $\text{MeO}-\text{BaO}-\text{Fe}_2\text{O}_3$

Simbolul compusului	Formula tipului de compus	Exemple de compoziție chimică în funcție de metal
M	$\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ ($\text{BaFe}_{12}^{3+}\text{O}_{19}$) $\text{BaO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$	
W	$\text{BaM}_2^{2+}\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ $\text{BaO} \cdot 2\text{MO} \cdot 8\text{Fe}_2\text{O}_3$	M=Mn, Fe, Co, Ni, Zn 2M=(ZnFe); (Mn,Zn); ($\text{Fe}_{0,5}\text{Zn}_{1,5}$) ($\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}$); ($\text{Ni}_{0,5}\text{ZnFe}_{0,5}^{2+}$) ($\text{Fe}_{0,5}^{2+}\text{Co}_{0,75}\text{Zn}_{0,75}$)
Y	$\text{BaM}_2\text{Fe}_{12}\text{O}_{22}$ ($2\text{BaO} \cdot 2\text{MO} \cdot 12\text{FeO}$)	M=Mg, Zn, Mn, Co, Ni, Cu 2M=($\text{Zn}_{1,5}\text{Fe}_{0,5}$)
Z	$\text{Ba}_3\text{M}_2\text{Fe}_{24}\text{O}_{41}$ $3\text{BaO} \cdot 2\text{MO} \cdot 12\text{Fe}_2\text{O}_3$	M=Mg, Co, Ni, Cu
S	$\text{M}_2\text{Fe}_4\text{O}_8$ ($2\text{MO} \cdot 2\text{Fe}_2\text{O}_3$)	

Între feritele M, W, Y, Z și S se pot forma soluții solide, dat fiind faptul că zonele hexagonale conținând Ba^{2+} sunt separate de zonele spinelice în care se substituie ionii Me^{2+} .

În sistemul ternar $\text{FeO}-\text{BaO}-\text{Fe}_2\text{O}_3$, pe lângă ferita de tipul M, ferita de tip W = $\text{BaFe}_2^{2+}\text{Fe}_{16}^{3+}\text{O}_{27}$ are o importanță deosebită deoarece prezintă unele caracteristici

magnetice superioare. Astfel, în timp ce pentru ferita de tipul $M = \text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$, magnetizarea la saturație calculată este $20 \mu\text{B}$, pentru ferita de tip W , valoarea teoretică este de $56 \mu\text{B}$, iar cea determinată experimental de $48 \mu\text{B}$. [28,74]

4.1.3 Matricea fluidă

În principiu orice lichid (conductor sau neconductor) poate constitui baza unui fluid magnetic. Cel mai des se utilizează hidrocarburi, uleiuri siliconice, apă, diesteri, esteri și altele respectiv mercur în funcție de aplicația urmărită. [10]

Cea mai importantă caracteristică funcțională a matricei fluide este vâscozitatea. O matrice cu vâscozitate ridicată este utilizabilă în cazul fluidelor magneto-reologice, pe când o matrice fluidă cu vâscozitate mai mică este utilizabilă cu succes în cazul elementelor de sesizare magnetice aflate în mișcare. O astfel de matrice este recomandată și pentru senzorii ce vor fi proiectați și realizați în cadrul prezentei lucrări.

4.1.4 Proprietățile fluidelor inteligente cu comportare magnetică

Principala caracteristică a ferofluidelor este combinația dintre comportarea normală a lichidului și proprietățile super-paramagnetice. Aceasta permite utilizarea forțelor magnetice pentru controlarea proprietăților și a curgerii lichidului [10], fapt care dă posibilitatea aplicării într-un număr larg de situații tehnice.

4.1.4.1 Densitatea fluidelor inteligente cu comportare magnetică

Masa de substanță conținută într-un volum de unitate de fluid inteligent cu comportare magnetică se constituie din masa fazelor lichidă și solidă [10]:

$$\rho_{im} = \rho_0 \cdot \Phi_0 + \rho_m \cdot \Phi + \rho_{ta} \cdot [1 - (\Phi_0 + \Phi)] \quad (4.8)$$

unde:

- ρ_0 – densitatea fazei
- ρ_m – densitatea materialului magnetic
- ρ_{ta} – densitatea substanței tensioactive
- Φ_0, Φ – concentrațiile în volum ale fazei lichide și ale fazei solide, care sunt egale cu raportul volumului ocupat de ele în raport cu întreg volumul lichidului magnetic.

Destul de frecvent densitățile componentelor fluide sunt aproximativ egale. Fazele solidă și lichidă prin încălzire se dilată în mod diferit. În procesul de producere a fluidelor inteligente cu comportare magnetică prin metoda peptizării, chiar după o spălare minuțioasă a magnetitei obținute în concentrat, pot fi conținute resturi din sărurile dizolvate și de asemenea H_2O . Prezența acestor substanțe în faza lichidă denaturează coeficientul de dilatare termică a bazei.

4.1.4.2 Proprietățile magnetice ale fluidelor inteligente cu comportare magnetică

4.1.4.2.1 Proprietăți magnetice statice

Particulele coloidale de fero- sau ferimagnet posedă un moment magnetic constant ca mărime. Câmpurile magnetice exterioare ordonează orientarea momentelor magnetice, ceea ce duce la apariția unei magnetizări macroscopice. În figura 4.3 [10] este prezentat modul de acționare a particulelor magnetice când sunt supuse unui câmp magnetic exterior, aceasta fiind o caracteristică importantă a fluidelor inteligente cu comportare magnetică, și constă în faptul că la aplicarea unui câmp magnetic extern unui fluid inteligent cu comportare magnetică, particulele magnetice se aliniază după liniile de câmp compunând formațiuni asemănătoare lanțurilor. În plus, structura suspensiei se modifică gradual când câmpul magnetic aplicat este intermitent. În figura 4.3 se observă această modificare pentru perioade de 1 s, 3 min, 15 min și 1 h de la expunerea lichidului magnetic la câmpul magnetic alternant.

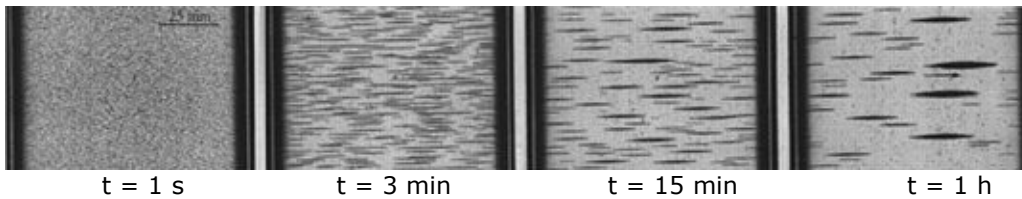


Fig. 4.3 Modificarea structurii suspensiei când câmpul magnetic este alternant

Se observă că structura variază de la o constituție de tip rețea, puternică și fibroasă, la o constituție dată de o serie de formațiuni fusiforme care conferă o consistență scăzută suspensiei.

Există două mecanisme de dezorientare a momentelor magnetice ale particulelor coloidale. În particula solidă uniaxială are loc o împrăștiere a momentului magnetic între 2 direcții contrare ale axei de magnetizare ușoară a cristalului. Al doilea mecanism este condiționat de mișcarea termică a particulelor în raport cu baza lichidă. În câmpurile magnetice medii ca mărime, mișcarea termică se opune aranjării momentelor magnetice de-a lungul câmpului. Într-un câmp magnetic foarte puternic toate momentele magnetice sunt orientate de câmp și magnetizarea atinge starea de saturație. În stare de echilibru, magnetizarea depinde de concentrația în volum a materialului magnetic, de mărimea momentului magnetic al particulei, de câmpul aplicat și energia mișcării termice. În absența unei interacțiuni magnetice dipolare între particulele coloidale monodispersate, starea magnetică la echilibru se poate descrie printr-o lege clasică, decisă de un gaz paramagnetic. Anumite particule mari formează agregate, în timp ce particulele mai mici, rămân libere. Pe măsura creșterii diametrului mijlociu s-a observat amplificarea agregării și aproape toate particulele cu $d = 15$ nm s-au aflat în agregate. În acest caz, particulele mici tind să se deplaseze între cele mari, ceea ce duce la o structurare mai densă a agregatelor în comparație cu sistemele monodispersate. [10]

În câmpuri magnetice exterioare agregatele sunt orientate de câmp, iar aceasta provoacă anizotropia lichidului. La aplicarea unui câmp magnetic exterior lichidul magnetic devine neizotrop, în el are loc o orientare separată a momentelor

magnetice și prin urmare a particulelor însăși, dacă există o legătură între momentul particulei și axa ei cristalografică. Această legătură este determinată de anizotropia proprie a particulei care la rândul ei e condiționată de anizotropia cristalografică și de nesfericitatea particulelor.

4.1.4.2.2 Dependența proprietăților magnetice de temperatură

Proprietățile magnetice ale lichidelor sunt determinate de particulele din același domeniu ale fero- sau ferimagnetului, a căror magnetizare spontană dispare la o anumită temperatură, denumită temperatură Curie T_C . În punctul Curie, energia interacției de schimb a atomilor devine egală cu energia mișcării termice și substanța devine paramagnetică. Totuși, punctul Curie la materialele magnetice ce formează de obicei faza solidă a fluidelor inteligente cu comportare magnetică nu depășește cu mult temperatura de stabilitate termică a lichidului. Astfel, la magnetită (31 % FeO + 69 % Fe₂O₃), punctul Curie se află în intervalul 550 – 600 °C. Chiar asemenea lichide de temperaturi înalte cum sunt cele de siliciu organic se descompun la aceste temperaturi. Un alt mecanism de acțiune al temperaturii asupra stării de magnetizare este mișcarea termică de dezorientare a momentului magnetic ce se reflectă în argumentul funcției LANGEVIN [10]:

$$\xi = \frac{\mu_0 \cdot m \cdot h}{k \cdot T} \quad (4.9)$$

și în sfârșit, faza lichidă se poate dilata pe măsura creșterii temperaturii, iar aceasta va duce la micșorarea numărului de particule din volumul unitar și, prin urmare, va duce la scăderea stării de magnetizare.

Pentru cazul unui câmp magnetic foarte puternic toate particulele sunt orientate de câmp și aportul mișcării termice la demagnetizarea lichidelor poate fi ignorat. Dacă densitatea lichidului magnetic depinde liniar de concentrația fazei solide, atunci starea de magnetizare depinde liniar de densitate.

4.1.4.2.3 Cinematica magnetizării

Procesul de magnetizare a unui fluid inteligent cu comportare magnetică e determinat de două mecanisme de structurare a momentelor magnetice ale particulelor solide, de-a lungul câmpului magnetic.

Primul mecanism de relaxare a stării de magnetizare e legat de mișcarea browniană a particulelor în faza lichidă. Al doilea mecanism e condiționat de fluctuațiile termice ale momentului magnetic în interiorul particulei. [10]

La o particulă uniaxială, în absența câmpului magnetic, momentul magnetic e orientat în raport cu axa de magnetizare și se poate afla în unul din cele două sensuri de-a lungul acestei axe.

4.1.4.3 Proprietăți electrice ale fluidelor inteligente cu comportare magnetică

Proprietățile izolatoare ale unui material se caracterizează prin rezistența electrică și prin tensiunea de străpungere. Mărimea inversă rezistenței se numește conductibilitate electrică volumetrică.

Drept baze lichide în fluidele inteligente cu comportare magnetică sunt folosite mediile organice care din punct de vedere electric nu depășesc 25 %, astfel

se observă o scădere bruscă a fluidității. Deoarece în lichidul magnetic calitativ preparat toate particulele solide sunt înconjurate de un strat de substanță tensoactivă, conductibilitatea volumetrică a lichidului magnetic trebuie să fie determinată de concentrația purtătorilor de sarcină și de mobilitatea lor în fază lichidă. [10]

În experiențele efectuate [10] nu s-a înregistrat o influență importantă a câmpului orientat paralel sau perpendicular față de curentul continuu ce trece prin celula măsurătoare, asupra conductibilității electrice a lichidului magnetic.

Conductibilitatea specifică a fluidelor inteligente cu comportare magnetică depinde de concentrația magnetitei în mod nemonoton. Scăderea conductibilității în domeniul concentrațiilor ridicate s-a explicat prin scăderea mobilității ionilor în cazul creșterii numărului total al purtătorilor de sarcină.

Caracterul nestaționar al procesului de transfer de sarcină în fluid e determinat de o spălare incompletă a magnetitei superior dispersate, ceea ce duce la scăderea stabilității de agregare a lichidului magnetic.

Rigiditatea dielectrică a lichidului magnetic se caracterizează prin tensiunea de străpungere. Măsurătorile tensiunii de străpungere pentru fluide inteligente cu comportare magnetică pe bază de hidrocarbură au demonstrat scăderea ei cu mai mult de 50 % în comparație cu baza lichidă. O dată cu creșterea câmpului magnetic orientat în paralel cu cel electric, tensiunea de străpungere se micșorează. [10] Se atinge o tensiune de străpungere:

$$E_{\text{str}} = 0,5 \text{ MV/m} \quad (4.10)$$

la o inducție cuprinsă în intervalul:

$$B = 0,4 - 0,8 \text{ T} \quad (4.11)$$

Aceste date au fost obținute pentru fluide inteligente cu comportare magnetică de magnetită pe bază organică de siliciu. Acțiunea multiplă a câmpului electric a redus rezistența de străpungere a probei încercate.

4.1.5 Termoconductibilitatea lichidelor magnetice

Existența fazei solide într-un lichid magnetic mărește conductibilitate lui termică, deoarece coeficientul de conductibilitate al magnetitei, în medie, depășește cu mai mult de un ordin de mărime conductibilitatea bazelor lichide utilizate.

4.1.6 Căldura specifică a lichidelor magnetice

Experimentările [10] au arătat că pentru calcul căldurii specifice a lichidelor magnetice în intervalul de temperatură 47...97 °C, se poate utiliza regula amestecului. [10] Dependența de temperatură a căldurii specifice a unui lichid magnetic superior concentrat ($\square = 0,26$) s-a aproximat prin dependența liniară:

$$c_p = 1.088 + 0.227 \cdot 10^{-2} \cdot (T - 273) \quad (4.12)$$

unde:

- c_p – căldura specifică;
- T – temperatura.

La prelucrarea prin metoda celor mai mici pătrate a datelor pentru bază, s-a obținut dependența:

$$c_{p_0} = 1.921 + 0.267 \cdot 10^{-2} \cdot (T - 273) \quad (4.13)$$

unde:

- c_{p_0} – căldura specifică a bazei;

- T – temperatura.

Scăderea căldurii specifice a unui lichid superior concentrat, în comparație cu căldura specifică a bazei este condiționată de conținutul mare de magnetită dispersată. Măsurătorile au arătat că în calculul căldurii specifice a lichidelor magnetice concentrate se poate utiliza relația:

$$c_p = 0.425 + 0.135 \cdot 10^{-2} \cdot t + 0.345 \cdot c_p \quad (4.14)$$

Abaterile de la dependența liniară a căldurii specifice în domeniul temperaturilor negative s-a tratat ca o tranziție fizică de prima speță, în cadrul căreia are loc asocierea particulelor magnetice în grupuri cu moment magnetic însumat nenul.

4.1.7 Vâscozitatea lichidelor magnetice

Cea mai importantă influență a câmpului magnetic asupra proprietăților și caracteristicilor lichidelor magnetice este dependența dintre modificarea câmpului și vâscozitatea lichidului, formă de vâscozitate care este cunoscută sub numele de vâscozitate de rotire (rotational viscosity). Particularitatea efectului constă în faptul că vâscozitatea de rotire este un efect anizotrop. Rațiunea pentru care are loc acest efect constă în tendința de rotire liberă a particulelor, figura 4.4, datorită existenței câmpului magnetic.

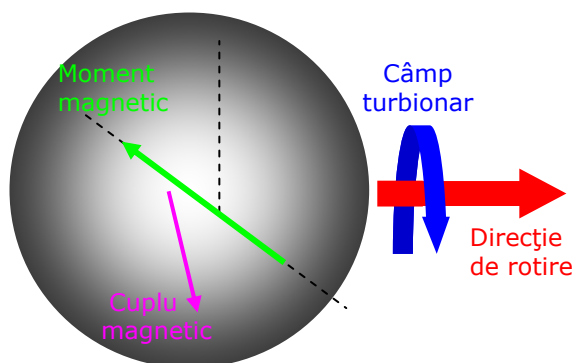


Fig. 4.4 Rotirea liberă a particulelor datorită câmpului magnetic

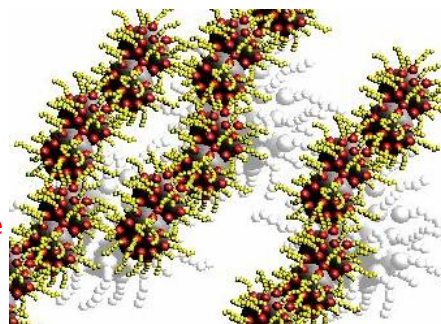


Fig. 4.5 Lanțuri de particule magnetice

Această ipoteză este mai mult teoretică. În realitate, [10] adică în fluidele inteligente cu comportare magnetică produse până în prezent, fenomenele sunt mult mai complexe, particulele apărând organizate în formațiuni de tip lanț sau celulă așa cum sunt prezentate schematizat în figura 4.5.

4.2 Procese de elaborare a nano- și micropulberilor pentru nano și microfluide inteligente

Pornind de la cele prezentate anterior se propune derularea unei cercetări privind elaborarea de nano- și micropulberi pentru confecționarea de microfluide inteligente cu comportare magnetică, materiale nanostructurate care vor fi ulterior utilizate ca elemente active de sesizare în componența senzorilor care se vor

proiecta. Cercetarea propusă are atât un caracter fundamental prin conținutul său în modele matematice specifice proceselor de elaborare fizică a nanoparticulelor, cât și un caracter aplicativ prin programele experimentale de elaborare și caracterizare a nanoparticulelor.

Cercetând sistemele de elaborare de nanoparticule cele mai des utilizate în practica institutelor de cercetare, s-a decis apelarea la 3 dintre acestea:

- procesul de elaborare prin piroliză laser;
- procesul de elaborare prin pulverizare în jet de plasmă;
- procesul de elaborare prin măcinare în mori planetare cu bile.

După elaborarea efectivă prin aceste 3 procedee, nanoparticulele au fost supuse unor procese de caracterizare morfologică și funcțională (din punct de vedere magnetic). Metodele utilizate în aceste procese de caracterizare au fost specifice tipului de nanoparticule. Astfel, datorită faptului că nanocompozitele pe bază de fier sau oxizi de fier prezintă aprioric și continuu caracteristici magnetice, caracterizarea lor a fost orientată predominant către criteriul morfologie (microscopie SE sau TEM, difracții de raze X, măsurări nanodimensionale, etc.). În același timp, dat fiind faptul că hexaferita de bariu este hexagonală și orientarea grăunților este determinantă pentru comportarea sa magnetică, caracterizarea a avut centrul de greutate poziționat în această direcție (măsurări ale parametrilor magnetici, trasări ale curbelor de magnetizare și histereză, etc.). În ansamblu, metodele de caracterizare au fost astfel alese încât să ofere o imagine clară atât asupra particulei în sine, cât și asupra comportării ei din punct de vedere magnetic.

În continuare vor fi prezentate condițiile în care au fost derulate cercetările fundamentale și experimentale, precum și rezultatele acestora. Interpretarea rezultatelor a avut drept criteriu principal comportarea nanoparticulelor în structura fluidelor inteligente cu comportare magnetică.

4.2.1 Elaborarea și caracterizarea nano- și micropulberilor prin piroliză laser

Inițiată de Haggerty în anul 1981 pentru prepararea pulberilor ultrafine pe bază de siliciu, metoda de sinteză cu laserul a pulberilor nanostructurale se bazează pe rezonanța dintre radiația laser și un reactant sau un fotosensibilizator.

Principiile de bază ale pirolizei cu laser se bazează pe fotochimia de infraroșu, și anume:

- absorbția rezonantă a fotonilor de către modurile vibraționale IR active ale moleculelor în starea electronică fundamentală;
- transferul colizional de energie vibrațională către gradele de libertate de translație rotație
- încălzirea gazelor reactante până la disociere, urmată de nucleația și creșterea agregatelor. În orice mediu în care au loc ciocniri multiple pe domeniul de timp al unei reacții chimice, modurile de vibrație ale moleculelor poliatomice se vor echilibra și reacția va avea loc fără localizare de energie într-un singur mod.

Piroliza laser se bazează pe suprapunerea liniei de emisie a laserului cu o linie de absorbție a unuia sau mai multor precursori. Linia 10P(20) a laserului cu CO₂ are maxim la 10,591 μm fiind în același timp cea mai puternică linie de emisie. O substanță adițională, așa numitul sensibilizator, este folosită în cazul unor gaze precursorare neabsorbante. Sensibilizatorul absoarbe energia și o transmite

precursorilor prin ciocniri. Ca efect final a cuplajului laser-sistem absorbant, laserul acționează ca o sursă de căldură, fiind necesar ca numai una din speciile moleculare să absoarbă energia laser celelalte fiind încălzite prin ciocniri. Acest răspuns este complet diferit de reacțiile multifotonice monomoleculare în care fiecare moleculă în gaz absoarbe suficientă energie pentru a produce disocierea înainte de orice ciocnire cu alte molecule din sistem, astfel excluzându-se o reacție "termică".

Sistemul se bazează pe o configurație în cruce. Fluxul de gaze reactante pătrunde în reactor printr-un sistem de duze unde intersectează ortogonal fasciculul focalizat al radiației în IR. Piroliza în fază gazoasă are loc în micul volum definit de întrepătrunderea dintre gaze și radiație, loc în care de obicei apare o flacără. Se atribuie emisia vizibilă în primul rând efectului termic, rezultat din emisia particulelor fierbinți, noi formate. Confinarea gazelor precursore către axul de curgere precum și a particulelor nucleate, se realizează printr-un flux coaxial de argon. Particulele antrenate sunt colectate în aval cu ajutorul unui filtru amplasat într-o camera de colectare.

Principali parametri de proces sunt: natura gazelor (vaporilor) precursore, debitul gazelor, presiunea, lungimea de undă și puterea laserului. În cazul unor precursori lichizi, vaporii sunt antrenați prin barbotare cu un gaz purtător către zona de reacție.

În momentul în care gazele ating temperatura de reacție, particulele încep să nucleeze și să crească în fluxul de gaz. Nucleația și creșterea particulelor sunt procese complexe care depind, de obicei, de condițiile de reacție create de procese experimentale specifice (în mod particular, de natura și numărul reactanților). Particulele cresc prin ciocniri (creșterea este de obicei proporțională cu presiunea din sistem), formându-se magnetizarea remanentă.

Piroliza cu laserul din fază gazoasă este o metodă de sinteză din faza de vapori în care reactanții sunt diluați și, de aceea, conduce la pulberi foarte fine, puțin aglomerate, distribuții înguste ale dimensiunii particulelor și purități controlate. Spre deosebire de alte tehnici de sinteză din faza gazoasă (încălzire cu radiofrecvență (RF) sau încălzire cu arc – plasmă), piroliza cu laserul poate favoriza profile termice aproape ideale și o zonă de reacție care permite nucleație și creștere uniformă. De asemenea, tehnica prezintă o eficiență ridicată, atunci când este optimizată, eficiența globală rămâne în mod esențial cea dată de conversia energiei electrice în radiație laser, aproximativ 15 % pentru laserii cu CO₂ obișnuiți.

Principala specificitate a pirolizei cu laserul față de alte metode de piroliză (cuptoare, arc electric, etc) constă în aceea că nu necesită prezența în flacără a unor gaze oxidante care să întrețină flacăra.

Dintre caracteristicile pirolizei cu laserul se menționează:

- zona de reacție este bine delimitată;
- nu există contact fizic a zonei de reacție cu pereții incintei de reacție;
- nu există contaminări chimice;
- permite atingerea unor temperaturi înalte de reacție: 1000 – 2000 °C;
- prezintă viteze de încălzire/răcire mari: 10⁵ – 10⁶ °C/sec.

Aceste caracteristici ale pirolizei cu laserul conferă pulberii nanometrice obținute următoarele calități:

- dimensionalitate redusă (nanometrică) și suprafață specifică mare a particulelor;
- grad înalt de monodispersie dimensională a particulelor;
- morfologie și structură controlată a particulelor;
- puritate înaltă a pulberilor obținute.

4.2.1.1 Elaborarea nano- și micropulberilor prin piroliză laser

Experiențele de sinteză de nanopulberi au fost realizate folosind tehnica de piroliză laser din faza gazoasă. Această tehnică combină gradientii ridicăți de temperatură induși în amestecul gazos sub iradiere, cu reacții chimice care au loc într-un spațiu restrâns, delimitat de spotul laser și la depărtare față de pereții incintei de reacție. Se creează premisele unei sinteze de particule de mici dimensiuni, bine controlate și de mare puritate.

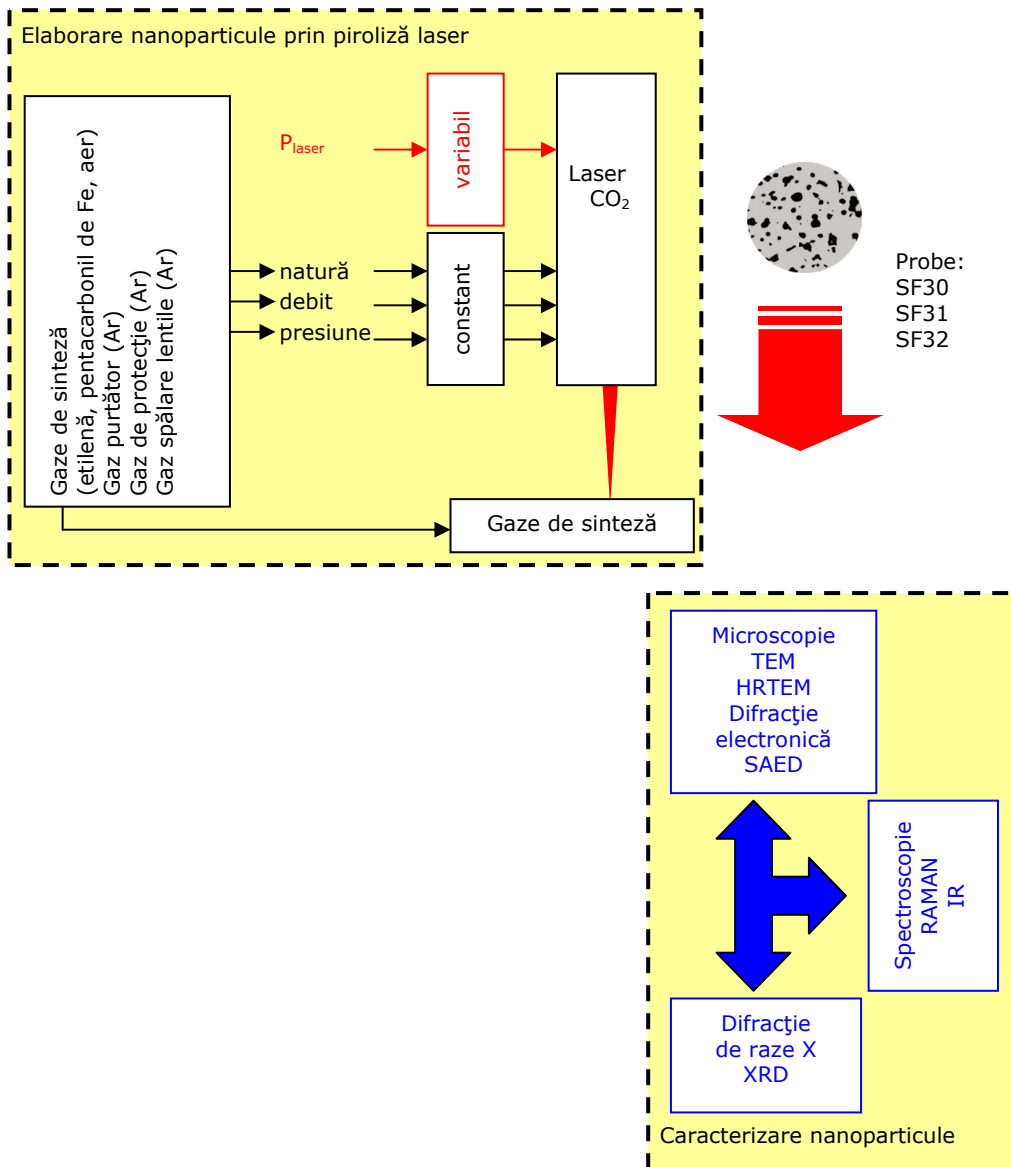


Fig. 4.6 Programul experimental de elaborare și caracterizare de nanoparticule prin piroliză laser

În figura 4.6 este prezentat schematizat programul experimental destinat elaborării prin piroliză laser și apoi caracterizării morfologice a nanoparticulelor magnetizabile destinate confecționării de lichide magnetice.

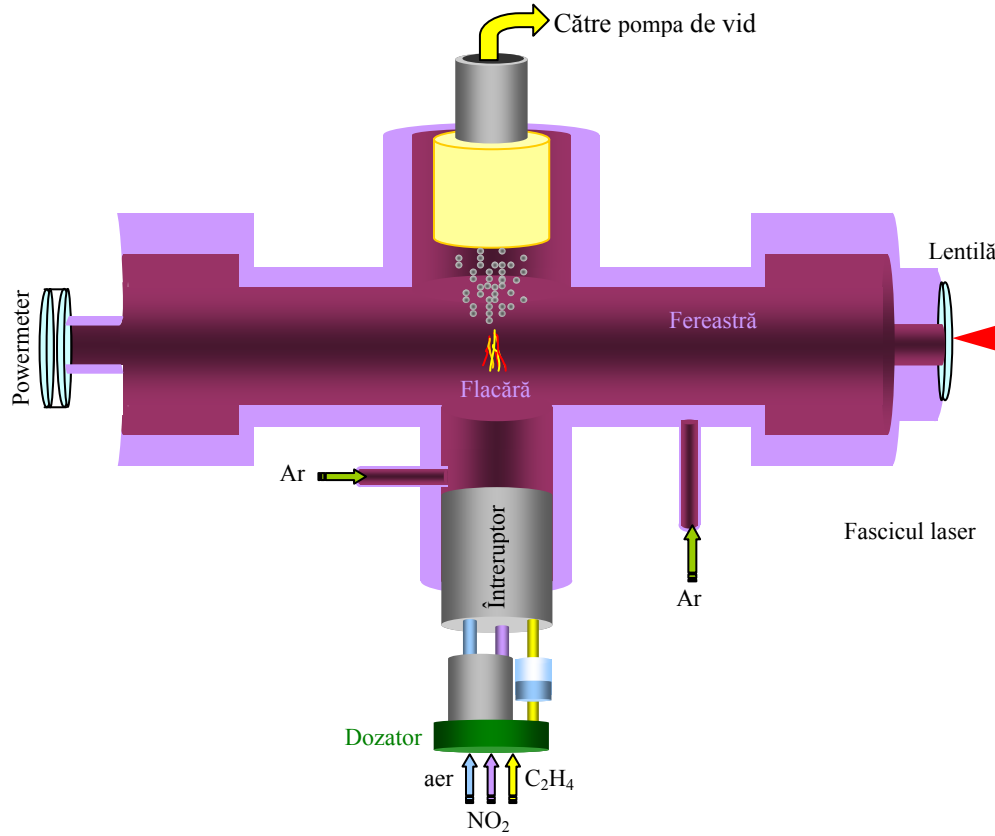
Procesele de sinteză de particule pe bază de fier, din precursori în fază gazoasă (sau vapori) folosesc în majoritatea cazurilor, drept substanță precursoră, carbonilul de fier sub formă de vapori. Și în cazul experimentărilor din cadrul programului de cercetare în procesul de piroliză cu laserul cu CO_2 s-a utilizat pentacarbonilul de fier ($\text{Fe}(\text{CO})_5$) întrucât prezintă proprietăți convenabile pentru procesul de sinteză, cum sunt:

- presiune de vapori suficient de ridicată;
- energie de activare relativ joasă, necesară ruperii grupărilor CO, producând astfel cu destulă ușurință atomi și clusteri din metal în stare incipientă. Dar, deoarece $\text{Fe}(\text{CO})_5$ absoarbe extrem de slab în zona de emisie a laserului cu CO_2 , se folosește introducerea unui absorbant la aceasta lungime de undă.

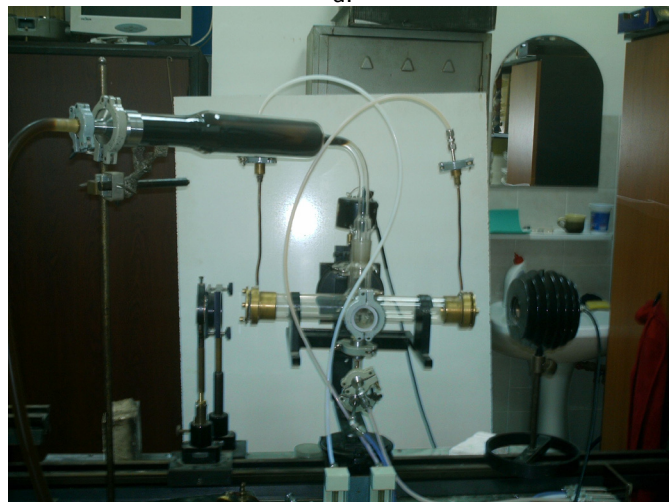
Primele experiențe au folosit hexafluorura de sulf (SF_6). Senzitivantul are și rol de gaz purtător, astfel fluxul de vapori de pentacarbonil este strict proporțional cu cel de senzitivant și este favorizat de presiuni mai mici de lucru. În mod ideal, senzitivantul va transfera prin procese de ciocniri moleculare sau prin dezexcitare moleculară (termalizare) energia absorbită de la radiația laser către moleculele de carbonil de fier, rămânând molecular neschimbat din punct de vedere chimic. După cum se observă (analize IR, XRD și EDX), prezența fierului promovează descompunerea SF_6 în detrimentul purității particulelor oxidice sintetizate. În aceste condiții se renunță la utilizarea acestui senzitivant și se folosește un altul: etilena. Acest gaz are două avantaje: în primul rând este mai stabil chimic în prezența activității catalitice a clusterilor de fier, iar în al doilea rând prezintă un coeficient de absorbție pe lungimea de undă laser mai scăzut. În consecință se pot introduce fluxuri mai mari de vapori de pentacarbonil raportate la aceeași energie.

Pentru sinteza de nanoparticule de oxid de fier amestecul reactiv trebuie completat cu un agent oxidant. Pentru setul de experiențe ilustrat mai jos s-a selectat ca agent oxidant doar aerul deoarece aduce avantajul unei reduceri a riscului de descompunere a etilenei prin prezența mai bogată a azotului în amestec la aceleași valori ale fluxurilor de gaz oxidant. Azotul are rolul de a prelua din energia termică excedentară micșorând temperatura în zona de reacție (e greu de introdus parametrul temperatură în condițiile în care se disting clar două tipuri de fluide: unul în stare excitată – senzitivantul, altul în stare termalizată speciile în contact – ciocniri, iradierii – cu moleculele excitate).

În figura 4.7 este prezentată schema de principiu a instalației de piroliză (figura 4.7 a) a carbonilului de fier în proces senzitivat cu etilenă, respectiv instalația propriu-zisă utilizată în cadrul experimentărilor (figura 4.7 b)



a.



b.

Fig. 4.7 Instalație experimentală pentru producerea de nano- și micropulberi prin piroliză laser a carbonilului de Fe în proces senzitivat cu etilenă
 a. schema de principiu; b. instalația propriu-zisă

Principalele componente ale instalației experimentale sunt:

- un laser cu CO₂ (10,6 μm lungime de undă) cu putere de aprox. 80 – 100 watt, prevăzut cu unitate de umplere gaze, pompă de vid și sursa de tensiune înaltă;
- regulatoare de debit pentru măsurarea debitelor de gaze precursore: etilena (ca gaz purtător pentru vaporii de pentacarbonil de fier și senzitivant), aer sintetic (amestec natural de azot și oxigen) și argon pentru fluxul de confinare;
- debitmetru și robineti de reglaj manual, dar fin, de debit pentru fluxurile de Ar de spălare a celor două ferestre de transparență;
- sistem de măsură digitală a presiunii în camera de reacție - baratron și unitate de citire;
- vacuometru pentru măsurarea presiunii în vasul barbotor cu pentacarbonil de fier;
- robinet de reglare a debitului final al gazelor spre evacuarea de la pompă necesar controlului riguros al presiunii din camera de reacție;
- pompa de vid cu sistem pe bază de azot lichid de captare și neutralizare a gazelor toxice sau inflamabile.

Instalația experimentală utilizată este compusă dintr-o cameră de reacție în cruce dotată pe o direcție cu ferestre de transparență IR (KCl-monocristal), o diuză de intrare formată din două tuburi concentrice: unul central pentru intrarea amestecului de etilenă, pentacarbonil de fier și gaz oxidant, și al doilea, cel exterior, pentru un flux de Ar ce ajută la menținerea curgerii laminare și la direcționarea produșilor de piroliză spre o camera adiacentă, de colectare. Vaporii de pentacarbonil de fier sunt purtați din vasul de barbotare în camera de reacție cu fluxuri bine stabilite de senzitivant. Fluxurile de gaz sunt controlate și măsurate cu ajutorul unor robinete cu ac și, respectiv, a unor microdebitmetre masice electronice. Presiunea în camera de reacție este măsurată cu un baratron electronic tip MKS și este reglată printr-un robinet fin ce ajustează fluxul de gaze totale trase de pompa de vid (sistem de control tip downstream). Controlul compoziției amestecului reactiv a fost monitorizat cu ajutorul unei celule de gaz ce s-a cuplat pe traiectul de evacuare a gazului, între zona de colectare a pulberii și robinetul de control a fluxului total de evacuare, cel ce controlează și presiunea din camera de reacție.

Pe parcursul experiențelor s-a folosit un laser tip CO₂ cu rezonator închis. Sistemul optic al rezonatorului este proiectat astfel încât densitatea de energie să fie una apropiată de profilul unei curbe gaussiene privind fascicolul laser pe o secțiune axială (de-a lungul razei laser). Un astfel de profil conduce la sinteze mai stabile și reproductibile, particule mai fin dispersate și cu dimensiuni de particule aproape monodisperse. Același tip de distribuție energetică (definită monomod) favorizează și o focalizare eficientă a fascicolului laser dacă se utilizează lentile clasice pe bază de monocristale transparente pe lungimea de undă laser (NaCl, ZnSe, CaCl₂ etc). În cazul majorității experiențelor fascicolul laser a fost focalizat cu o lentilă convergentă din monocristal de ZnSe cu depuneri antireflex având focarul de $f = 25$ cm. În schimb camera de reacție este plasată astfel ca zona de reacție să fie la o distanță de 28 cm de lentilă, secțiunea transversală a zonei iradiate fiind una circulară cu diametrul de 1,5 mm.

Pentru îmbunătățirea curgerii în regim laminar a gazului reactiv, acesta a fost confinat (ținut paralel în vecinătatea axei de curgere) de un flux adiacent de argon ($\emptyset \sim 1$ l/min). Pentru a preveni eventualele depuneri de material solid pe

ferestrele de transparentă (discuri de monocristal de NaCl) acestea sunt permanent pulverizate cu un flux de Ar având debitul de $F_{fr}=150$ l/min pe fiecare fereastră. Fluxurile gazoase reactive ies printr-o duză (diametrul 2,3 mm) poziționată concentric cu duza exterioară prin care circula Ar de confinare (diametru 12 mm).

Deși destinată sintezei de nanopulberi de oxizi de fier, funcție de densitatea de energie, debite de gaz și presiune se poate modifica procesul de sinteză de la formarea de nanopulberi de oxid de fier la cel de fier - eliminând fluxul de gaz oxidant, la nanopulberi de fier încapsulate în straturi de carbon, chiar inițierea sintezei de nanotuburi de carbon și la carburi de fier crescând corespunzător densitatea de energie laser pentru inițierea descompunerii etilenei. În cadrul experimentărilor s-au utilizat diferite ponderi ale compușilor din amestecului gazos pentacarbonil de fier (vapori) și aer. Vaporii de $Fe(CO)_5$ au fost vehiculați în instalație prin barbotarea lichidului cu etilena. Debitul gazului purtător de $Fe(CO)_5$ vapori a fost controlat cu ajutorul unui debitmetru. Fluxul carbonilului ($\phi_{carbonil}$) a fost calculat cu formula:

$$\phi_{Fe(CO)_5} = \phi_{purtator} \cdot \left[\frac{p_{Fe(CO)_5}}{p - p_{Fe(CO)_5}} \right] \quad (4.15)$$

unde

▪ $p_{carbonil}$ reprezintă presiunea de vapori a $Fe(CO)_5$ la temperatura camerei.

Această formulă presupune că datorită procesul de barbotare deasupra lichidului, în vasul barbotor se afla un amestec compus din etilenă și vapori de pentacarbonil aflați la presiunea parțială a vaporilor saturați, iar presiunea din acest vas este similară cu cea din camera de reacție deoarece drumul acestui amestec gazos nu mai este cu nimic îngrădit (valve, robineti, furtune cu secțiuni foarte înguste).

În tabelul 4.2 sunt prezentate condițiile experimentale utilizate la obținerea a trei tipuri de nanopulberi magnetice.

Tabel 4.2 Date experimentale pentru obținerea de nanopulberi magnetice

Nr. Crt.	Gaz purtător	ϕ (sccm) aer	ϕ (sccm) carbonil*	ϕ (sccm) C_2H_4	P_L (W)	ϕ (sccm) Ar	p (mbar)
SF30	etilena	145	25	145	55	1000	300
SF31	etilena	145	25	145	45	1000	300
SF32	etilena	145	25	145	35	1000	300

În tabelul 4.2 sunt prezentați parametrii experimentali ai experiențelor de sinteză cu laserul pentru 3 probe reprezentative de nano oxizi de fier. Probele SF30, SF31 și SF32 diferă între ele prin densitatea de putere laser a fasciculului de iradiere.

4.2.1.2 Caracterizarea nanopulberilor elaborate prin piroliză laser

4.2.1.2.1 Spectroscopia RAMAN

Spectroscopia RAMAN este o analiză extrem de utilă în cazul analizei materialelor nanocristaline și chiar amorse. Semnalul RAMAN poate decela faze

cristaline și astfel se poate face o evaluare flexibilă a căii de urmat pentru sinteza de materiale cât mai aproape de compoziția și proprietățile dorite.

În figura 4.8 este prezentată suprapunerea spectrelor RAMAN a celor 3 probe selectate pentru analize exhaustive. Se menționează faptul că această analiză, ca primă evaluare, a fost utilizată pentru majoritatea probelor sintetizate.

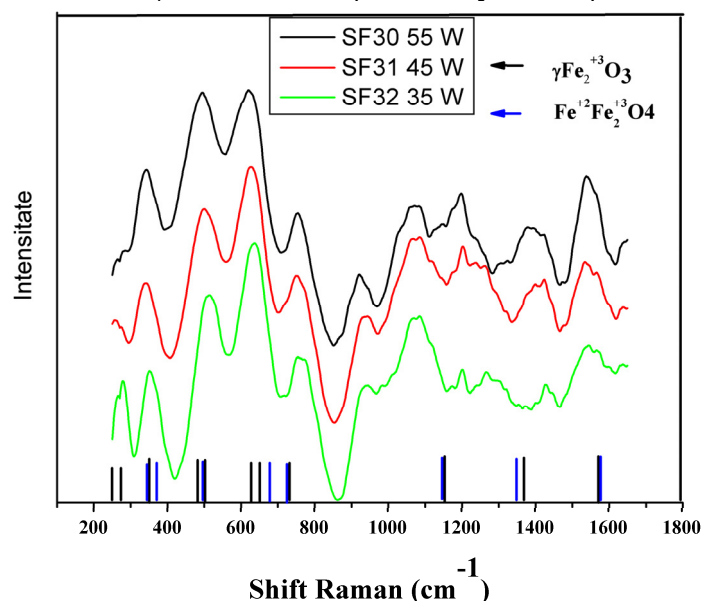


Fig. 4.8 Spectrul Raman al celor trei nanopulberi: SF 30, 31, 32

În cazul materialelor feritice (oxid de fier magnetic) analiza de difracție de raze X cu greu poate face diferență între faze, mai ales dacă e vorba de amestecuri cum este cel format din magnetită-maghemită. Chiar și spectrul RAMAN prezintă caracteristici foarte apropiate între cele două faze. Se consideră că faza maghemită este dominantă în amestecul feritic dacă spectrul RAMAN indică vârfuri (peak) largi centrate la 360, 495 și 680-720 cm⁻¹.

Având în vedere condițiile de reacție și precursorii trebuie luate în calcul și alte faze: oxo-hidroxizii și hidroxizii de fier sunt un prim set de posibili produși. Astfel se regăsesc următoarele faze:

- faza γ - FeOOH are un semnal RAMAN la 719 cm⁻¹;
- Fe(OH)₃ la 696 cm⁻¹;
- σ-FeOOH la 680 cm⁻¹;
- alte faze nestoichiometrice ce au un pic foarte larg în zona a 700 cm⁻¹.

Una dintre fazele mai stabile, γ - FeOOH este mai puțin probabilă prin inexistența în spectrul probelor a vârfului sau cel mai important plasat la 250 cm⁻¹. De asemenea, hidroxidul feric ar trebui să inducă un vârf foarte larg, pentru proba masivă lărgimea la semiînălțime fiind de peste 100 cm⁻¹, cum proba este nanometrică această lărgime ar trebui să crească, lucru ce nu este evidențiat în cele două spectre. Având în vedere aceste constatări se poate afirma că analizând spectrul RAMAN, faza dominantă ar fi cea de maghemită.

Un aspect interesant este reliefat de aspectul spectrelor din zona 1300-1500 cm⁻¹. În această zonă faza maghemită are două vârfuri largi de o intensitate medie.

Tot pe această zonă sunt prezente benzile D și G specifice carbonului cristalizat grafitic sau carbonului amorf. După cum se poate constata, intensitatea celor două vârfuri din zona 1350 și 1570 cm^{-1} crește cu puterea radiației laser și, în consecință, se presupune că este foarte probabilă apariția acestora datorită creșterii ponderii de carbon liber în probe cu creșterea puterii laser. Acest lucru are o explicație logică prin faptul că prin creșterea puterii se induce descompunerea etilenei, astfel aceasta devine și senzitivă dar și donator de carbon.

4.2.1.2.2 Spectroscopia IR

Pentru analizarea probelor au fost realizate pelete din 1% procent masic pulbere în pulbere de KBr, menținând constantă masa de amestec de pulbere per probă (de 250 mg).

Aceasta halogenură alcalină este cea cu un spectru foarte larg de transmisie în afara domeniului de măsurare al aparatului: între 400 și 4000 cm^{-1} (corespunzând la 25 μm și respectiv 2,5 μm în măsurarea lungimii de undă). La aceasta concentrație s-a evidențiat cel mai sensibil răspuns. Astfel e de dorit o probă cu o transparență medie apropiată de 50%, altfel curbele sunt aplatizate fie de lipsa semnalului util dat de absorbant în cazul concentrațiilor prea mici sau prea absorbantivă în cazul peletelor conținând prea mult material de analizat.

În figura 4.9 sunt redată rezultatele acestei analize, suprapunând curbele celor trei probe.

Zona cu absorbțiile cele mai intense ale compușilor oxizi de fier este cea dintre 700 și 400 cm^{-1} . Maghemita prezintă două benzi de absorbție largi centrate pe 600 și 440 cm^{-1} . Maghemita mai bine cristalizată prezintă o serie de inflexiuni la 794, 724, 638, 584, 558, 442 și 396 cm^{-1} . Comparând cele trei vârfuri se concluzionează că toate indică prezența cu precădere a fazei maghemită ce se individualizează și cristalizează mai bine cu creșterea puterii laser, cauza principală a creșterii dimensiunii de cristal.

Benzile de absorbție foarte largi din zona 3400 cm^{-1} sunt atribuite în parte fazei de oxid de fier, dar se pot asocia și urmelor de apă. Prezența acestuia este greu de anihilat având în vedere că materialul de transparență KBr este o substanță foarte higroscopică.

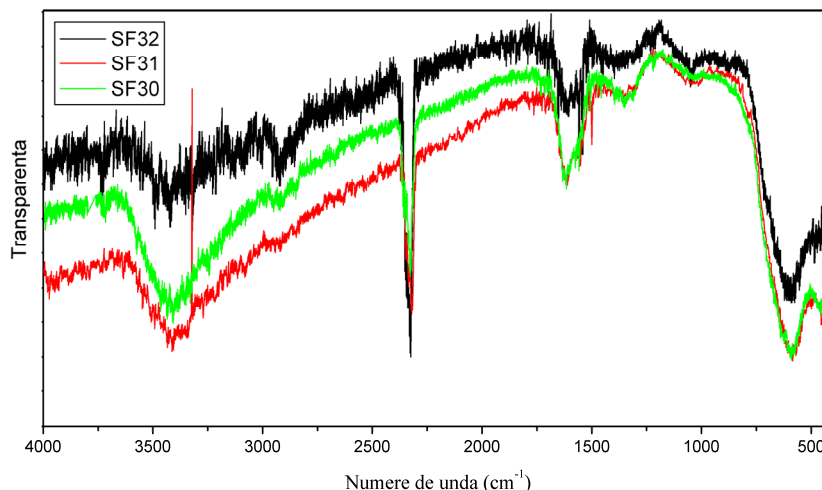


Fig. 4.9 Spectrul IR al celor trei probe

În zonele 3060, 2980, 2920 cm^{-1} se regăsesc vârfuri atribuite legăturilor de tip C-H. Din analizele IR ale probelor de nanopulberi carbonice un spectru ce individualizează bine aceste benzi indică o prezență mai pronunțată a substanțelor poliaromatice. Totuși, reexaminând intensitatea vârfurilor, concluzia este că prezența fazelor carbonice este în cel mai rău caz una de mică pondere. Vârful din zona 2300 cm^{-1} , cvasiprezent la cele 3 probe provine de la absorbțiile radiației de către molecule de CO_2 aflate pe traiectul sursa IR spectrometru și receptor. Benzile pronunțate din zona 1600 cm^{-1} se pot atribui fazelor oxidice ale Fe (greu de decelat care anume).

4.2.1.2.3 Caracterizare prin microscopie electronică prin transmisie TEM

Cele 3 probe au fost analizate prin microscopie TEM. În figura 4.10 sunt prezentate imagini TEM obținute pentru proba SF 30.

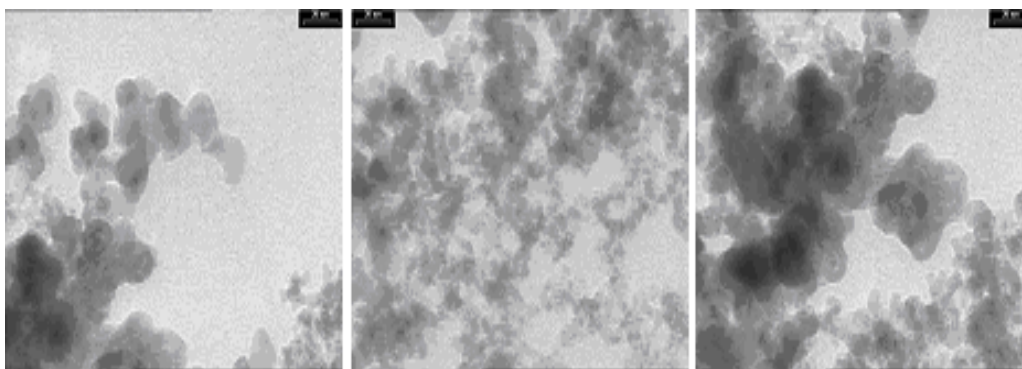


Fig. 4.10 Imagini TEM pentru nanoparticulele preparate prin piroliza – proba SF30

În figura 4.11 (a, b) sunt prezentate imagini TEM obținute pentru proba SF 32

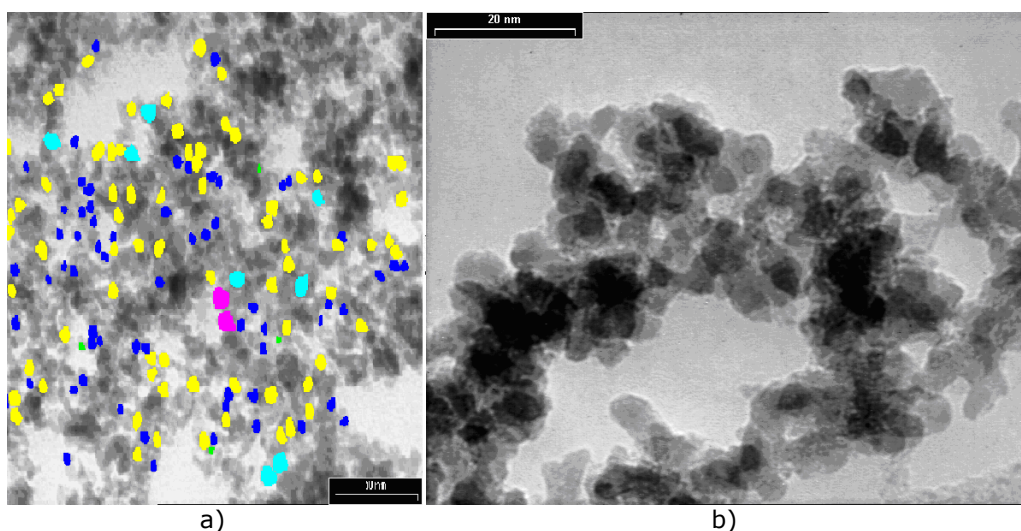


Fig. 4.11 Imagini TEM și distribuția de nanoparticule pentru proba SF32.

Particulele au o formă aproape sferică. Acest lucru este demonstrat și de valoarea factorului de formă $k = 0.86$ determinat din măsurătorile pe particule. Distribuția nanoparticulelor s-a realizat după diametru. Histograma a fost calculată pentru un număr de 150 nanoparticule. Aranjarea s-a făcut presupunând o distribuție de tip lognormal. Măsurătorile de diametru, arie, perimetru, factor de formă sunt efectuate automat de software-ul de analiză așa cum este prezentat în figura 4.12.

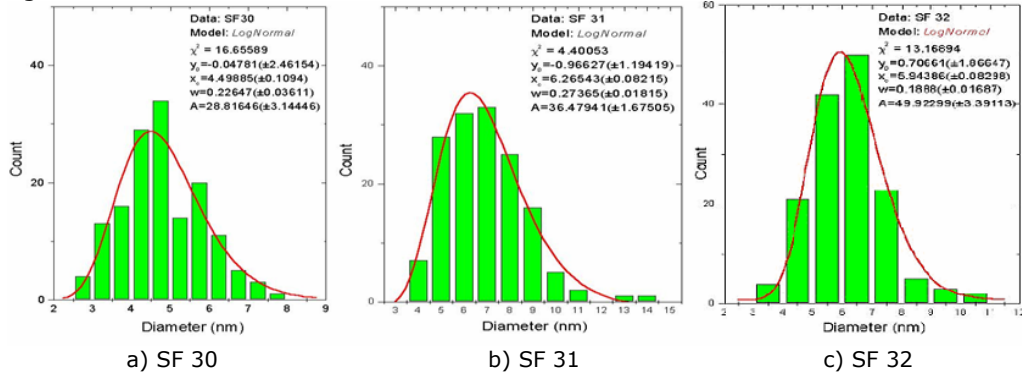


Fig. 4.11 Distribuția nanoparticulelor după diametru pentru probele SF 30, SF 31 și SF 32

4.2.1.2.4 Caracterizare prin difracție electronică pe arie selectată SAED

După analizele microscopice TEM, cele 3 probe au fost supuse unor analize prin difracție electronică, SAED. În figura 4.13 sunt prezentate imaginile obținute în procesul de difracție electronică SAED pentru probele SF 30 și SF 32. Din imagini se pot observa inelele care sunt specifice unui material policristalin, în cazul acestui studiu fiind vorba de maghemită/magnetită.

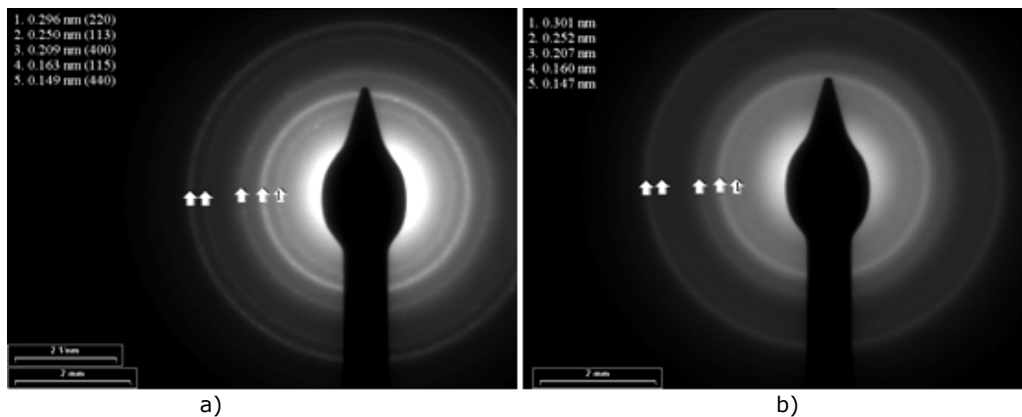


Fig. 4.13 Difracție de electroni (SAED) pentru probele SF30 (a) și SF32 (b)

În stânga imaginilor sunt valorile distanțelor interplanare determinate. Aceste linii pot fi atribuite unei structuri cubice a oxidului de fier ($P4(3)32$) – maghemita. Difracția de electroni s-a efectuat în diferite zone ale grilei folosind o lungime a camerei de 420 mm, constanta de calcul fiind $k = 0,89 \text{ nm} \times \text{mm}$.

4.2.1.2.5 Caracterizare prin microscopie electronică prin transmisie de înaltă rezoluție HRTEM

Imaginile HRTEM au fost preluate din diferite zone ale grilei urmărindu-se datele obținute din imaginile de difracție. Se examinează interfața dintre două nanocristale. Zonele marcate sunt zonele în care s-a făcut examinarea prin FFT (reprezentarea Fourier a nanocristalului). Distanțele măsurate sunt notate lângă imaginile FFT. În figura 4.14 sunt prezentate imaginile HRTEM.

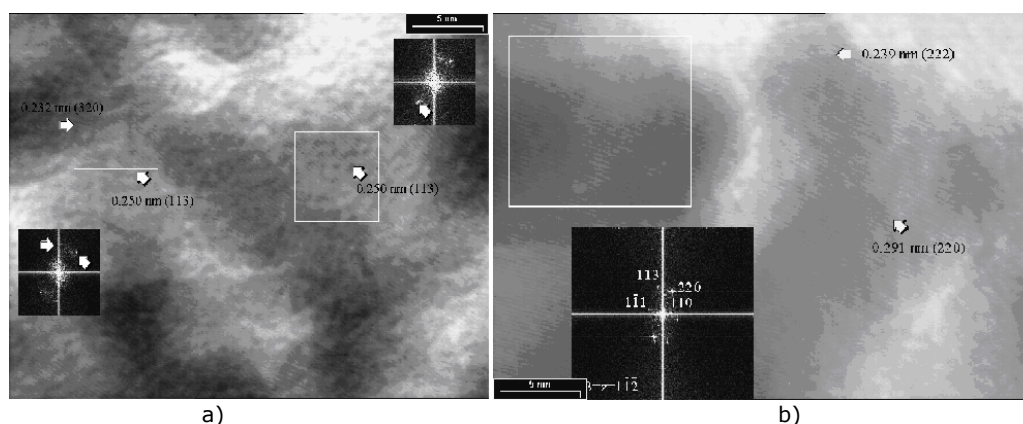


Fig. 4.14 Imagini HRTEM la aglomerate de nanocristale ale probelor SF 30 și SF 32

Imaginile sunt selectate în aglomerări care prezintă franje de interferență corespunzătoare maghemitei/magnetitei:

a) Detaliu pe marginea unui ansamblu de nanoparticule. Inserată este reprezentarea în spațiul Fourier a zonei selectate din imagine;

b) Detaliu pe un ansamblu de nanoparticule care permit evidențierea planelor (113) și (320) ale maghemitei

În general, nanocristalele prezintă particularitățile unui cristal de maghemită (SG: P4(3)32) cu structura cubică $a = 0,834$ nm și diferite orientări: fie orientat pe direcția $[01\bar{2}]$ ($d_{321}=0,224$ nm $d_{400}=0,200$ nm) fie orientat pe o direcție care permite evidențierea franjelor corespunzătoare planelor (113) $d_{113}=0,253$ nm.

4.2.1.2.6 Sinteza și caracterizarea de nanopulberi pe bază de fier prin difracție de raze X, XRD

Analiza calitativă prin difracție de raze X s-a efectuat utilizându-se difractometrul de raze X, SHIMADZU XRD 6000 prezentat în figura 4.15. Acest echipament lucrează în geometria Bragg-Brentano în 2θ .

S-a utilizat un fascicul de raze X caracteristice CuK α , monocromatizat cu filtru de Ni. Datele experimentale au fost prelucrate numeric și s-au calculat distanțele interplanare corespunzătoare maximelor de difracție (evidențiate pe difractograme).

Spectrele de raze X ale probelor SF 30 și SF 31 caracterizează, prin prezența unor maxime de mică intensitate și extrem de largi, un material alcătuit din nanoparticule. Principalele maxime de difracție pot fi indexate în sistem cubic atribuibil atât fazei maghemită - Fe₂O₃ (JCPDS file 39-1346) cât și fazei de magnetită - FeFe₂O₄ (JCPDS file 19-0629).



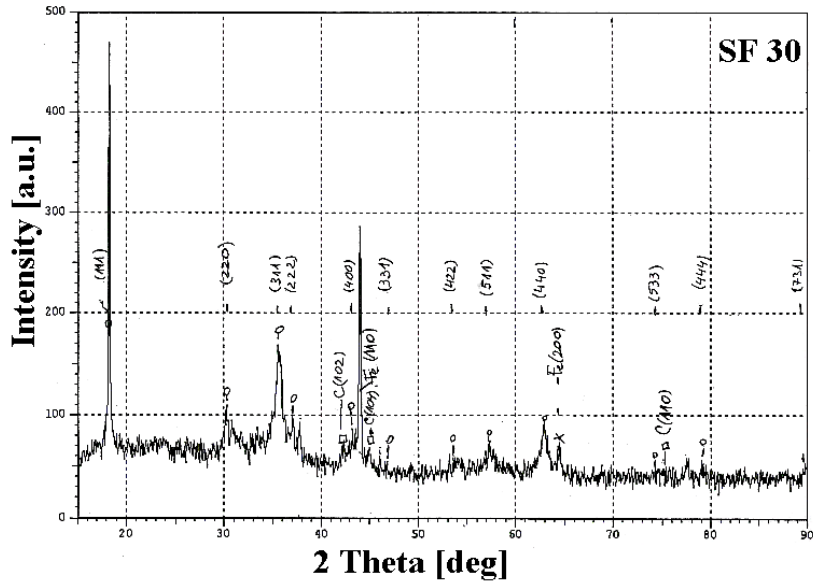
Fig. 4.15 Difractometru de raze X tip SHIMADZU XRD 6000

Estimarea constantei de rețea din maximele corespunzătoare reflexiilor 311 (la aproximativ $2\theta \sim 35.5$) respectiv 440 (la aprox. $2\theta \sim 62.7$) conduce la valori sub valoarea standard a magnetitei de 8,396 Å (tabelul 4.3). Este indiciul formării unei fazei mai dezordonate de tip maghemită.

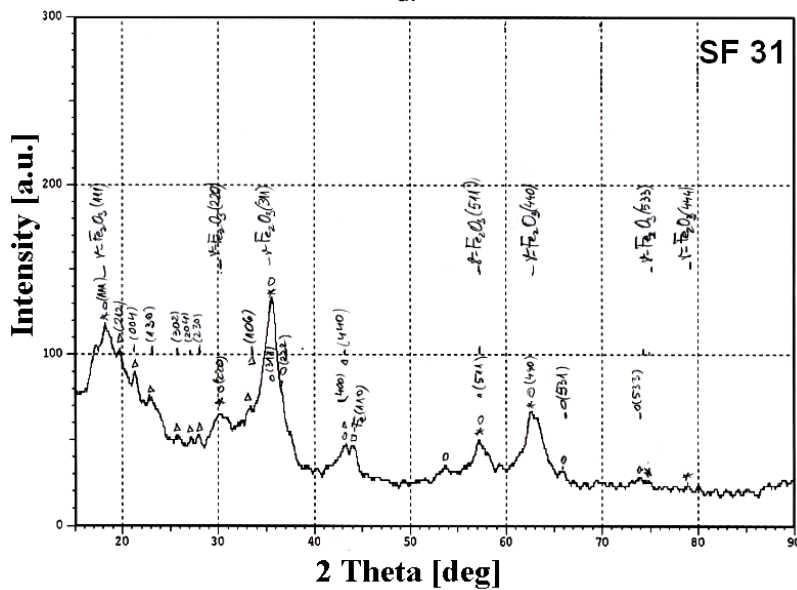
Tabel 4.3 Datele experimentale la difracția de raze X a probelor SF 30 și SF 32

Proba	Date structurale	
	Fe ₂ O ₃ -maghemită (JCPDS file 39-1346) $a=8.3515$ Å	
	FeFe ₂ O ₄ -magnetită (JCPDS file 19-0629) $a=8.396$ Å	
	Constantă rețea, a [Å]	Dimensiune medie de particulă, D [nm]
SF30	8,36	12
SF32	8,38	4

Dimensiunea de nanoparticulele s-a calculat din lărgimea maximelor la semiînălțime (FWHM) folosind ecuația Scherrer. Trebuie subliniat faptul că lărgimea foarte mare a maximelor de difracție se asociază atât formării unor particule de dimensiuni extrem de mici cât și unui grad înalt de dezordine structurală/cristalografică. Astfel încât în domeniul "nano" creșterea dimensiunii de particulă semnifică și creșterea ordinii cristalografice, denumită generic "cristalinitate". Este cazul probei SF 30 prezentată în figura 4.16 a care are maxime de difracție mult mai înguste decât maximele probei SF 31 prezentate în figura 4.16 b. Fierul metalic poate fi identificat numai în urme în ambele probe prin prezența unui maxim de foarte mică intensitate la $2\theta = 44,7^\circ$. În plus, la proba SF 30 apar niște linii suplimentare datorate unei impurități întâmplătoare.



a.



b.

Fig. 4.16 Spectrele de raze X al probelor SF 30 (a.) și SF31 (b.)

Din observarea difractogramelor obținute se poate deduce că acestea sunt difractograme caracteristice unei substanțe nanostructurate. După cum se știe, analizele prin difracții de raze X sau electronice nu pot pune în evidență ele singure diferența dintre faza oxidului de fier numită maghemită și cea numită magnetită. Cu toate acestea analizele probelor SF prezentate mai sus, par să indice o prezență mai sigură a maghemitei γ - Fe_2O_3 în raport cu magnetita Fe_3O_4 pentru proba SF 32 pentru o rețea cristalină cubică, parametrul rețelei fiind $a = 8,350\text{\AA}$.

În urma experimentărilor au fost obținute pulberi magnetice cu următoarele caracteristici:

- forma particulelor este una sferică
- dimensiunile particulelor se situează în intervalul 3 – 50 nm
- cantitatea obținută: 110 mg.

4.2.2 Elaborarea și caracterizarea nano- și micropulberilor prin pulverizare în jet de plasmă

Elaborarea pulberilor prin pulverizare în jet de plasmă este unul dintre procesele relativ des utilizate. În cazul acestui proces există legături determinante între morfologia particulelor obținute în jetul de plasmă și mecanismele de formare a pulberilor magnetizabile nano- și micrometrice la nivelul unui jet de plasmă. Aceasta implică necesitatea cunoașterii fenomenelor fizice și chimice implicate în procesul de elaborare. Experimentările de elaborare preliminare derulate au evidențiat că există unii parametri ai procesului de elaborare care introduc influențe importante asupra caracteristicilor particulelor elaborate. Dintre aceștia, cei mai influenți s-au dovedit a fi: starea de mișcare a jetului de plasmă (viteza și deschiderea jetului de plasmă), parametrii procesului de pulverizare în jet de plasmă (viteza de generare a picăturilor și numărul de picături generate în unitatea de timp) și parametrii electrici utilizați pentru crearea plasmei de argon.

Observațiile legate de influența acestor parametri au impus necesitatea modelării matematice a fenomenelor fizice implicate în procesul de elaborare, astfel încât să se poată calcula cu precizie valorile parametrilor amintiți anterior, valori necesare în controlarea caracteristicilor particulelor elaborate.

4.2.2.1 Modelarea matematică a câmpului de viteze și de temperaturi în jetul plasmei de argon

Pentru crearea plamei de argon necesare elaborării controlate a particulelor se utilizează un arc electric generator de plasmă, cunoscut uzual sub numele de arc de plasmă. Acesta este amorsat într-un mediu foarte bogat în argon, datorită faptului că argonul este un gaz relativ ușor de ionizat. Potențialul de ionizare este egal cu 1521 kJ/mol, această valoare fiind sensibil mai mică decât cea a potențialului de ionizare a heliului, gaz de asemenea plasmagen.

Principiul procedurii de generare a plasmei este prezentat în figura 4.17.a. Arcul de plasmă este inițiat între un electrod confecționat dintr-un aliaj cu bază de wolfram, termorezistent și puternic termoemisiv și metalul de procesat. Modul de legare a acestui sistem la sursa de curent determină evoluția arcului de plasmă, existând posibilitatea unei evoluții sub formă de arc clasic sau sub formă de jet.

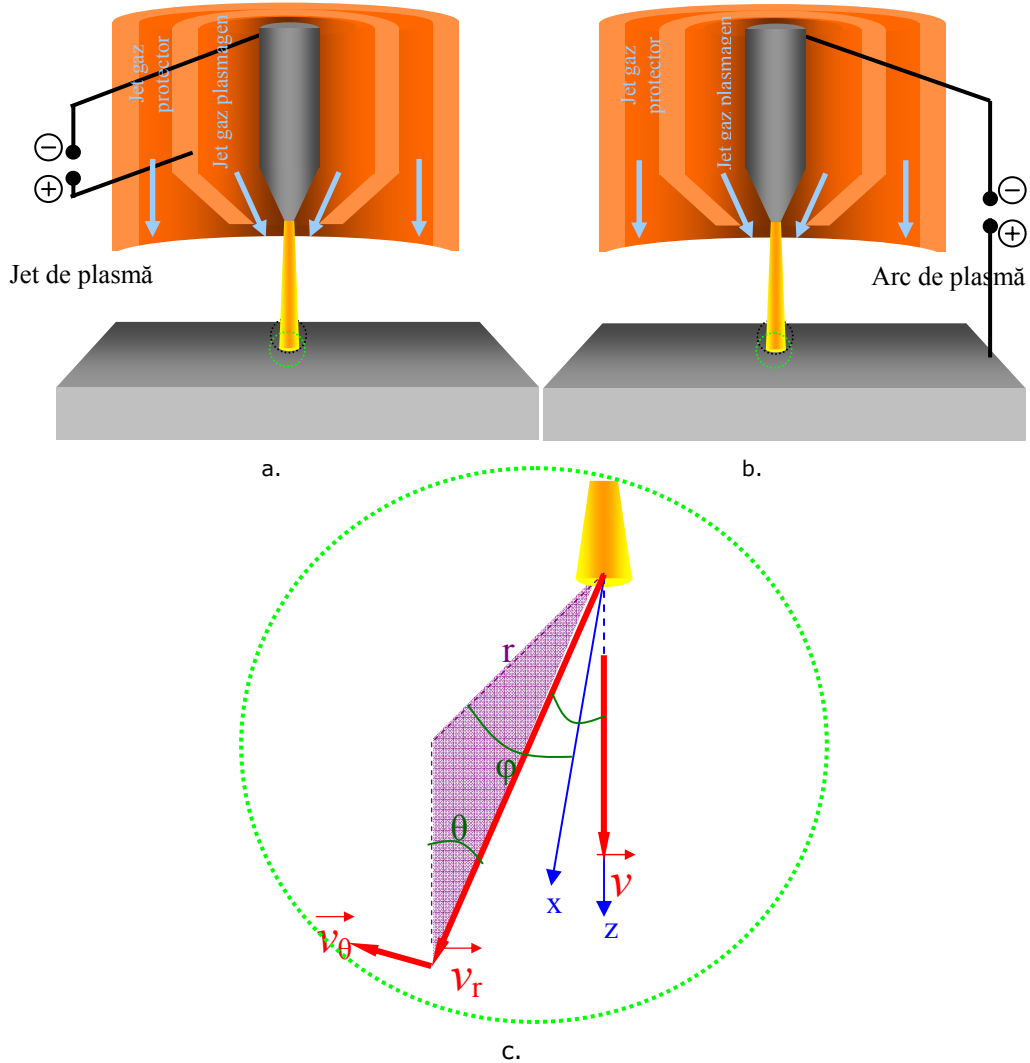


Fig. 4.17 Generarea jetului de plasmă (a.) și a arcului de plasmă (b.) respectiv sistemul considerat în modelare (c.)

Ecuția de mișcare a jetului de plasmă este guvernată de relațiile Navier-Stokes. Pentru cazul staționar, ecuația de mișcare a plasmei este [69, 134]:

$$\rho (\vec{v}\nabla)\vec{v} = \nabla p + \eta\Delta\vec{v} \quad (4.16)$$

unde:

- ρ - densitatea plasmei,
- \vec{v} - viteza plasmei,
- η - vâscozitatea plasmei,
- p - presiunea gazocinetică a plasmei.

Conform figurii 4.17 plasma iese din duza de gaz cu o secțiune circulară. Experimentările de generare a plasmă au evidențiat faptul că evoluția către piesa de topit are loc sub formă columnară, aproape cilindrică. Datorită acestei evoluții, în procesul de modelare se va considera că jetul de plasmă are simetrie axială, ipoteză care se poate verifica experimental. Având o secțiune circulară, jetul de plasmă dă naștere unui câmp de viteze tot circular. Analiza acestui câmp se face în coordonate r , θ și φ (axele sunt conform figurii 4.17.b)

Vitezele radială v_r și viteza unghiulară v_θ sunt exprimabile cu ajutorul funcției de curent, Ψ . Astfel:

$$v_r = \frac{1}{r^2 \cdot \sin \theta} \cdot \frac{\partial \Psi}{\partial \theta} \quad (4.17)$$

$$v_\theta = \frac{1}{r \cdot \sin \theta} \cdot \frac{\partial \Psi}{\partial r} \quad (4.18)$$

Notând:

$$\lambda = \sin \theta \quad (4.19)$$

expresiile celor două viteze devin:

$$v_r = -\frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial \Psi}{\partial \lambda} \quad (4.20)$$

$$v_\theta = -\frac{1}{r(1-\lambda)^{0,5}} \cdot \frac{\partial \Psi}{\partial \lambda} \quad (4.21)$$

Uzual, funcția de curent Ψ se reprezintă sub forma produsului dintre direcția radială r , vâscozitatea cinematică a plasmăi, ν și funcția $f(r)$:

$$\Psi = r \cdot \nu \cdot f(r) \quad (4.22)$$

Introducând funcția Ψ din relația (4.22) în relațiile (4.20) și (4.21), rezultă expresiile pentru vitezele v_r și respectiv pentru v_θ . Expresiile obținute se introduc în ecuația (4.16), rezultând o ecuație în v_r și respectiv o ecuație în v_θ . Utilizând ecuațiile obținute se elimină presiunea p și se obține o ecuație în f și λ , ecuație care are forma [69]:

$$f^2 - 2(1-\lambda^2)f' - 4\lambda \cdot f = \Sigma(\lambda) \quad (4.23)$$

Aici f' este derivata funcției de λ , f . Funcția $\Sigma(\lambda)$ este o funcție pătratică de λ și conține coeficienții de integrare, c . Pentru jetul de plasmă cu simetrie axială, $\Sigma(\lambda) = 0$, și soluția este:

$$f(\lambda) = \frac{2(1-\lambda^2)}{1+c-\lambda} \quad (4.24)$$

Din ecuațiile (4.22) și (4.24) se obține:

$$\Psi = r \cdot \nu \cdot \frac{2(1-\lambda^2)}{1+c-\lambda} = const. \quad (4.25)$$

Expresia (4.25) este ecuația liniilor de curent din jetul de plasmă cu simetrie axială.

Mișcarea plasmă este considerată ca fiind generată de un câmp de forțe \vec{F} aflat într-un punct la infinit și situat pe axa jetului. Atunci, pentru cazul debitelor relativ mari de plasmă ($c \leq 0,1$), conform literaturii de specialitate [16] mărimea forței se poate obține din relația:

$$F \approx \frac{32\pi}{3c} \cdot \rho \cdot v^2 \quad [\text{N}] \quad (4.26)$$

relație din care rezultă coeficientul de integrare, c:

$$c \approx \frac{32\pi \cdot \rho v^2}{3F} \quad (4.27)$$

unde ρ este densitatea plasmă la temperatura T și presiunea p .

Forma radială a vitezei jetului de plasmă este de interes pentru modelul imaginat al stării reale de curgere a plasmă. În baza acestei considerații se introduce funcția de curent Ψ din relația (4.25) în expresia (4.20) a vitezei radiale, v_r , rezultând astfel:

$$v_r = \frac{2v}{r} \left[\frac{2\lambda c - (1-\lambda)^2}{(1+c-\lambda)^2} \right] \quad [\text{m/s}] \quad (4.28)$$

Pentru $\theta = 0$ ($\lambda = 1$), din expresia (4.28) se obține viteza în lungul axei de simetrie (Oz) a jetului de plasmă. În expresia obținută se introduce expresia coeficientului c din relația (4.26) și se obține o formă ușor de acceptat din punct de vedere fizic și tehnic a expresiei vitezei radiale a jetului de plasmă:

$$v_r = \frac{3F}{8\pi\rho v r} \quad [\text{m/s}] \quad (4.29)$$

Coloana jetului de plasmă este parcursă de un curent electric având intensitatea I . Câmpul magnetic generat de I , produce constrângerea coloanei jetului de plasmă (figura 4.18).

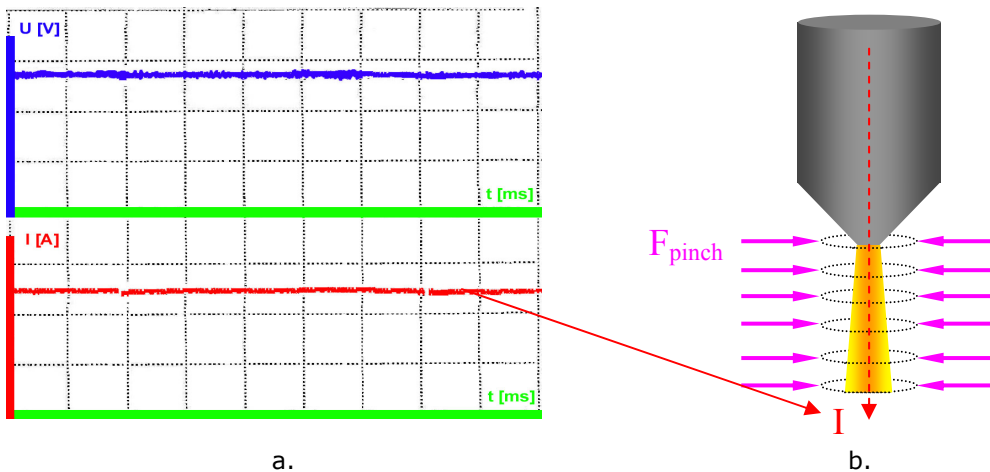


Fig. 4.18 Curentul prin jetul de plasmă (a.) și acțiunea forței pinch (componenta radială a forței electromagnetice) (b.)

Acțiunea componentei radiale a forței electromagnetice, forța pinch (de constrângere electromagnetică), se manifestă sub forma unei presiuni pe secțiunea transversală a coloanei de plasmă de rază R , în puncte aflate pe aceasta, la distanța oarecare r de axa coloanei. Această presiune este:

$$p = \frac{\mu_0 I^2}{4\pi^2 R^4} (R^2 - r^2) \quad [\text{N/m}^2] \quad (4.30)$$

unde μ_0 reprezintă permeabilitatea magnetică a vidului.

Presiunea p , pentru intervalul de existență a razei până la punctul de analiză, $r \in [0, R]$ generează o forță exprimabilă cu relația:

$$F = \int_0^R 2\pi \cdot r \cdot p \, dr = \frac{\mu_0 I^2}{8\pi} \quad [\text{N}] \quad (4.31)$$

În condiția simplificatoare că presiunea datorată tensiunii superficiale a plasmă este suficient de mică încât poate fi neglijată în dezvoltarea modelului matematic, fără introducerea unor erori de neacceptat. Din relațiile (4.29) și (4.31) se obține viteza axială a jetului de plasmă:

$$v = \frac{3\mu_0 I^2}{64\pi^2 \cdot \rho \cdot v \cdot r} \quad [\text{m/s}] \quad (4.32)$$

În această relație, r este distanța măsurată, pe axa jetului ($\theta = 0$), de la punctul de generare a plasmă. Acest model matematic al evoluției jetului de plasmă este relativ simplu, el conținând elemente determinabile experimental sau cuantificabile în relație cu altele cunoscute. Acceptând spre cuantificare caracteristicile unui generator uzual de plasmă (diametrul duzei de constrângere), precum și condițiile generale de utilizare a acestuia (distanța dintre capătul electrodului din aliaj de wolfram și piesa pe care se închide jetul de plasmă) se pot introduce următoarele informații utilizabile în cuantificare prezentate în tabelul 4.4

Tabel 4.4 Elementele considerate în calculul modelului matematic (figura 4.19)

Element geometric/structural/de sistem cuantificabil	Simbol	Valoare
Diametrul duzei de constrângere	$\varnothing_{duz\grave{a}}$	$3 \cdot 10^{-3}$ m
Distanța dintre capătul electrodului din aliaj de wolfram și piesa pe care se închide jetul de plasmă	$d_{duz\grave{a}-pies\grave{a}}$	$3 \cdot 10^{-3}$ m
Diametrul petei catodice	d_K	$0,5 \cdot 10^{-3}$ m
Distanța radială la care se determină viteza	r	$0,125 \cdot 10^{-3}$ m
Vâscozitatea plasmă	η	$2,9 \times 10^{-4}$ kg/s·m
Densitatea plasmă	ρ	$0,02$ kg/m ³
Temperatura plasmă de argon	T	10000 K

Rezultatul obținut este prezentat grafic în figura 4.20.

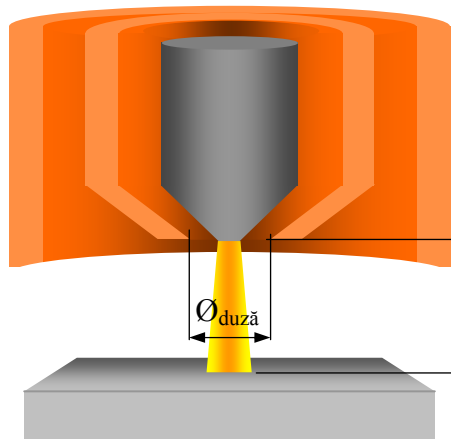
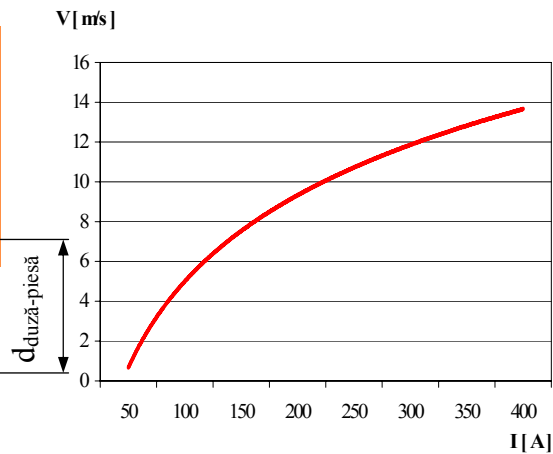


Fig. 4.19 Elementele geometrice utilizate în calculul modelului matematic

Fig. 4.20 Viteza axială v a jetului de plasmă în funcție de intensitatea curentului I

Valorile experimentale ale vitezei axiale ale jetului de plasmă au fost determinate utilizând o sondă de presiune (răcită) conectată la un manometru diferențial cu apă [52].

La echilibrul dintre presiunea dinamică a plasmei și cea coloanei de apă, are loc relația:

$$v_{\text{exp}} = \left(\frac{2\rho_W gh}{\rho} \right)^{0,5} \quad (4.33)$$

în care ρ_W și h sunt densitatea și respectiv denivelarea coloanei de apă, iar g este accelerația gravitațională. Pentru calcul au fost utilizate valorile din tabelul 4.5.

Tabel 4.5 Elementele considerate în calculul modelului matematic

Element geometric/structural/de sistem cuantificabil	Simbol	Valoare
Densitatea plasmei	ρ	0,02 kg/m ³
Densitatea coloanei de apă	ρ_W	1000 kg/m ³

Utilizând aceste valori pentru ecuația (4.33) rezultă o viteză axială experimentală egală cu:

$$v_{\text{exp}} = 31,31 \cdot h^{0,5} \quad [\text{N}] \quad (4.34)$$

Valorile vitezei axiale sunt prezentate în figura 4.21.

Diferențele dintre valorile experimentale și cele teoretice sunt datorate modificării proprietăților de transport ale plasmei cu temperatura [69] pe de o parte, iar pe de altă parte poziționării dificile a sondei pe axa jetului de plasmă. Jetul de plasmă are formă aproximativ cilindrică cel puțin în imediata vecinătate a punctului de generare. Această formă este considerată în continuare pentru analiza distribuției vitezei jetului de plasmă pe secțiunea transversală a coloanei de rază R (în lungul axei Ox), conform relației (4.35) și figurii 4.21.

$$v_j = v \left[1 - \left(\frac{x}{R} \right)^2 \right] \quad [\text{N}] \quad (4.35)$$

Introducând expresia forței F (relația (4.31)) în relația (4.27) obținându-se (figura 4.22):

$$c \approx \frac{256 \pi^2 \cdot \rho v^2}{3 \mu_0 I^2} \quad (4.36)$$

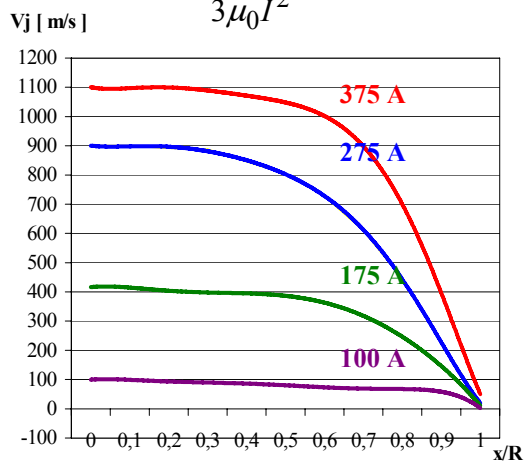


Fig. 4.21 Viteza v_j a jetului de plasmă în puncte x/R de pe secțiunea transversală a jetului de plasmă

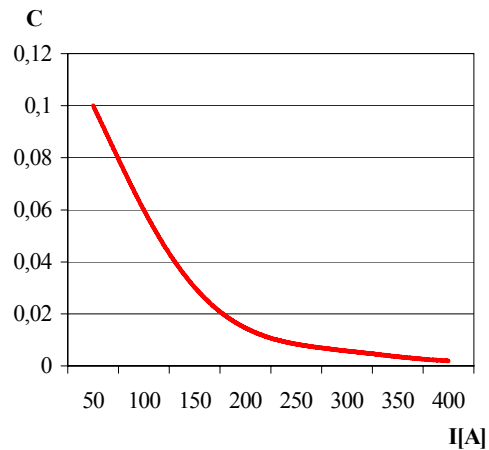
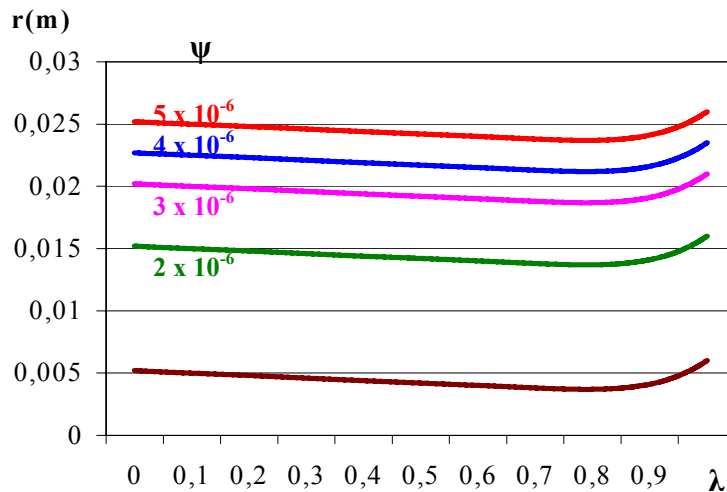


Fig. 4.22 Mărimea coeficientului c în funcție de intensitatea I a curentului prin jetul de plasmă

În figura 4.23 este prezentată distribuția liniilor de curent în jetul plasmă de argon, pentru diverse valori ale curentului prin jet și pentru valori constante ale funcției de curent, Ψ .



a.

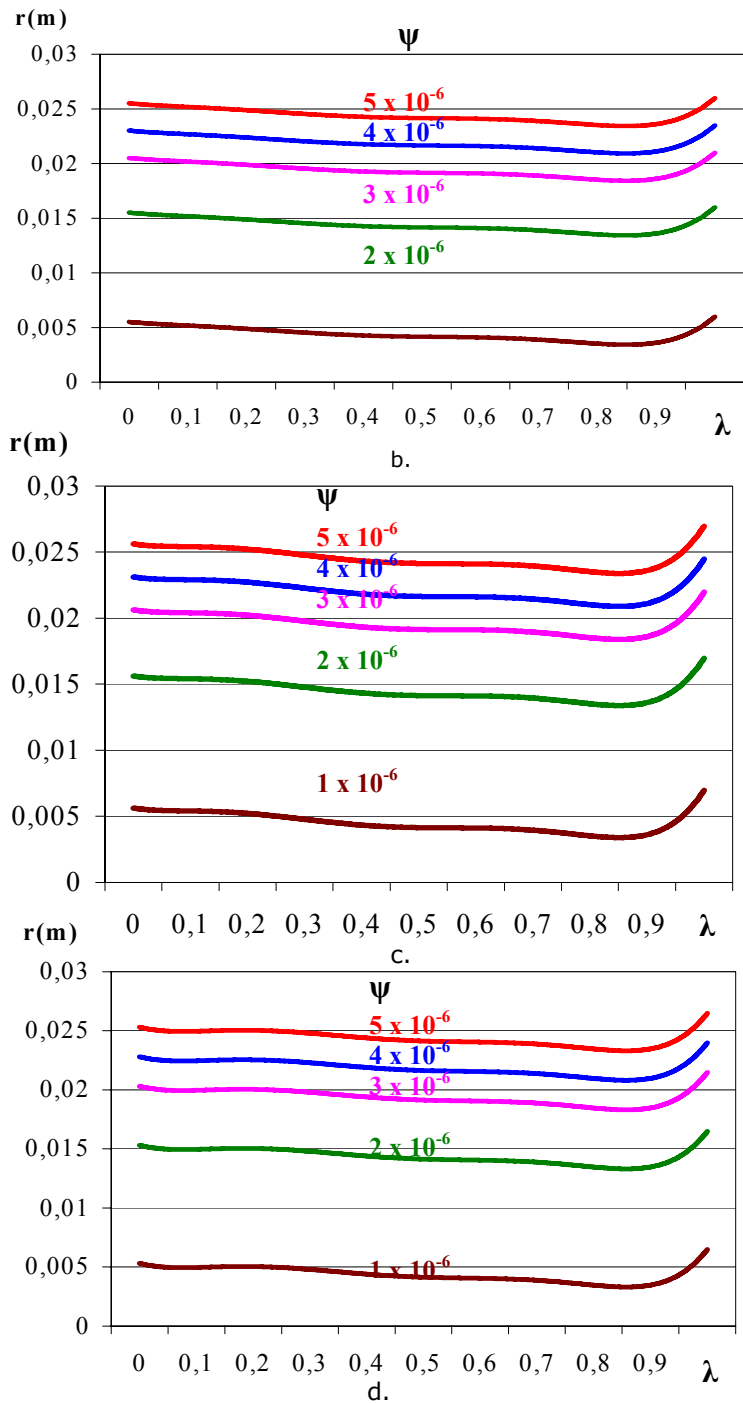


Fig. 4.23 Distribuția liniilor de curent în jetul plasmei de argon, pentru:
 a) $I=100$ A ($c=0,009$); c) $I=175$ A ($c=0,008$); b) $I=275$ A ($c=0,004$); d) $I=375$ A ($c=0,002$)

Conform figurii 4.23 liniile de curent în jetul plamei de argon sunt aproximativ identice atunci când $\lambda \in [0,0 \ 0,80]$. Modificări în aspectul acestora apar abia pentru $0,95 \leq \lambda \leq 1,0$.

Conform literaturii de specialitate [16] izotermele jetului de plasmă sunt exprimabile printr-o relație de forma:

$$T \cong \frac{(2P_r + 1)Q}{8\pi \cdot \rho \cdot C_p \cdot v \cdot r} \left(\frac{c}{1 + c - \lambda} \right)^{2P_r} \quad [\text{K}] \quad (4.37)$$

unde:

- Q - puterea sursei transferată plamei,
- C_p - căldura specifică a plamei de argon la temperaturi de 10 000 K: $C_p = 4000 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$

- P_r - numărul lui Prandtl, calculabil cu formula:

$$P_r = \frac{\eta \cdot C_p}{\chi} = 1,856 \quad (4.38)$$

unde:

- η - vâscozitatea plamei de argon la temperaturi de 10 000 K: $\eta = 2,9 \cdot 10^{-4} \text{ kg/s}\cdot\text{m}$
- χ - conductibilitatea termică a plamei la temperaturi de 10 000 K: $\chi = 0,625 \text{ J/s}\cdot\text{m}\cdot\text{K}$.

Puterea transferată de sursa de curent în jetul de plasmă este Q . Pentru un factor de conversie de cca 10 %, puterea Q în funcție de intensitatea I a curentului prin jetul de plasmă are valorile din tabelul 4.6.

Tabel 4.6 Puterea transferată de la sursă la jetul de plasmă pentru diverși curenți prin jet

I [A]	100	175	275	375
Q [W]	400	612,5	972,5	1025

În lungul axei jetului de plasmă ($r=1$) temperatura calculată (cu relația (4.37)) a jetului de plasmă, T_0 , are valoarea:

$$T_0 = 32,2 \cdot Q \quad [\text{K}] \quad (4.39)$$

Pentru calcularea acestei valori a fost considerat numărul lui Prandtl: $P_r=1,856$.

Considerând că distribuția T a temperaturii pe secțiunea transversală a jetului de plasmă este exprimabilă prin relația:

$$T = T_m + T_0 \left[1 - \left(\frac{x}{R} \right)^2 \right] \quad [\text{K}] \quad (4.40)$$

unde T_m este temperatura inițială a argonului (300 K), atunci, pentru T_0 , calculat anterior distribuția arată ca în figura 4.24.

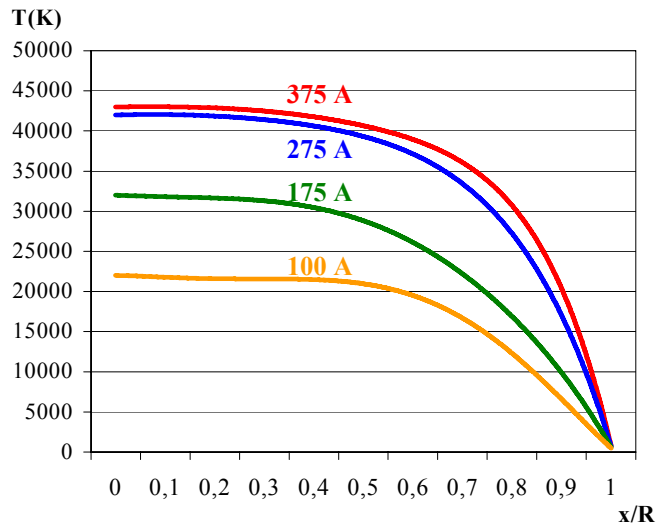


Fig. 4.24 Valorile temperaturii T în puncte x/R de pe secțiunea transversală a jetului plasmă

4.2.2.2 Modelarea matematică a fenomenului de pulverizare a metalului solid

Diametrul duzei de constrângere din este de 0,003 m. Pentru un coeficient de ocupare a ajutorului de 75%, rezultă ca diametrul coloanei jetului de plasmă este 0,00225 m. Atunci, pentru puteri în jetul de plasmă cuprinse între 4000 W și 10250 W (corespunzătoare domeniului de existență a curentului $I[A] \in [100, 375]$) rezultă densități de putere în plasmă cuprinse între 945 MW/m² și 2422 MW/m². Pentru asemenea valori ale densității de putere, porțiunea din piesa introdusă în plasmă cu viteza v_t se topește.

Dacă energia cinetică a jetului de plasmă este mai mare sau cel puțin egală cu energia superficială a topiturii, metalul piesei introdusă sub jet este transformat în picături. Matematic, condiția enunțată are forma:

$$0,5\rho \cdot v_j^2 \geq \frac{4\sigma}{d_p} \quad (4.41)$$

unde:

- σ - tensiunea superficială a topiturii de fier $\sigma = 1,2$ N/m
- d_p - diametrul picăturii [m]

Diametrul maxim al picăturii se obține din condiția (4.41) și are forma:

$$d_{\max} = \frac{8\sigma}{\rho \cdot v_j^2} \quad [\text{mm}] \quad (4.42)$$

Din expresiile (4.34) și (4.40) se obține distribuția dimensională a picăturilor pe secțiunea transversală a jetului de plasmă și are forma grafică din figura 4.25.

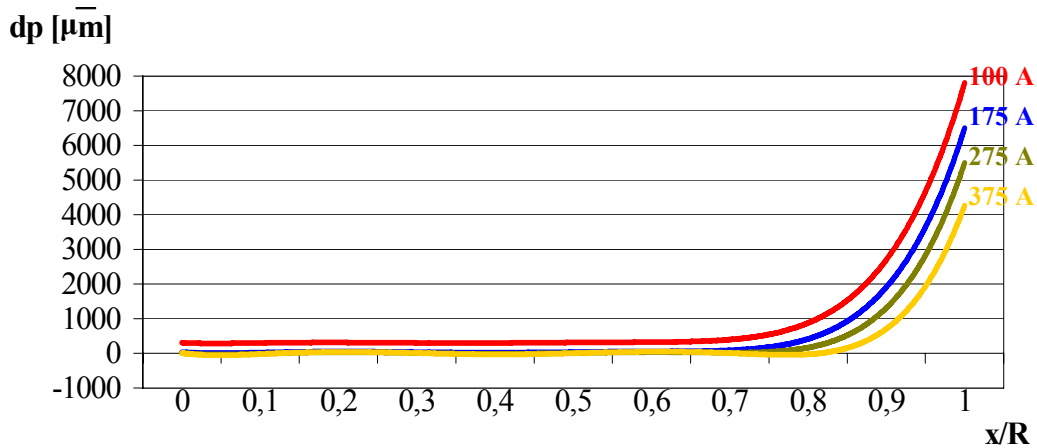


Fig. 4.25 Valorile diametrului d_p al picăturilor de metal în puncte x/R de pe secțiunea jetului

Se observă din figura 4.25 că picăturile sunt polidisperse. Diametrul lor scade sensibil cu creșterea curentului I . În schimb, diametrul picăturilor crește pentru $x \rightarrow R$. Neglijând cantitatea de metal topit care ajunge în stare de vapori, se poate scrie o ecuație de conservare a masei. În această ecuație se identifică metalul topit cu metalul transformat în picături:

$$2 d_{\max}^2 \rho_p n_d = 3 d_t^2 \rho_m v_t \quad (4.43)$$

unde:

- n_p - numărul de picături generate pe unitate de timp,
- ρ_m - densitatea metalului piesei
- ρ_p - densitatea metalului picăturii
- v_t - viteza cu care avansează piesa supusă topirii.

Din această ecuație se obține:

$$n_p = \frac{3 d_t^2 \rho_m v_t}{2 d_d^2 \rho_p} \quad (4.44)$$

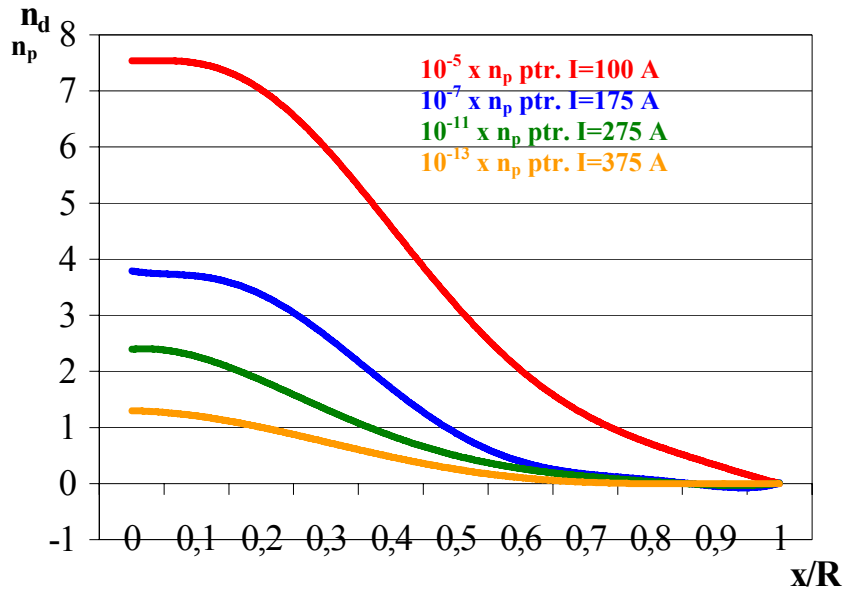
Pentru a calcula numărul picăturilor, n_d , se utilizează valorile din tabelul 4.7.

Tabel 4.7 Elementele considerate în calculul modelului matematic

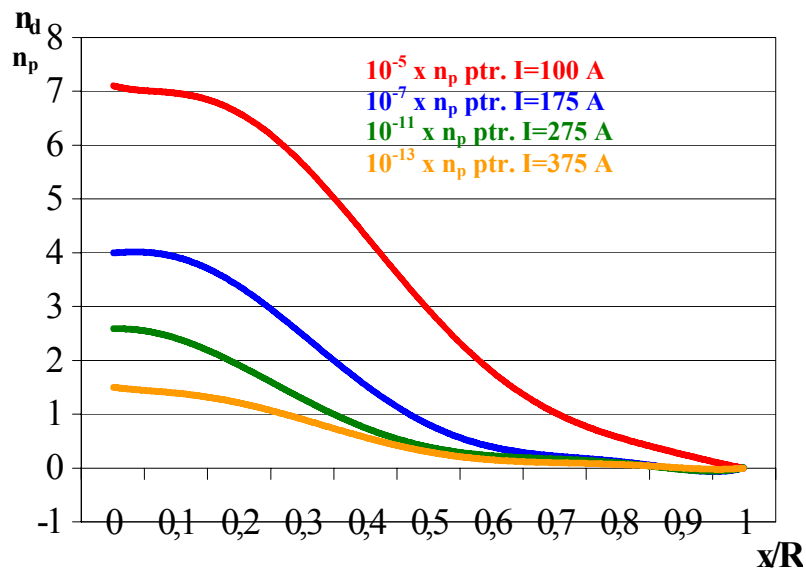
Element cuantificabil	geometric/structural/de sistem	Simbol	Valoare
Diametrul coloanei de plasmă		d_t	0,003 m
Densitatea metalului piesei		ρ_m	7,800 kg/m ³
Densitatea metalului picăturii		ρ_p	6,700 kg/m ³

Pentru diverse valori ale curentului prin jetul de plasmă, în diferite puncte x/R de pe secțiunea transversală a jetului de plasmă, numărul de picături este

prezentat în figura 4.26. Se observă din figura 4.26 că numărul de picături, n_p , crește sensibil cu creșterea curentului I și a vitezei de topire, v_t . În același timp numărul de picături, n_p , se micșorează spre zonele marginale ale jetului de plasmă, unde temperatura este mai scăzută.



a.



b.

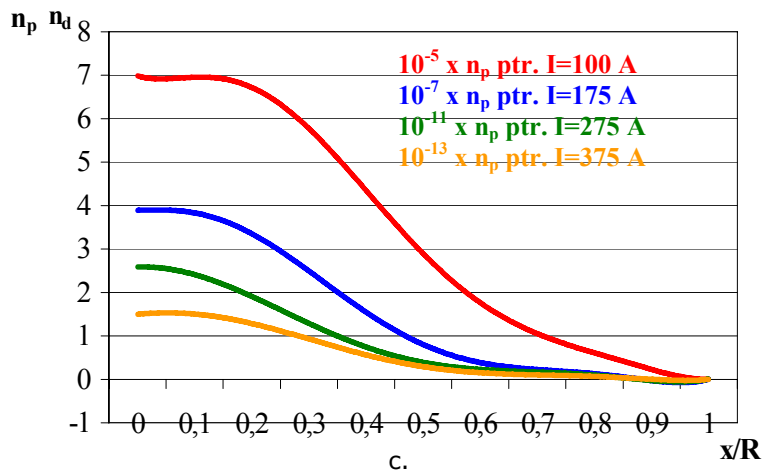


Fig. 4.26 Numărul de picături generate în diverse puncte x/R ale jetului de plasmă
a) $v_t = 0,001$ m/s; b) $v_t = 0,00125$ m/s; c) $v_t = 0,00150$ m/s.

4.2.2.3 Modelarea matematică a procesului de generare de nano- și microparticule sferice

Particulele cu dimensiuni micrometrice, pline în interior și cu formă sferică, se obțin în urma solidificării picăturilor la ieșirea din jetul de plasmă, într-o incintă de colectare. Pentru ca picăturile să fie sferice, condiția necesară și suficientă este ca tensiunea superficială a metalului picăturii să fie mai mare decât produsul dintre vâscozitatea metalului picăturii și viteza cu care evoluează jetul de plasmă:

$$\sigma > \eta \cdot v_j \quad (4.45)$$

Se notează cu β raportul dintre produsul vâscozității metalului picăturii și viteza cu care evoluează jetul de plasmă și tensiunea superficială a metalului picăturii (figura 4.27):

$$\beta = \frac{\eta \cdot v_j}{\sigma} < 1 \quad (4.46)$$

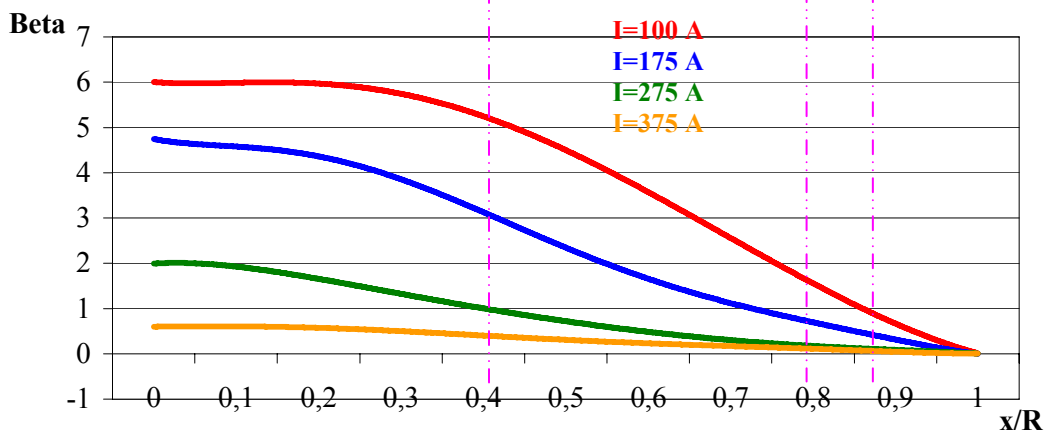


Fig. 4.27 Factorul β în diverse puncte ale jetului de plasmă

Se observă din figura 4.27 faptul că pentru curentul $I = 100$ A, indiferent de poziția în jetul de plasmă, se produc numai picături sferice. Comparativ, pentru celelalte valori ale curentului, numai în anumite domenii ale coloanei jetului de plasmă se obțin astfel de picături. Astfel:

- $I = 175$ A, $\beta < 1$ pentru $0,4 \leq x/R \leq 1$;
- $I = 275$ A, $\beta < 1$ pentru $0,83 \leq x/R \leq 1$;
- $I = 375$ A, $\beta < 1$ pentru $0,88 \leq x/R \leq 1$.

Zona axială a jetului de plasmă ($0,0 \leq x/R \leq 0,2$) are temperaturi de peste 10000 K, în funcție de intensitatea I a curentului prin jetul de plasmă (figura 4.27). Aici, picăturile cu dimensiuni $d_p \leq 10 \mu\text{m}$ se transformă instantaneu în vapori. Pentru viteze n_d de generare a picăturilor, bine alese, concentrația molară C_0 a vaporilor este mult mai mică comparativ cu concentrația molară a amestecului format din gaz și vapori. Rezultă că vaporii pot fi asimilați unui gaz ideal. Se consideră faptul că transformarea picăturii în vapori se realizează la presiune constantă. Atunci, din legea transformării izobare, diametrul echivalent al sferei cu vapori este:

$$d_0 = d_p \cdot \sqrt[3]{\frac{T}{T_{\text{metal_lichid}}}} \quad [\text{mm}] \quad (4.47)$$

unde T este temperatura vaporilor, considerată egală cu cea a plasmei, iar $T_{\text{metal_lichid}} = 1800$ K [73] este temperatura metalului lichid.

Pentru valori ale diametrului d_p din figura 4.25, introduse în expresia (4.46) se obțin valorile pentru diametrul echivalent al sferei cu vapori $d_0 = d_0(x/R)_I$ (figura 4.28).

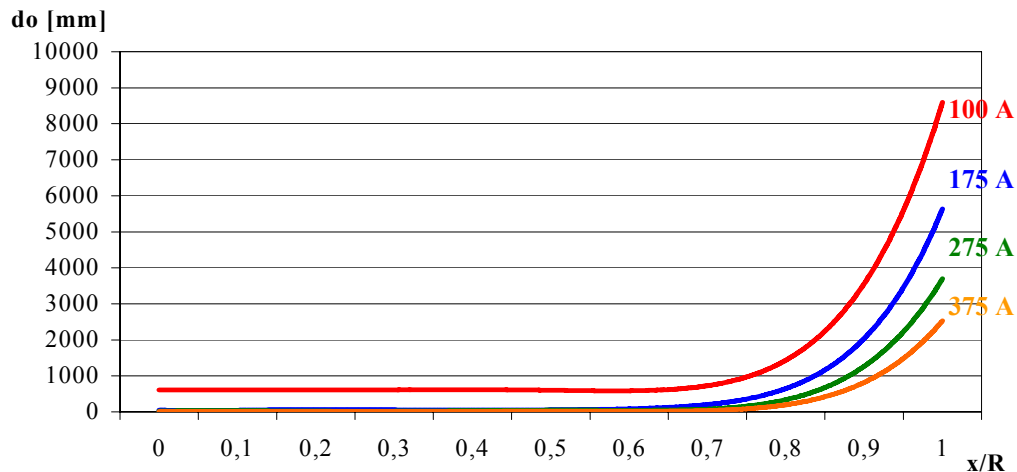


Fig. 4.28 Variația diametrului echivalent al sferei cu vapori, d_0 , în funcție de x/R , pentru diverse intensități ale curentului prin jetul de plasmă

Transportate de jetul de plasmă, sferile ajung în regiuni cu temperaturi apropiate sau egale cu cele ale "punctului de rouă". Pentru vaporii de fier, la presiuni apropiate de cele ale mediului de colectare ($\approx 0,15$ Mpa), temperatura punctului de rouă este $T_1 \approx 2000$ K [69]. La atingerea "punctului de rouă", interfața

sfera-gaz se transformă într-o membrană lichidă. Transformarea este izobară. Se poate deci obține diametrul membranei din legea transformării izobare:

$$d_e = d_0 \cdot \sqrt[3]{\frac{T_1}{T}} \quad [\text{mm}] \quad (4.48)$$

Se introduce în relația (4.48) valorile temperaturii din figura 4.24 și respectiv valorile diametrului echivalent d_0 din figura 4.28 și se obține diametrul membranei $d_e = d_e(x/R)_I$, sub forma graficelor din figura 4.29.

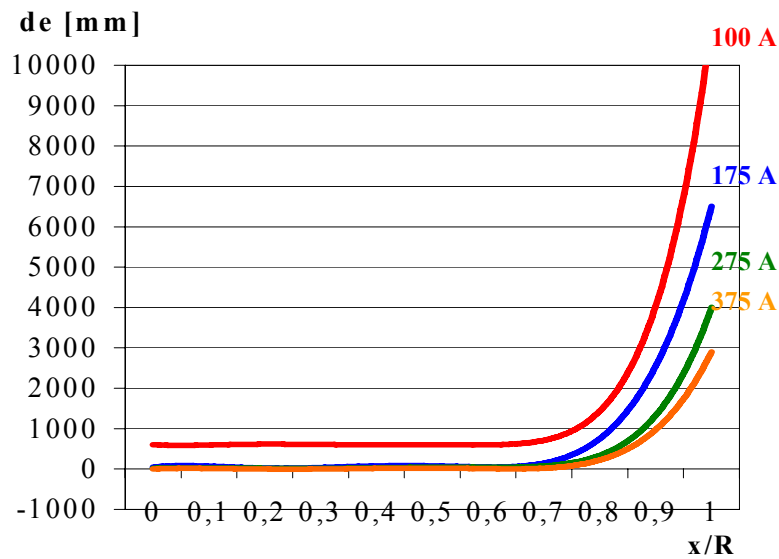


Fig. 4.29 Valori ale diametrului membranei picăturii, d_e , în puncte x/R de pe secțiunea transversală a jetului de plasmă,

Picăturile se formează prin topirea în jetul de plasmă a unei piese metalice. Experimentările derulate au utilizat drept piesă de topire o sârmă metalică având o compoziție chimică bine determinată, astfel încât să se obțină picături având dimensiuni controlate (figura 4.30).

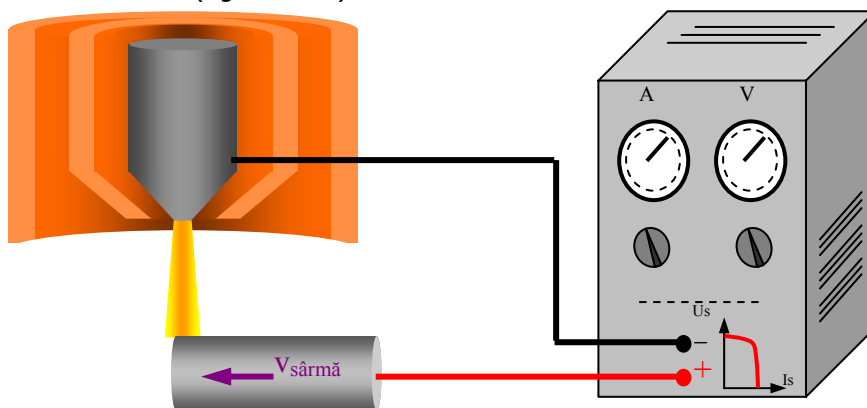


Fig. 4.30 Schema de principiu a sistemului plasmă-sârmă utilizat în experimentări

În cadrul experimentărilor s-a utilizat polaritatea directă, adică polul „-” al sursei a fost montat pe electrodul din aliaj de wolfram, iar polul „+” a fost montat pe sârma care a fost supusă topirii. Sârma a fost parcursă de un curent având valori de sute de amperi (între 80...400 A). Topirea sârmei s-a datorat atât acțiunii directe a arcului de plasmă, cu transfer direct de căldură prin convecție și radiație, cât și efectului Joule la trecerea curentului prin sârma respectivă. Energia introdusă în material a condus la o încălzire a metalului din care era confecționată sârma, încălzire care a generat topirea sârmei. În funcție de energia introdusă topitura a avut diverse forme extrem de importante pentru dimensiunile viitoarei picături de metal, interesul fiind obținerea unor picături cu dimensiuni în domeniul nanometric sau cel mult în domeniul micrometric.

Bilanțul energetic specific topirii piesei metalice de forma sârmei poate fi scris pornind de la ideea lui unor cercetători [62] care au propus un model matematic al topirii sârmei la sudarea MIG/MAG standard, model menit a aprecia stabilitatea procesului de topire. Acest model [62] se bazează pe studiul variației entalpiei cu densitatea de curent. Acceptând această abordare și în cazul sistemului de topire utilizat în experimentările proprii, se poate scrie (figura 4.31):

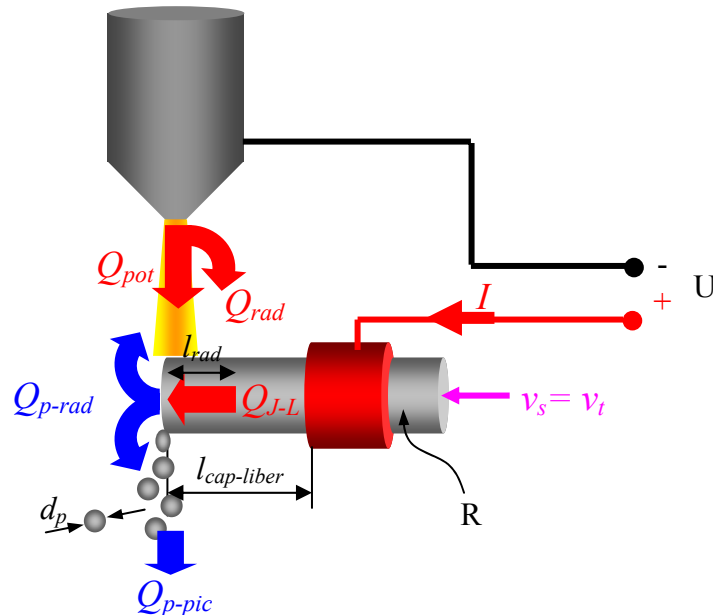


Fig. 4.31 Bilanțul energetic în zona de emisie a picăturilor

$$Q_t = Q_J + Q_{pot} + Q_{rad} - Q_{p-rad} - Q_{p-pic} \quad (4.49)$$

unde:

- Q_t - căldura necesară topirii sârmei și detașării picăturii, [W],
- Q_J - căldura degajată prin efect Joule, [W],
- Q_{pot} - căldura degajată datorită existenței diferenței de potențial electric, [W],
- Q_{rad} - căldura transferată de la arc de plasmă la sârma, prin radiație, [W],
- Q_{p-rad} - căldura pierdută prin radiație, [W],
- Q_{p-pic} - căldura pierdută prin picăturile de metal lichid emise, [W].

Utilizând entalpiile, conform literaturii de specialitate [62], se obține:

$$H_t = H_j + U \cdot \frac{j}{v_t} + \frac{Q_{rad}}{V_{rad}} - \frac{Q_{p-rad}}{V_{rad}} - \frac{Q_{p-pic}}{V_{pic}} \quad (4.50)$$

unde:

- H_t - entalpia totală necesară topirii sârmei și detașării picăturii, [J/mm³],
- U - potențialul constant de la capătul sârmei care produce încălzirea, [V],
- H_j - entalpia produsă de încălzirea prin efect Joule, [J/mm³],
- j - densitatea de curent pe secțiunea sârmei, [A/mm²],
- v_t - viteza de topire egală cu avansul sârmei, [mm/s],
- Q_{rad} - căldura primită prin radiație de la arcul de plasmă, [J],
- V_{rad} - volumul capătului sârmei încălzit prin radiație, [mm³],
- Q_{p-rad} - căldura pierdută prin radiație în atmosferă, [J],
- Q_{p-pic} - căldura pierdută prin emiterea de picături de metal topit [J],
- V_{pic} - volumul picăturii emise, [mm³]

$$H_t = \frac{R \cdot I^2 \cdot t}{\frac{\pi \cdot d_s^2}{4} \cdot l_{cap-liber}} + U \cdot \frac{j}{v_t} + \frac{Q_{rad}}{\frac{\pi \cdot d_s^2}{4} \cdot l_{rad}} - \frac{Q_{p-rad}}{\frac{\pi \cdot d_s^2}{4} \cdot l_{cap-liber}} - \frac{Q_{p-pic}}{\frac{\pi \cdot d_p^3}{6}} \quad [\text{J/mm}^3] \quad (4.51)$$

unde:

- R - rezistența electrică a sârmei supusă topirii, [Ω],
- I - curentul prin arcul de plasmă [A],
- t - durata trecerii curentului prin sârma supusă topirii [s]
- d_s - diametrul sârmei supusă topirii, [mm],
- $l_{cap-liber}$ - lungimea porțiunii de sârmă cuprinsă între punctul de contact electric și capătul supus încălzirii [mm],
- l_{rad} - lungimea porțiunii de sârmă încălzită prin radiație de la arcul de plasmă [mm],

De-a lungul capătului liber variația entalpiei este:

$$\frac{dH_t}{dt} = \rho_e \cdot j^2 \quad (4.52)$$

unde $\rho_e = \rho_e(H)$ reprezintă rezistivitatea materialului sârmei și integrând în timp din momentul în care un element de sârmă intră în zona capătului liber și începe să se încălzească, t_0 și până în momentul topirii, t , se obține:

$$\int_{t_0}^{t_i} H_t dt = \int_{t_0}^{t_i} \left(\frac{R \cdot I^2 \cdot t}{\frac{\pi \cdot d_s^2}{4} \cdot l_{cap-liber}} + U \cdot \frac{j}{v_t} + \frac{Q_{rad}}{\frac{\pi \cdot d_s^2}{4} \cdot l_{rad}} - \frac{Q_{p-rad}}{\frac{\pi \cdot d_s^2}{4} \cdot l_{cap-liber}} - \frac{Q_{p-pic}}{\frac{\pi \cdot d_p^3}{6}} \right) dt \quad (4.53)$$

$$\int_{t_0}^{t_1} H_t dt = \int_{t_0}^{t_1} \left(\frac{R \cdot I^2 \cdot t}{\pi \cdot d_s^2 \cdot l_{cap-liber}} \right) dt + \int_{t_0}^{t_1} \left(U \cdot \frac{j}{v_t} \right) dt + \int_{t_0}^{t_1} \left(\frac{Q_{rad}}{\pi \cdot d_s^2 \cdot l_{rad}} \right) dt - \int_{t_0}^{t_1} \left(\frac{Q_{p-rad}}{\pi \cdot d_s^2 \cdot l_{cap-liber}} \right) dt - \int_{t_0}^{t_1} \left(\frac{Q_{p-pic}}{\pi \cdot d_p^3} \right) dt \quad (4.54)$$

$$\int_{t_0}^{t_1} H_t dt = \frac{4 \cdot R \cdot I^2}{\pi \cdot d_s^2 \cdot l_{cap-liber}} \cdot \int_{t_0}^{t_1} t dt + \frac{U \cdot j}{l_{cap-liber}} \cdot \int_{t_0}^{t_1} t dt + \frac{4}{\pi \cdot d_s^2 \cdot l_{rad}} \cdot \int_{t_0}^{t_1} Q_{rad} dt - \frac{4}{\pi \cdot d_s^2 \cdot l_{cap-liber}} \cdot \int_{t_0}^{t_1} Q_{p-rad} dt - \frac{6}{\pi \cdot d_p^3} \cdot \int_{t_0}^{t_1} Q_{p-pic} dt \quad (4.55)$$

ecuație din care se poate determina cantitatea de căldură necesară topirii sârmei.

4.2.2.4 Experimentări de elaborare de nano- și microparticule de fier în jet de plasmă

Experimentările de elaborare de nano- și microparticule s-au situat continuu sub semnul controlării modului de topire a metalului sârmei. Acest control a fost posibil cunoscând evoluția volumului de metal supus topirii din momentul intrării în zona de încălzire și până în momentul desprinderii picăturii formate prin topire. Modelarea acestei evoluții a fost strict necesară pentru dezvoltarea cunoașterii modului de formare a picăturii. Pentru aceasta, s-a pornit de la binecunoscuta teorie conform căreia trecerea unui curent electric I printr-un fluid conduce la apariția densității volumice de forță electromagnetică [2], [47], [16]:

$$\vec{F}_{em} = \vec{j} \times \vec{B} \quad (4.56)$$

unde:

- j - vectorul densității de curent, [A/mm²];
- B - vectorul inducție magnetică generat de curentul electric I (figura 4.32), [T].

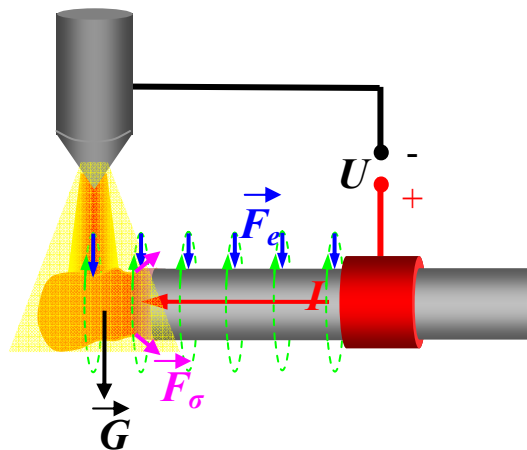


Fig. 4.32 Forțele care acționează asupra sârmei

Direcția forței electromagnetice \vec{F}_{em} este perpendiculară pe învelitoarea conductorului fluid. Efectul acestei forțe este apariția unei presiuni p date de relația:

$$p = p_o + \frac{\gamma}{R} + \mu_o \cdot j^2 \cdot \frac{R^2 - r^2}{4} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (4.57)$$

Procesul de topire și formare a picăturilor depinde de intensitatea curentului electric care trece prin conductor (figura 4.33 b.). Valoarea intensității curentului electric determină forma și dimensiunile picăturilor formate. [16].

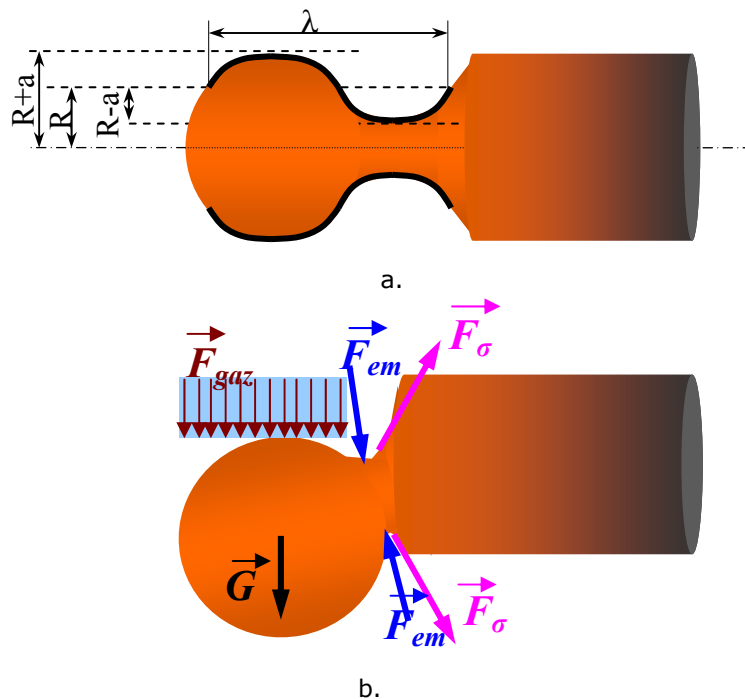


Fig. 4.33 Forma perturbată a coloanei de fluid;
a) elementele geometrice, b) forțele care acționează asupra metalului topit

Cercetătorii [16] au creat un model matematic al comportării conductorului fluid, acest model fiind cel mai complex model prezentat în literatura de specialitate. Cei doi autori au utilizat în modelare trei ipoteze de bază pentru a putea construi matematic starea fizică a procesului de topire:

- arcul de plasmă este un câmp termic izoterm;
- interacțiunea dintre plasma arcului și material este doar de natură termică;
- densitatea ρ a materialului transportat prin plasmă este independentă de temperatură.

Considerând un conductor cilindric fluid de rază R neparcurs de curenți electrici ($I=0$), se observă că sub acțiunea unor perturbații exterioare fluidul va suferi o modificare a razei r a coloanei, modificare cuantificată astfel:

- pentru cazul fluidelor staționare:

$$r = R + a \cdot \cos\left(\frac{2\pi \cdot z}{\lambda}\right) \quad [\text{mm}] \quad (4.58)$$

▪ pentru cazul fluidelor nestaționare [16]:

$$r = R + a \cdot \cos\left(-m\theta + \frac{2\pi \cdot z}{\lambda}\right) [\text{mm}] \quad (4.59)$$

4.2.2.5 Elaborarea nano- și micropulberilor prin pulverizare în jet de plasmă

Cunoscând aceste aspecte a fost posibilă alegerea unor seturi de parametri ai procesului de generare a plasmei care să asigure obținerea unor particule cu dimensiuni controlate.

Programul experimental de elaborare a nano- și microparticulelor magnetizabile în jet de plasmă este prezentat în figura 4.34.

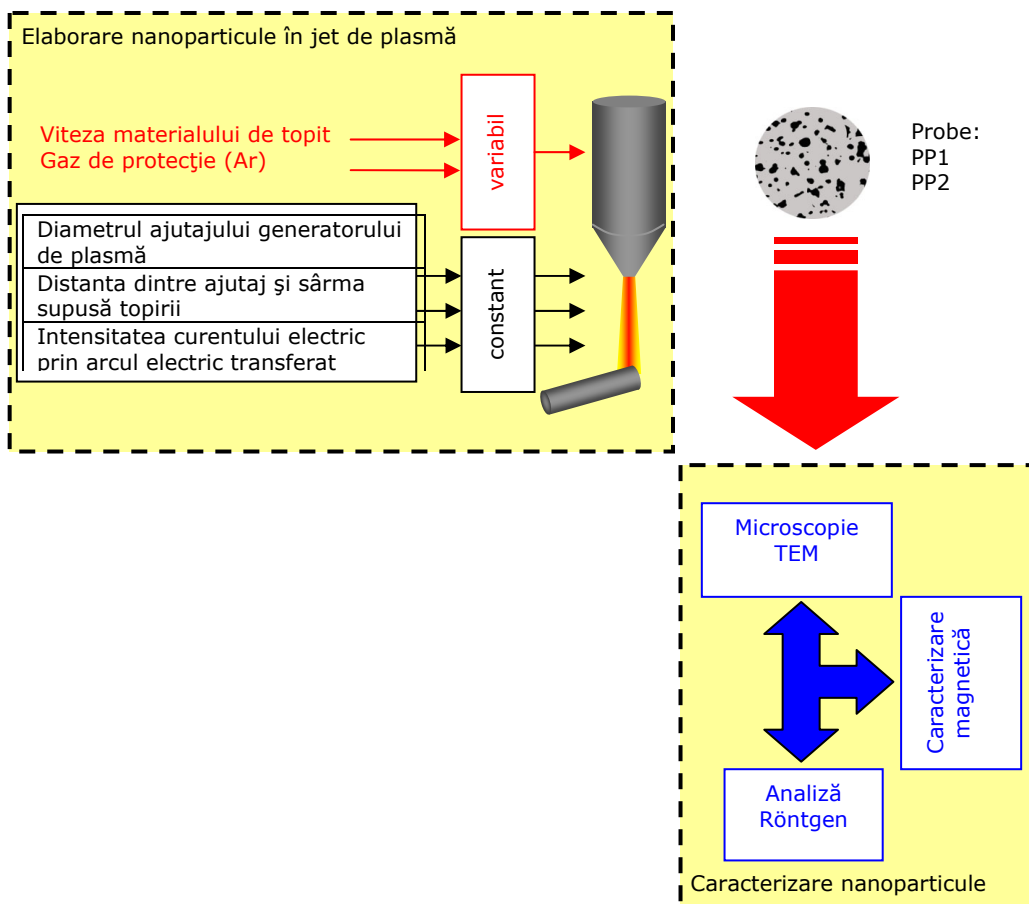


Fig. 4.34 Programul experimental de elaborare a nano- și microparticulelor în jet de plasmă

Standul experimental utilizat a fost constituit dintr-o instalație destinată tăierii cu plasmă, instalație modificată în sensul adaptării la procesul de elaborare de nano- și microparticule. Schema de principiu a sistemului complet de producere a nano- și microparticulelor este prezentată în figura 4.35.

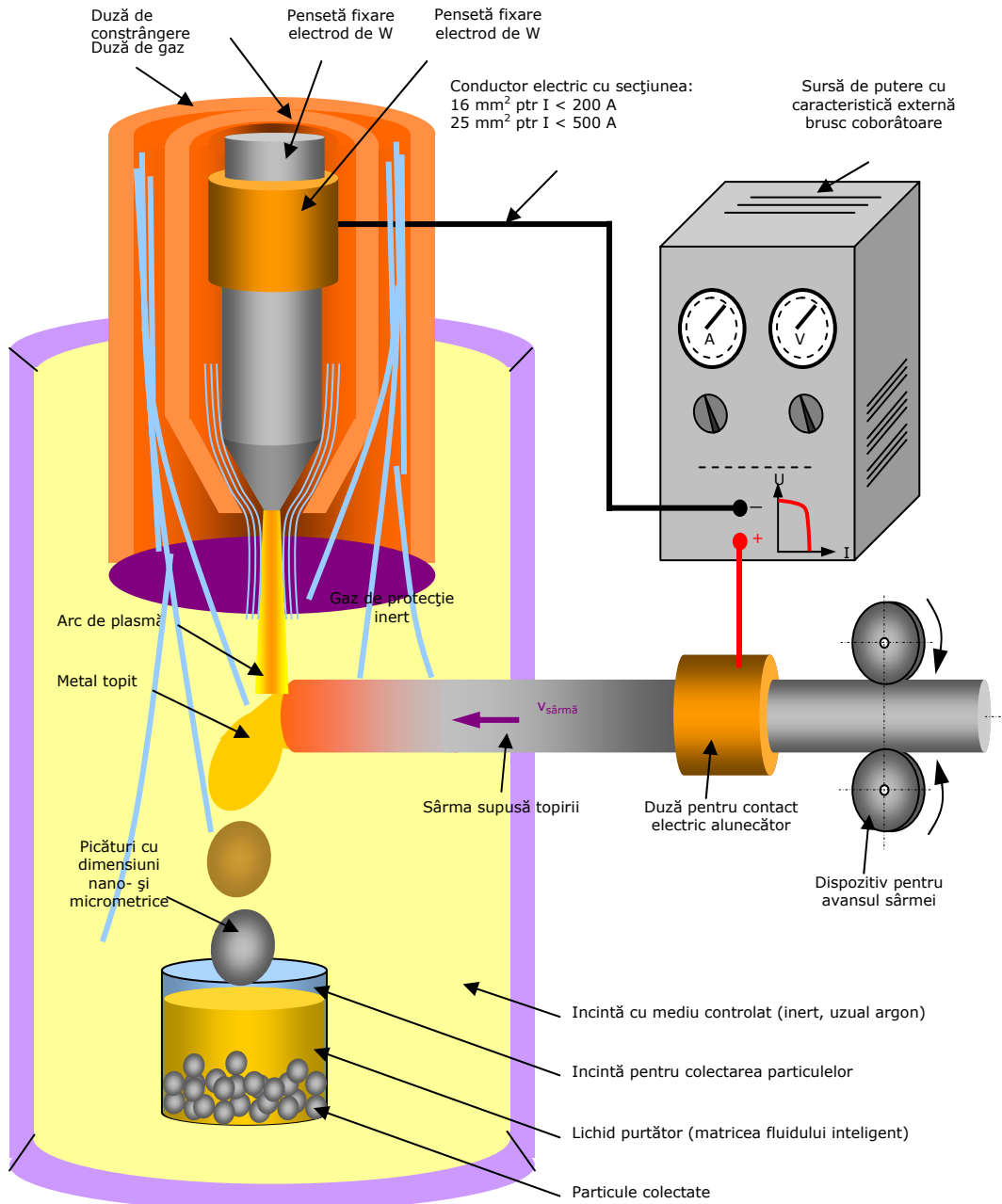


Fig. 4.35 Schema de principiu a procesului de elaborare de nano- și microparticule

Dorindu-se obținerea unor particule din fier sau din oxid de fier care pot conduce la realizarea unui fluid magnetizabil, sârma utilizată a fost o sârmă uzuală pentru sudarea sub strat de flux oțelurilor nealiate, având diametrul $d = 3,2 \text{ mm} \pm 10\%$. Compoziția chimică a oțelului din care este confecționată sârma respectivă, în procente masice, este prezentată în tabelul 4.8.

Tabel 4.8 Compoziția chimică a sârmei utilizate pentru topire

Compoziția chimică a sârmei [%]						
Element chimic	C	Mn	P	S	Si	Fe
Procent masic	0,19	10,85	0,045	0,045	0,40	88,47

Sistemul de avans al sârmei proiectat separat și atașat instalației de producere a plasmă tehnice permite introducerea uniformă și controlată, din punct de vedere al vitezei, a sârmei metalice în arcul sau în jetul de plasmă. Viteza de avans este reglabilă continuu între $0,002 \text{ m/s} \pm 1\%$ și $0,015 \text{ m/s} \pm 1\%$.

Gazul de protecție și gazul plasmagen sunt introduse în generator din butelii specifice, prin intermediul unor reductoare de presiune cu debit reglabil. Gazul utilizat este argonul, alegerea aceasta fiind făcută în baza considerentului că este cel mai ieftin gaz inert cu un potențial de ionizare scăzut. Debitul de argon poate fi reglat continuu între $0,0001 \text{ m}^3/\text{s} \pm 5\%$ și $0,001 \text{ m}^3/\text{s} \pm 2\%$, la o presiune constantă de $1,5 \times 10^5 \text{ N/m}^2$.

Generatorul de plasmă este prevăzut cu stabilizare laminară și este răcit cu apă. Sursa de curent (figura 4.36) este specifică sudării și tăierii cu plasmă, în sensul funcționării după o caracteristică externă brusc coborâtoare, și poate produce un curent de maxim 350 A. Dispozitivul pentru elaborarea de nanoparticule este prezentat în figura 4.37. [130]



Fig. 4.36 Sursa de curent Techno Crats 400 SQ



Fig. 4.37 Dispozitiv elaborare nanoparticule

Caracteristicile sursei de sudare WIG utilizate în cadrul experimentărilor sunt următoarele:

- curent de sudare: 400 A durată de utilizare 60 %
- tensiune de sudare: 10 – 26 V cc

Condițiile de realizare ale experimentului sunt prezentate în tabelul 4.9:

Tabel 4.9 Condițiile de realizare a experimentului (proba PP1)

Experimentul nr. 1	
Diametrul ajutorului generatorului de plasmă	0,003 m±5%
Distanța dintre ajutoraj și sârma supusă topirii	0,005m ±10%
Intensitatea curentului electric prin arcul electric transferat	175 A ±10%
Debitul argonului	0,00035 m ³ /s
Viteza inițială a sârmei	0,00125 m/s
Viteza finală a sârmei	0,0011 m/s

În baza rezultatelor obținute în analizele teoretice anterioare s-a decis faptul că parametrii de experimentare vor fi viteza sârmei, \bar{v} , și debitul gazului de protecție, D. În urma experimentelor de producere a nanoparticulelor în jet de plasmă la viteza inițială stabilită s-a observat faptul că procesul este instabil prezentând o topire parțială a sârmei. Metalul topit, în debit continuu, este transportat de jetul de plasmă și proiectat în vasul de colectare. Metalul topit solidificat se prezintă sub formă de microparticule în amestec cu diverse forme solidificate. Se prezintă în figura 4.38 pulbere cu topitură solidificată.

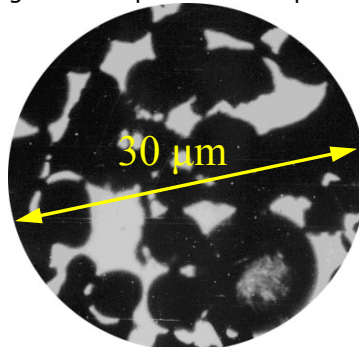


Fig. 4.38 Pulbere cu topitură solidificată

Soluția adoptată a fost de micșorare a vitezei de avans a sârmei la valoarea prezentată în tabelul 4.9. Se prezintă în tabelul 4.10 condițiile de realizare pentru experimentul nr. 2.

Tabel 4.10 Condițiile de realizare a experimentului (proba PP2)

Experimentul nr. 2	
Diametrul ajutorului generatorului de plasmă	0,003 m±5%
Distanța dintre ajutoraj și sârma supusă topirii	0,005m ±10%
Intensitatea curentului electric prin arcul electric transferat	175 A ±10%
Debitul argonului	1×10 ⁻³ m ³ /s
Viteza finală a sârmei	0,0011 m/s

S-au obținut particule sferice în proporție de 95 %. Prin mărirea debitului de argon, intensitatea curentului electric prin arcul de plasmă transferat se micșorează. Aceasta se datorează măririi densității de electroni în coloana arcului de plasmă, iar tensiunea pe arc crește. Drept urmare a adaosului energetic viteza

jetului de particule crește. Viteza plasmăi, în zona axială ($0 \leq x/R \leq 0,3$) are valori de maxim 800 m/s (figura 4.21), motiv pentru care diametrul picăturilor se micșorează de ~100 ori. În schimb, viteza de generare a picăturilor este de aproximativ 1000 ori mai mare (figura 4.26), comparativ cu situația în care curentul avea intensitatea $I=175$ A. Forma particulelor este sferică pentru $x/R \in [0,85;1,00]$. Se prezintă în figura 4.39 microparticule obținute în cadrul experimentului.

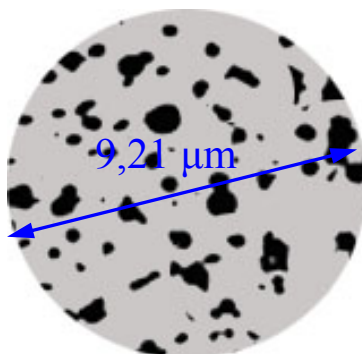


Fig. 4.39 Microparticule cu diametrul mediu de 9,21 μm

4.2.2.6 Caracterizarea nanopulberilor elaborate prin pulverizare în jet de plasmă

Analizând microsferile la microscopul optic se observă ca unele dintre acestea prezintă pori (din 450 microsferă analizate 35% au prezentat pori.). Microsfera medie are diametrul de aproximativ 10 μm și grosimea peretelui de 0,75 μm. Se prezintă în figurile 4.41 și 4.42 particulele sferice obținute în cadrul experimentului 2.

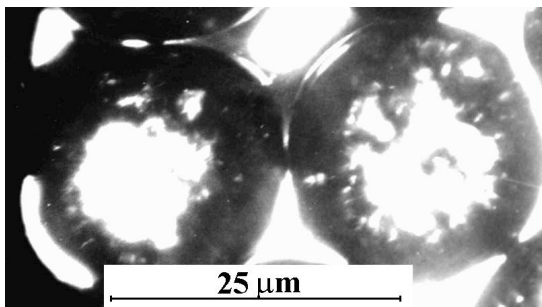


Fig. 4.41 Microsfere

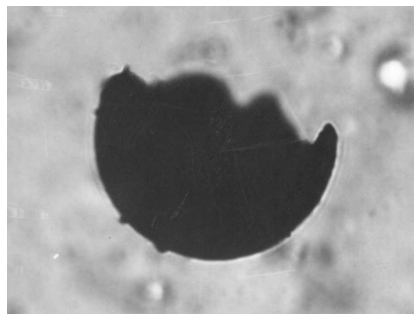


Fig. 4.42 Microsfere cu pori

Distribuția dimensională a particulelor arată ca în figura 4.40.

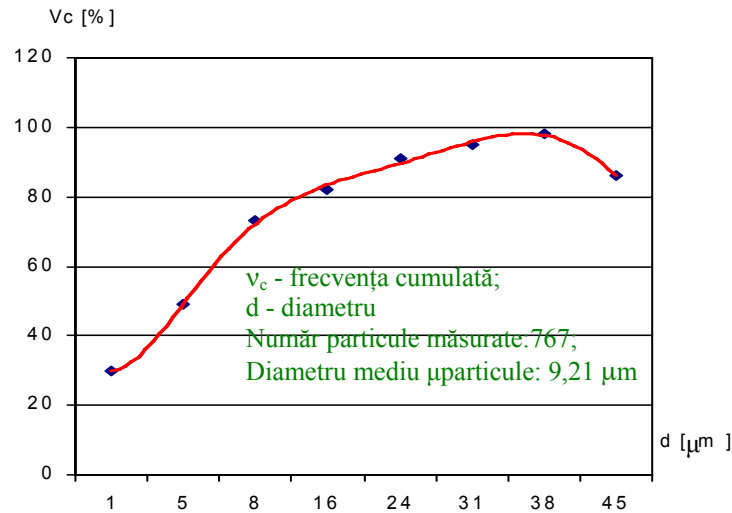


Fig. 4.40 Distribuția dimensională a particulelor

Supunând particulele unei vibrații ultrasonice într-o matrice lichidă, particulele floculate se desprind rezultând pulberi nanometrice cu dimensiunile prezentate în figura 4.43. Pentru un număr de 794 particule, cu dimensiunile din această figură, diametrul mediu al particulelor este de 11,65 nm la o abatere medie statistică de 2,141 nm.

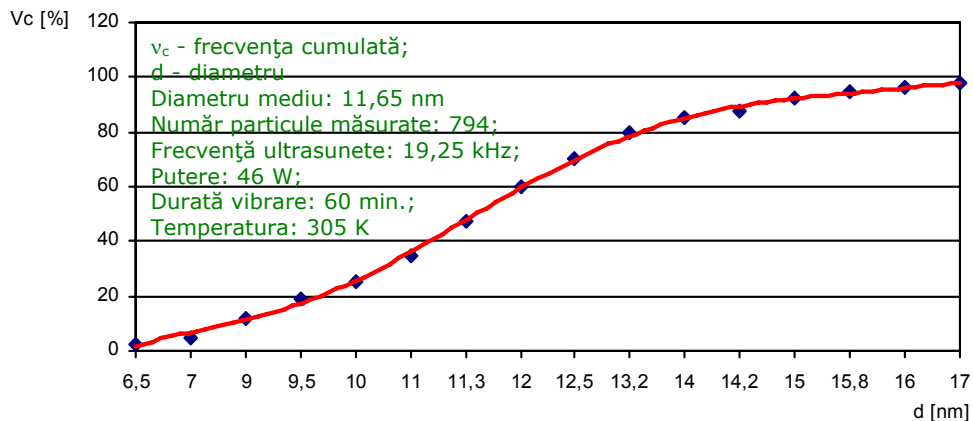


Fig. 4.43 Distribuția dimensională a particulelor vibrare ultrasonic în ulei mineral cu aditivi

Pulberea de fier, cu formele și dimensiunile precizate este colectată în mediu necontrolat (ambiant). La temperatura de solidificare suprafața particulelor se oxidează. Analiza Röntgen a acestor particule arată existența urmelor de Fe₃O₄ (figura 4.44). Modificând mediul de colectare dintr-unul oxidant într-unul inert (Ar + H₂, Ar + N₂) și controlându-l strict, oxidarea particulelor scade aproape la zero.

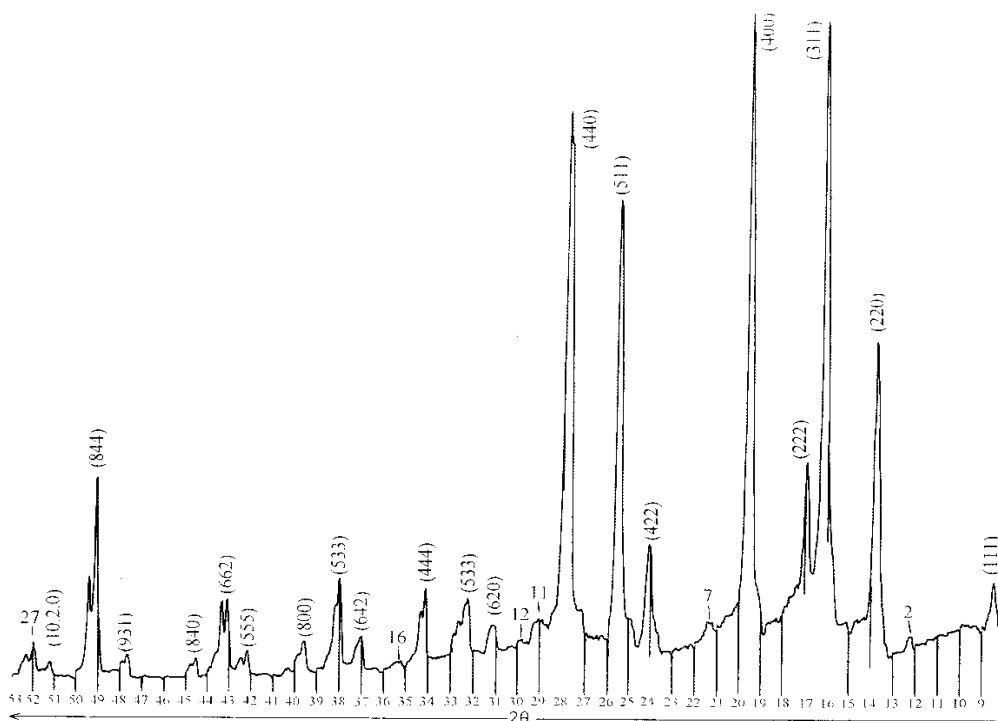


Fig. 4.44 Analiza Röntgen a particulelor elaborate în jet de plasmă, cu colectare fără controlarea mediului

Curbele de magnetizare și de histerezis sunt prezentate în Anexa 2. Se observă din aceste anexe că, la presiune atmosferică, din sârmă se pot obține particule polidisperse nano-micrometrice.

În final este posibilă emiterea următoarelor concluzii privind rezultatele experimentărilor de elaborare de particule în jet de plasmă:

- Este posibilă producerea de pulbere de fier cu dimensiuni nano-micrometrice prin pulverizarea unui metal solid în jet de plasmă
- Granulația pulberii de fier depinde de distribuția vitezelor pe secțiunea transversală a jetului de plasmă și respectiv de viteza de avans a materialului.
- Pulberea de fier obținută este polidimensională și magnetizabilă.
- Pentru micșorarea clasei dimensionale a pulberii este necesară uniformizarea vitezelor în jetul plasmei de argon.
- Colectarea pulberii de fier într-o incintă cu mediu controlat inert (amestecuri de gaze Ar +H₂, Ar +N₂) poate reduce gradul de oxidare a particulelor de fier.
- Prin vibrație ultrasonică în matrici lichide se evită aglomerarea nanoparticulelor fero- și feromagnetice, iar cuiburile de particule aglomerate sunt dezmembrate, particulele devenind independente.

În urma experimentărilor au fost obținute pulberi magnetice Fe₃O₄ cu următoarele caracteristici:

- forma particulelor este una sferică

- dimensiunile mediu al particulelor este de aproximativ 10 nm
- cantitatea obținută: 90 mg.

4.2.3 Elaborarea nano- și micropulberilor prin măcinare în mori planetare cu bile

4.2.3.1 Nanopulberi magnetice pe bază de ferită de Bariu tip W (FB-W)

Nanopulberile din ferită de Ba tip W au fost elaborate în vederea utilizării lor la realizarea de micro-sisteme magnetizabile (MRS) destinate fabricării de senzori și componente magnetice reologice ale MEMS, precum și pentru confecționarea de magneți ceramici permanenți. Pentru utilizarea nanopulberilor magnetice de ferită de Ba tip W la realizarea fluidelor inteligente cu comportare magnetică sunt necesare caracteristici magnetice specifice nanomaterialelor izotrope. Diferența dintre caracteristicile fizice ale pulberilor, necesare pentru realizarea fluidelor inteligente și cele necesare pentru confecționarea de magneți permanenți constă în următorul aspect: dimensiunile particulelor de pulberi nanometrice influențează caracteristicile magnetice ale acestora în sensul că în condiții de izotropie dimensiunile nanogranulelor pot fi oricât de mici (sub 100 μm) în cazul fluidelor inteligente, în timp ce pentru magneții anizotropi (permanenți) particulele de pulbere de ferită trebuie să se situeze în jurul nanodomeniului magnetic, care în cazul FB-W se situează între limitele (600...700 μm).

4.2.3.2 Elaborarea nano- și micropulberilor prin măcinare

Având în vedere restricțiile menționate anterior, pentru elaborarea nanopulberilor din FB-W destinate fabricării celor două categorii de materiale s-a apelat la un program experimental de elaborare de nanoparticule magnetizabile prin măcinare în mori de energie ridicată (mori planetare cu bile). Schema acestui program experimental este prezentată în figura 4.45.

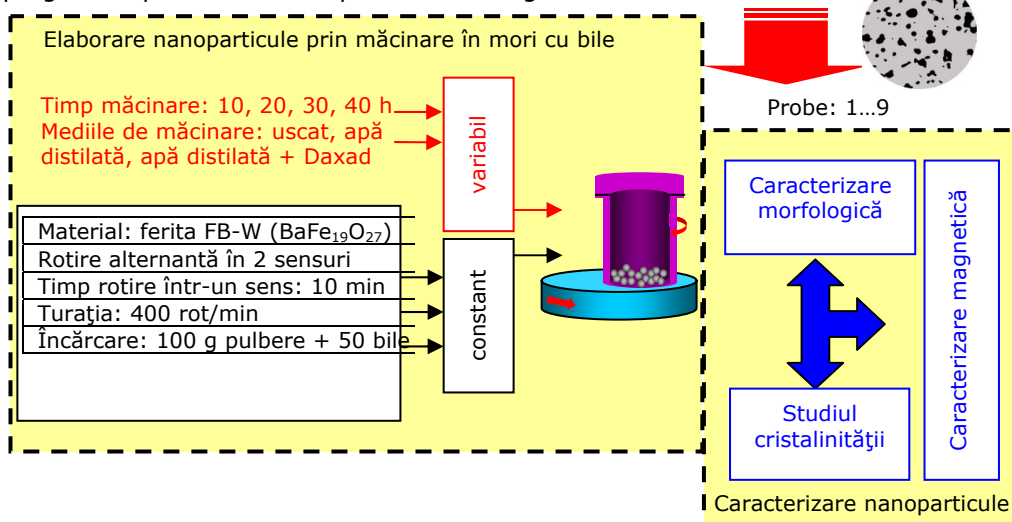


Fig. 4.45 Schema programului experimental de elaborare a nanoparticulelor în moara cu bile

Materialul supus măcinării a fost ferita FB-W ($\text{BaFe}_{19}\text{O}_{27}$) elaborată sub formă de pastile cilindrice cu diametrul de $\phi=12$ mm și înălțimea de 10 mm, având magnetizarea specifică la saturație $\sigma_s=21,40$ emu/g. Pentru măcinare, pastilele au fost dezintegrate timp de 1 oră într-o moară planetară cu bile. După dezintegrare, granulația pulberii obținută a fost de $500 \mu\text{m}$ iar magnetizarea $\sigma_s=20,73$ emu/g.

Pulberea dezintegrată a fost supusă la măcinare într-o moară planetară cu bile tip Fritsch Pulverisette 6 prezentată în figura 4.46.



Fig. 4.46 Moară planetară cu bile tip Fritsch Pulverisette 6

Condițiile de realizare ale experimentului de măcinare în moara cu bile sunt prezentate tabelul 4.11.

Tabel 4.11 Condițiile de realizare ale experimentului

Parametru proces	Turație	Timp rotire pe sens	Încărcare bol de măcinare	Timp de măcinare	Mediile de măcinare
Valoare	400 rot/min	10 min	100 g pulbere + 50 bile din oțel inoxidabil cu $\phi=10\text{mm}$	1. 10h, 2. 20 h, 3. 30 h, 4. 40 h	1. uscat, 2. apă distilată, 3. apă distilată + Daxad

Din cele 12 probe obținute au fost selectate pentru caracterizare 9 probe.

4.2.3.3 Caracterizarea nanopulberilor elaborate prin măcinare

4.2.3.3.1 Caracterizarea morfologică a nanopulberilor

Caracterizarea morfologică a nanopulberilor presupune cunoașterea următoarelor elemente:

- forma granulelor de nanopulbere (plată, aciculară, sferică, etc.);
- mărimea granulelor de nanopulbere;

- distribuția granulometrică a nanopulberii (fracțiile procentuale de granule pentru diferite intervale dimensionale).

Distribuția poate fi exprimată prin divizarea numărului total N de particule în grupuri ($\delta N_1, \delta N_2, \dots, \delta N_n$), astfel încât fiecare grup δN_i de particule se studiază ca dimensiuni într-un interval D_i , centrat pe o valoare a diametrului δD_i (1,2,3...n), toate particulele fiind considerate teoretic sferice.

Astfel, pot fi definite următoarele funcții de repartiție ce corespund următoarelor tipuri de distribuție:

- distribuție numerică $F(D_j) = \sum_i^j \delta \cdot N_i$;
- distribuție de lungime $F(D_j) = \sum_i^j D_i \cdot \delta \cdot N_i$;
- distribuție de suprafață $F(D_j) = \sum_i^j D_i^2 \cdot \delta \cdot N_i$;
- distribuție volumică $F(D_j) = \sum_i^j D_i^3 \cdot \delta \cdot N_i$.

Funcțiile de frecvență corespunzătoare tipurilor de distribuții enumerate anterior se exprimă prin valorile lor pe fiecare interval centrat pe valoarea D_i corespunzător grupului de particule δN_i ($i = 1, 2, \dots, n$) după cum urmează:

- distribuție numerică: $f_i = \delta N_i / N$: unde δN_i reprezintă numărul de particule al grupului centrat pe valoarea D_i a diametrului, iar N numărul total de particule.
- distribuție de lungime: $f_i = \delta L_i / L$: unde L_i reprezintă lungimea particulelor grupului δN_i , iar L lungimea totală a particulelor.
- distribuție de suprafață: $f_i = \delta S_i / S$: unde S_i reprezintă suprafața particulelor grupului δN_i , iar S suprafața totală a particulelor.
- distribuție volumică: $f_i = \delta V_i / V$: unde V_i reprezintă volumul particulelor grupului δN_i , iar V volumul totală al particulelor.

În analizele făcute s-a reprezentat distribuția volumetrică pe mai multe probe de pulbere la diferiți timpi de măcinare: 10h, 20h, 30h și 40 h.

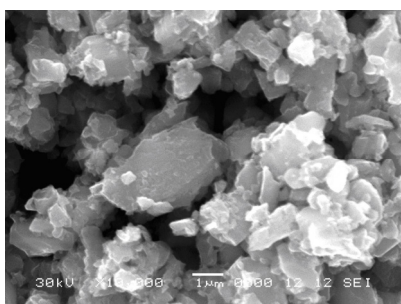
a. Caracterizarea morfologică a nanopulberilor obținute prin măcinare uscată

La măcinarea uscată s-au prelevat probe din moară după 10h, 20 h și 30 h de măcinare. Probele au fost analizate prin microscopie electronică SEM pentru stabilirea formei și a mărimii nanogranulelor de pulbere iar pentru distribuția granulometrică s-a utilizat un aparat de determinare pe baza timpului de sedimentare, tipul aparatului fiind MALVERN SIZER tip MASTERSIZER 2000 prezentat în figura 4.47.

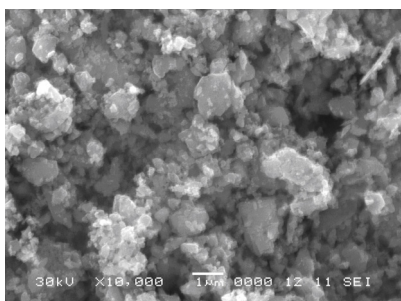
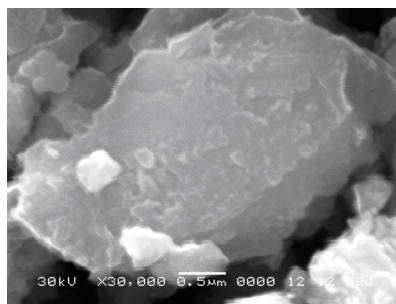


Fig. 4.47 Dispozitiv pentru determinarea distribuției granulometrice tip Mastersizer 2000

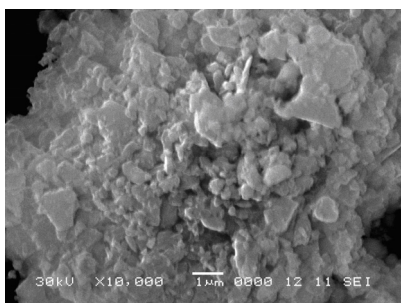
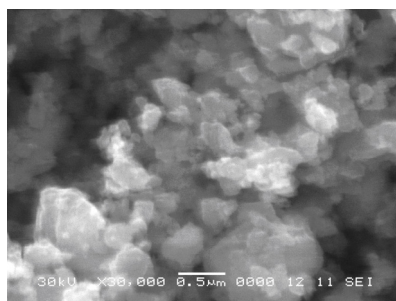
Microfotografiile granulelor de pulbere sunt redată în figura 4.48, iar curbele și datele privind distribuția granulometrică sunt redată în figura 4.49 a, b și c.



a) după 10 ore



b) după 20 ore



c) după 30 ore

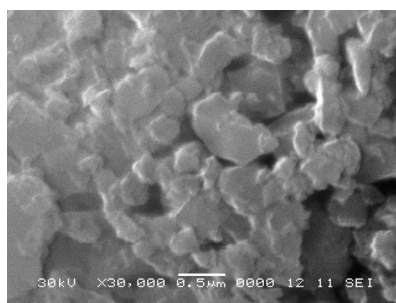


Fig. 4.48 Micrografii SEM ale pulberilor la măcinare uscată

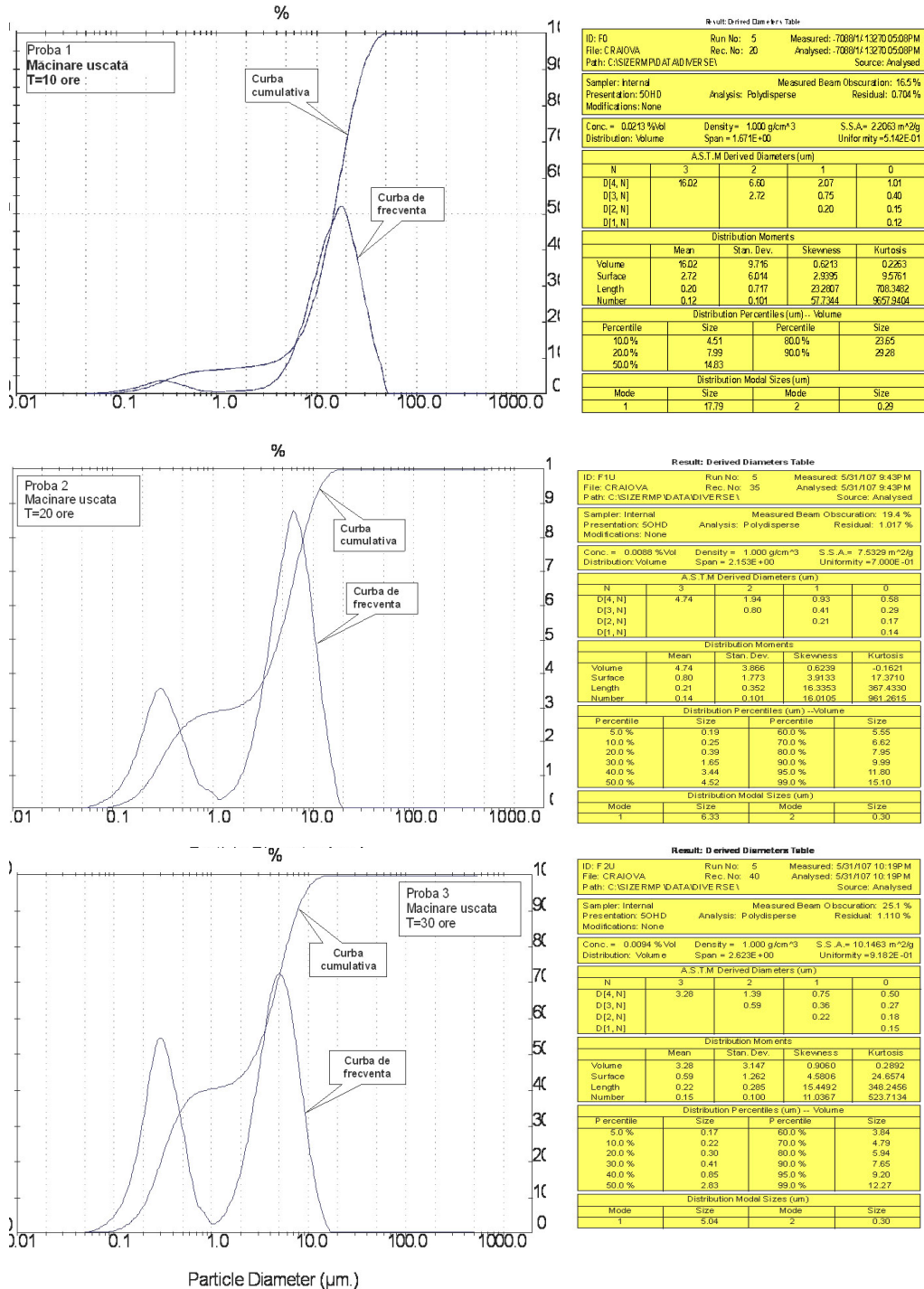


Fig. 4.49 Curbele și datele privind distribuția granulometrică

În ceea ce privește distribuția granulometrică conform datelor obținute rezultă următoarele:

- proba 1 (T =10h): se observă că pe curba de frecvență se întâlnesc două grupuri de particule ce se situează în intervalele [0,07 – 1,0] μm și [1,0 – 100,0] μm ; având diametrul mediu echivalent al volumului de $D[4,N] = 16,02 \mu\text{m}$. Din curba cumulativă reiese faptul că 10 % particule din volumul total au dimensiunea mai mică de 4,51 μm iar restul (90%) nu depășește 29,28 μm . Tot din curba de frecvență reies maximele (MODE – diametrul particulei pentru care funcția de frecvență a distribuției ia valoarea maximă): $\text{MODE1}=17,79 \mu\text{m}$ și $\text{MODE2}=0,29 \mu\text{m}$.
- proba 2 (T =20h): curba de frecvență corespunzătoare graficului acestei probe cuprinde două grupuri de particule ce se situează în intervalele [0,1 – 1,0] μm și [1,0 – 20,0] μm ; având diametrul mediu echivalent al volumului de $D[4,N] = 4,74 \mu\text{m}$. Din curba cumulativă reiese semnificația parametrilor D10, D50,....D99. D10 = 0,25 μm – volumul particulelor cu diametrul mai mic de 0,25 μm reprezintă 10 % din volumul total; D50 = 4,52 μm – volumul particulelor cu diametrul mai mic de 4,52 μm reprezintă 50 % din volumul total; D99 = 15,10 μm – volumul particulelor cu diametrul mai mic de 15,10 μm reprezintă 99 % din volumul total.
- proba 3 (T =30h): curba de frecvență corespunzătoare graficului acestei probe cuprinde două grupuri de particule ce se situează în intervalele [0,1 – 1,0] μm și [1,0 – 20,0] μm ; având diametrul mediu echivalent al volumului de $D[4,N] = 3,28 \mu\text{m}$. Din curba cumulativă reiese semnificația parametrilor D10, D50,....D99. D10 = 0,22 μm – volumul particulelor cu diametrul mai mic de 0,22 μm reprezintă 10 % din volumul total; D50 = 2,83 μm – volumul particulelor cu diametrul mai mic de 2,83 μm reprezintă 50 % din volumul total; D99 = 12,27 μm – volumul particulelor cu diametrul mai mic de 12,27 μm reprezintă 99 % din volumul total. Tot din curba de frecvență reies maximele: $\text{MODE 1} = 5,03 \mu\text{m}$, și $\text{MODE 2} = 0,3 \mu\text{m}$.

În urma procesului de măcinare uscată au fost obținute:

- granule de pulbere cu forma plată (sistem de cristalizare hexagonal).
- Dimensiunile particulelor se situează în intervalul 12 – 30 μm .
- Cantitatea obținută: 15 mg.

b. Caracterizarea morfologică a nanopulberilor obținute prin măcinare umedă

S-a practicat același regim de măcinare descris la punctul anterior. Rezultatele obținute sunt prezentate în figura 4.50.

Asemănător probelor rezultate la măcinarea uscată forma granulelor este plată iar în ceea ce privește mărimea lor, în figură sunt suprapuse graficele de distribuție granulometrică pentru proba 3 (nanopulbere rezultată prin măcinare uscată timp de 30 de ore) respectiv proba 5 (nanopulbere rezultată prin măcinare umedă timp de 30 de ore).

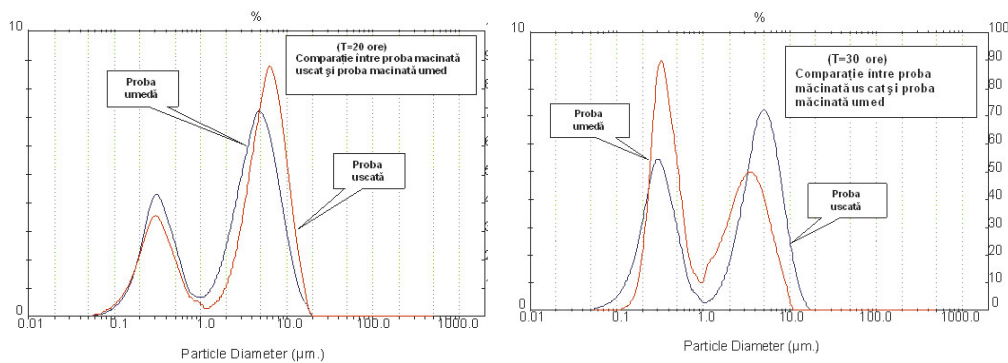
Referitor la distribuția granulometrică se constată următoarele:

- proba 4 (T =20h): curba de frecvență corespunzătoare graficului acestei probe cuprinde două grupuri de particule ce se situează în intervalele $[0,05 - 1,0]$ μm și $[1,0 - 10,0]$ μm ; având diametrul mediu echivalent al volumului de $D[4,N] = 3,66$ μm . Din curba cumulativă reiese faptul că 10 % particule din volumul total au dimensiunea mai mică de 0,25 μm iar restul (90%) nu depășește 8,21 μm . Tot din curba de frecvență reies maximele: MODE 1 = 4,76 μm , și MODE 2 = 0,3 μm . Diferența dintre cele două se observă prin scăderea diametrului mediu echivalent al volumului de la 16,02 μm la 3,66 μm ; o alta este aceea a maximelor de pe curba de frecvență maximul celei macinate 10h este 17,79 μm iar a celei macinate 20h este 4,76 μm .
- proba 5 (T =30h): din graficul corespunzător putem observa că pe curba de frecvență întâlnim două grupuri de particule ce se situează în intervalele $[0,1 - 1,0]$ μm și $[1,0 - 10,0]$ μm ; observăm îngustarea intervalului final de la 100 μm (pentru cea macinată 10h) la 10 μm (pentru cea măcinată 30h); având diametrul mediu echivalent al volumului de $D[4,N] = 1,93$ μm . Particulele sunt cuprinse între 0,26 μm (10% din volumul total) și 5,04 μm (90% din volumul total). Maximele de pe curba de frecvență: MODE 1 = 3,51 μm , și MODE 2 = 0,32 μm .

În urma procesului de măcinare uscată au fost obținute:

- granule de pulbere cu forma plată (sistem de cristalizare hexagonal).
- Dimensiunile particulelor se situează în intervalul 5 – 8 μm .
- Cantitatea obținută: 15 mg.

Analiza comparativă a pulberilor măcinate uscat și umed poate fi făcută suprapunând curbele de distribuie granulometrică corespunzătoare diferiților timpi de măcinare (20 de ore și 30 de ore) în cele două condiții de lucru (uscat și umed). În figura 4.52 este prezentată analiza comparativă a pulberilor obținute după 20 h și după 30 h de măcinare uscată respectiv umedă.



a) după 20 ore

b) după 30 ore

Fig 4.52 Comparație între probele măcinate uscat și umed

Din figura 4.52 rezultă două observații importante și anume:

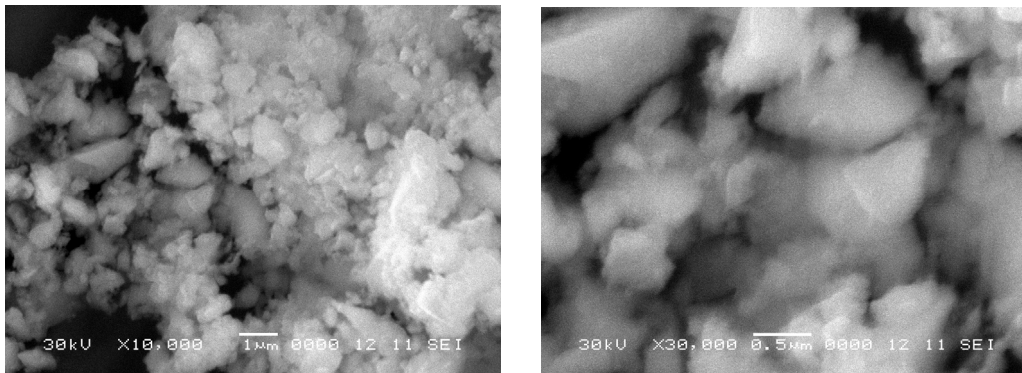
- pe toate curbele de distribuție granulometrică indiferent de condițiile de măcinare se identifică două intervale de frecvențe distincte și anume un interval nanometric (0,1-1,0 μm) și unul micrometric (1,0 - max. 100 μm);
- la începutul perioadei de măcinare (10, 20 ore) este favorabilă măcinarea uscată, iar peste 20 de ore devine eficientă măcinarea umedă. Acest lucru rezultă analizând frecvențele distribuției granulometrice la măcinarea uscată și umedă corespunzătoare timpilor de măcinare de 20 ore, respectiv 30 de ore când frecvențele sunt mai mari pentru măcinarea umedă.

Aceste aspecte sunt deosebit de importante din două puncte de vedere:

- din punct de vedere tehnologic ele indică faptul că pentru divizarea fină a FB-W este bine ca în primele 20 de ore de măcinare aceasta să se realizeze în mediu uscat iar în continuare să se practice măcinarea umedă;
- din punct de vedere calitativ este cunoscut faptul că proprietățile magnetice (câmpul coercitiv și remanența) sunt dependente de dimensiunile granulelor de pulbere. În consecință cunoscând compoziția dimensională a pulberii funcție de timpul de măcinare se pot separa fracții din primul sau cel de-al doilea interval granulometric funcție de necesități.

c. Caracterizarea morfologică a pulberilor rezultate la măcinarea cu lichid aditivat

În figura 4.53 sunt redate formele și dimensiunile granulelor de pulbere obținute la măcinarea cu lichid aditivat.



a) după 20 ore

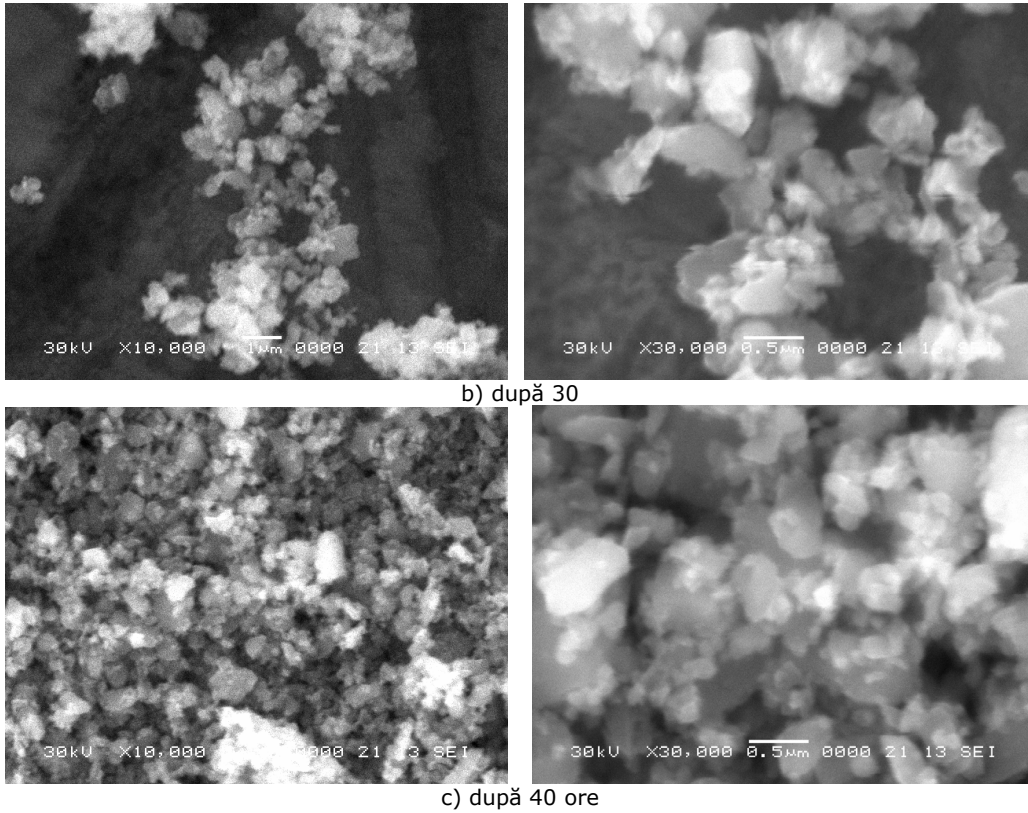
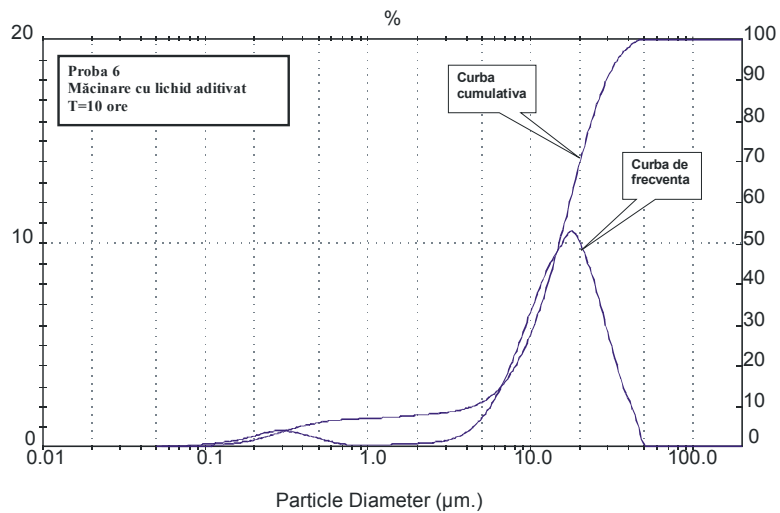
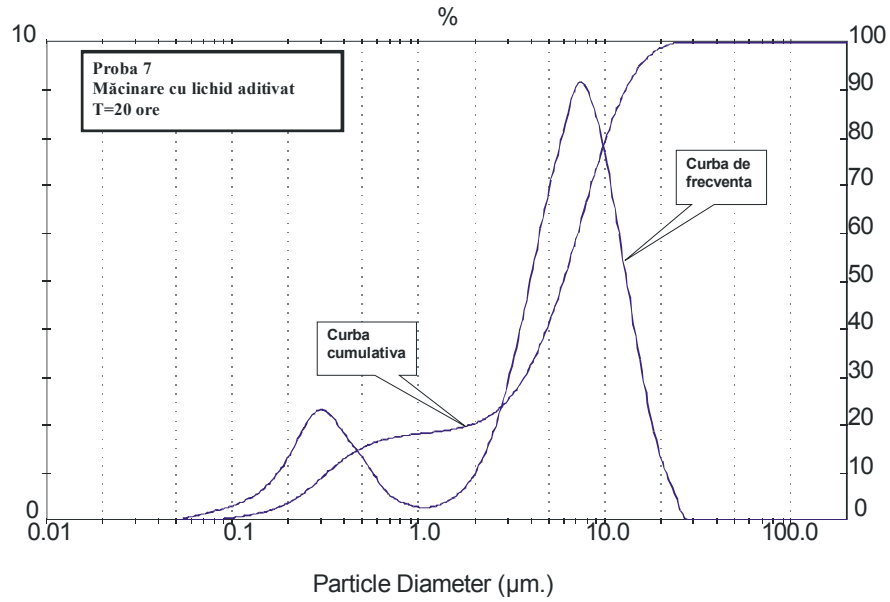


Fig. 4.53 Micrografii SEM ale pulberilor la măcinare cu lichid aditivat

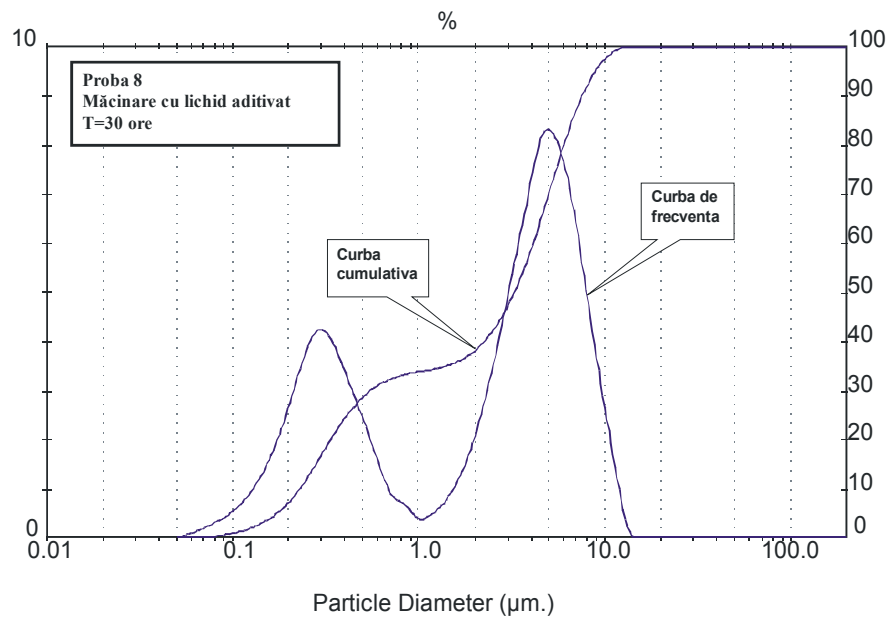
În figura 4.54 este prezentată distribuția granulometrică a pulberilor după măcinare:



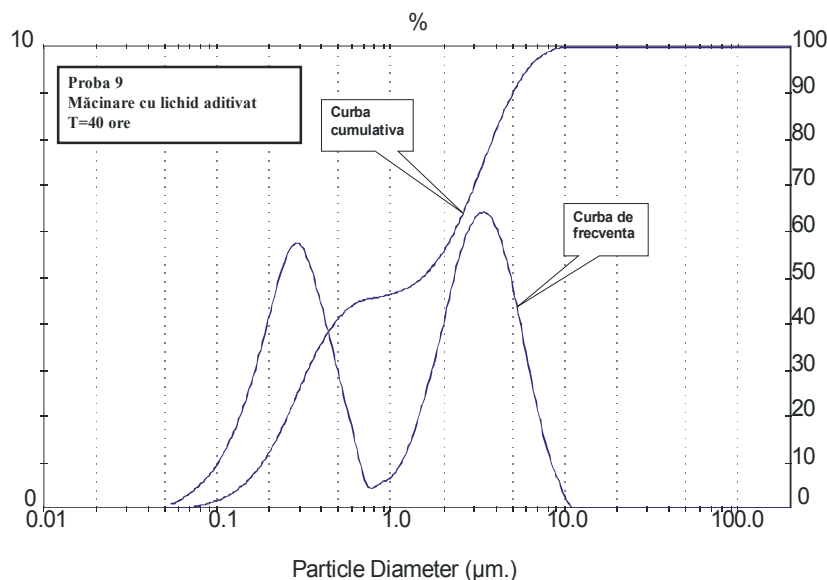
a. după 10 ore



b. după 20 ore;



c. după 30 ore



d. după 40 ore

Fig. 4.54 Distribuțiile granulometrice ale pulberilor la măcinare cu lichid aditivat

Referitor la morfologia particulelor de pulbere se constată că au formă plată (unele sunt hexagonale) iar din punct de vedere dimensional starea nanometrică se face simțită după 20 de ore de măcinare. În ceea ce privește distribuția granulometrică conform curbelor respectiv a datelor din tabele se constată următoarele:

- proba 6 (T=10h): se poate observa că pe curba de frecvență întâlnim două grupuri de particule ce se situează în intervalele $[0,1 - 1,0]$ μm și $[1,0 - 100,0]$ μm ; având diametrul mediu echivalent al volumului de $D[4,N] = 16,03$ μm . Din curba cumulativă reiese semnificația parametrilor D10, D50,...D99. D10 = 4,29 μm – volumul particulelor cu diametrul mai mic de 4,29 μm reprezintă 10 % din volumul total; D50 = 14,95 μm – volumul particulelor cu diametrul mai mic de 14,95 μm reprezintă 50 % din volumul total; D99 = 42,48 μm – volumul particulelor cu diametrul mai mic de 42,48 μm reprezintă 99 % din volumul total. Tot din curba de frecvență reies maximele: MODE 1 = 17,86 μm , și MODE 2 = 0,29 μm .
- proba 7 (T=20h): curba de frecvență corespunzătoare graficului acestei probe cuprinde două grupuri de particule ce se situează în intervalele $[0,1 - 1,0]$ μm și $[1,0 - 50,0]$ μm , se observă îngustarea intervalului final; având diametrul mediu echivalent al volumului de $D[4,N] = 6,47$ μm . Funcție de parametrul D50 = 5,97 μm (diametrul median al distribuției) se poate afirma că 50 % din valorile distribuției se situează sub valoarea 5,97 iar restul peste acesta, majoritatea (99%) fiind cu un diametrul sub 20,65 μm . Conform tabelului distribuția prezintă două maxime: MODE 1 = 4,76 μm , și MODE 2 = 0,3 μm .
- pentru proba 8 (T=30h): Conform curbei de frecvență, din nou ne întâlnim cu două grupuri de particule cuprinse între intervalele $[0,05 -$

1,0] μm și [1,0 – 10,0] μm observându-se îngustarea celui de-al doilea interval. Din tabel se constată că volumul particulelor cu diametrul mai mic de 11,12 μm corespunde unui procent de 99% iar cel al particulelor cu diametru sub 0,17 μm corespunde procentului de 5%. Diametrul mediu echivalent al volumului $D[4,N] = 3,46 \mu\text{m}$; observându-se o înjumătățire a acestuia cu creșterea timpului de macinare. Cele două maxime ale curbei de frecvență sunt: MODE 1 = 4,76 μm , și MODE 2 = 0,3 μm .

- pentru proba 9 (T=40h): curba de frecvență corespunzătoare graficului acestei probe cuprinde două grupuri de particule ce se situează în intervalele [0,07 – 0,09] μm și [1,0 – 10,0] μm . Diametrul mediu echivalent al volumului $D[4,N] = 2,07 \mu\text{m}$ și se observă înjumătățirea acestuia odată cu creșterea timpului de macinare. Majoritatea (99%) din valorile distribuției se situează sub valoarea 8,12 μm , iar cele mai mici 0,14 μm sunt într-un procent de 5-10%. Cele două maxime ale curbei de frecvență sunt: MODE 1 = 3,4 μm , și MODE 2 = 0,29 μm .

În urma procesului de măcinare uscată au fost obținute:

- granule de pulbere cu forma plată (sistem de cristalizare hexagonal).
- Dimensiunile particulelor se situează în intervalul 8 – 42 μm .
- Cantitatea obținută: 15 mg.

Analiza comparativă a distribuției granulometrice este prezentată în figura

4.55

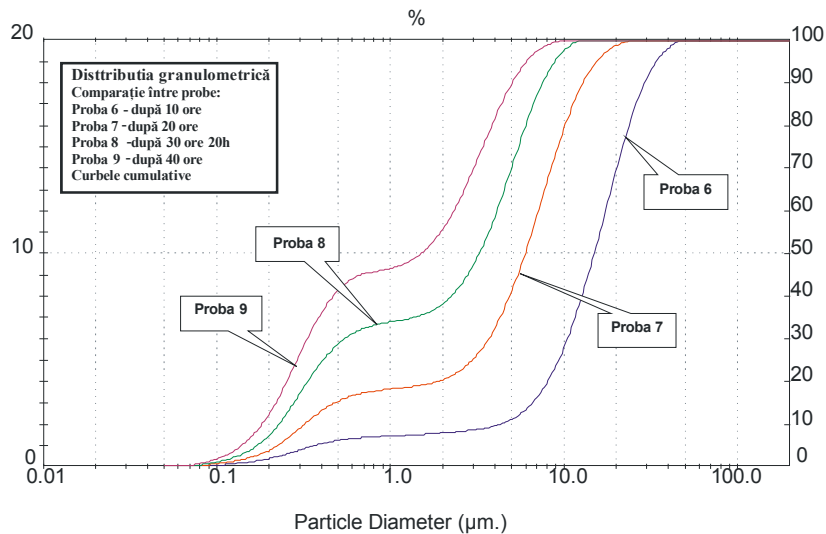


Fig. 4.55 Reprezentarea comparativă a distribuției granulometrice după 10, 20, 30, 40 ore de măcinare cu lichid aditivat

Analiza comparativă a distribuțiilor granulometrice ale probelor obținute prin măcinare cu lichid aditivat evidențiază următoarele:

- curbele de frecvență diferă de la o probă la alta prin faptul că intervalele se restrâng odată cu creșterea timpului de măcinare. Proba macinată 10h are ca interval [0,1 – 100] μm și [0,07 – 10,0] μm iar finețea crește odată cu creșterea timpului de măcinare;

- se observa deasemenea că maximele (diametrul particulei pentru care funcția de frecvență ia valori maxime) = MODE diferă (scad) odată cu creșterea timpului de măcinare;
- curbele cumulative arată scăderea diametrelor medii echivalente ale volumului de la 16,03 μm pentru proba măcinată 10 h la 2,07 μm la pulberea măcinată 40h;
- se mai poate observa că diametrele particulelor D90 scad pentru proba măcinată la 10 h de la 29,2 μm comparativ cu proba măcinată 40h la 5,03 μm .

4.2.3.3.2 Studii asupra cristalinității pulberilor măcinate

FB-W cristalizează în sistemul hexagonal, axa „c” reprezentând axa de „ușoră magnetizare”. La divizarea fină prin măcinare, ciocnirile intense din sistemul: bile de măcinare – material – pereții incintei de măcinare provoacă creșteri energetice importante care se manifestă parțial prin căldură (pereții incintei de măcinare ajung la 80°C după 20 de minute de măcinare continuă), iar o parte din energia de măcinare este disipată în rețeaua cristalină a materialului măcinat provocând defecte de rețea cu repercusiuni negative asupra caracteristicilor magnetice.

Pentru a stabili influența timpului de măcinare asupra cristalinității materialului măcinat s-a adoptat ca metodă de lucru difracția de raze X practică asupra următoarelor specimene:

- pulbere de FB-W dezintegrată;
- pulbere de FB-W după 10, 20, 30 și 40 de ore de măcinare în mediu uscat, umed și respectiv umed-aditivat;
- aceleași pulberi măcinate care după măcinare au fost supuse tratamentului de recoacere timp de 30 de minute la 500 °C în vederea îndepărtării defectelor de rețea (provenite de la măcinare) și aducerea rețelei cristaline într-o stare cât mai apropiată de echilibru.

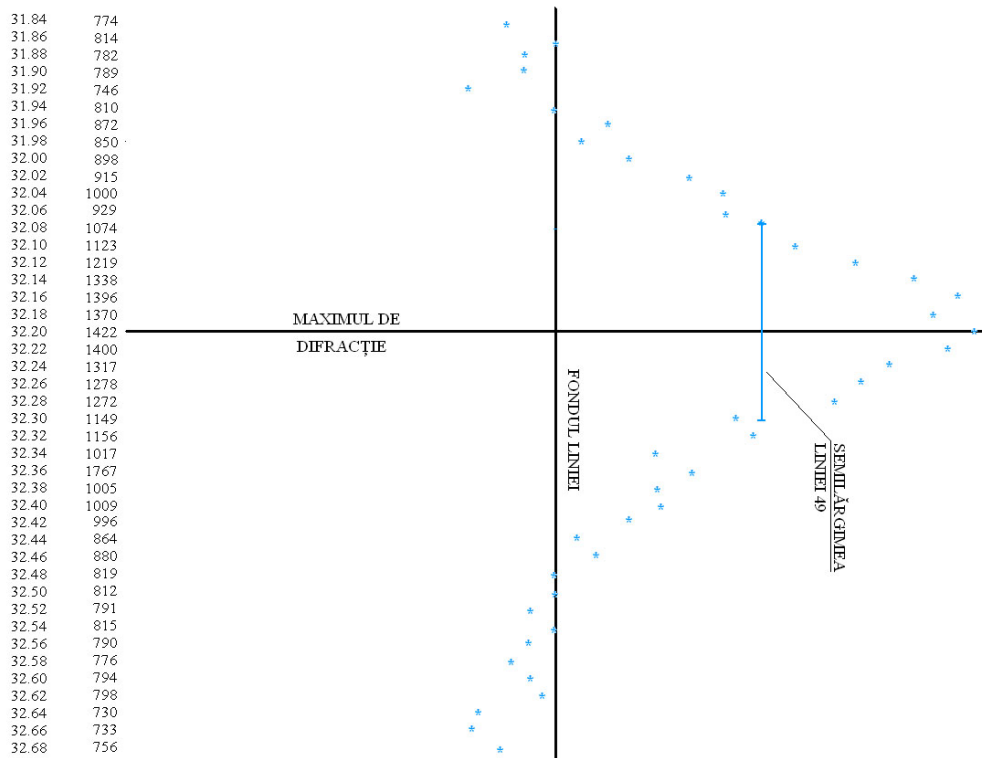
S-a parcurs următoarea procedură:

- S-a trasat spectrul de difracție cu ajutorul unui difractometru de raze X Bruker-AXS tip D8 ADVANCE cu tub de raze X cu anod de Mo , 40kV / 40 mA, filtru k_{β} de Zr, cu filtru cu fluorescență cu monocromator cu cristal curbat, precizia de poziționare 0,005°, timp de expunere 2 secunde, viteza goniometrului 8°/min, aparat prezentat în figura 4.56.

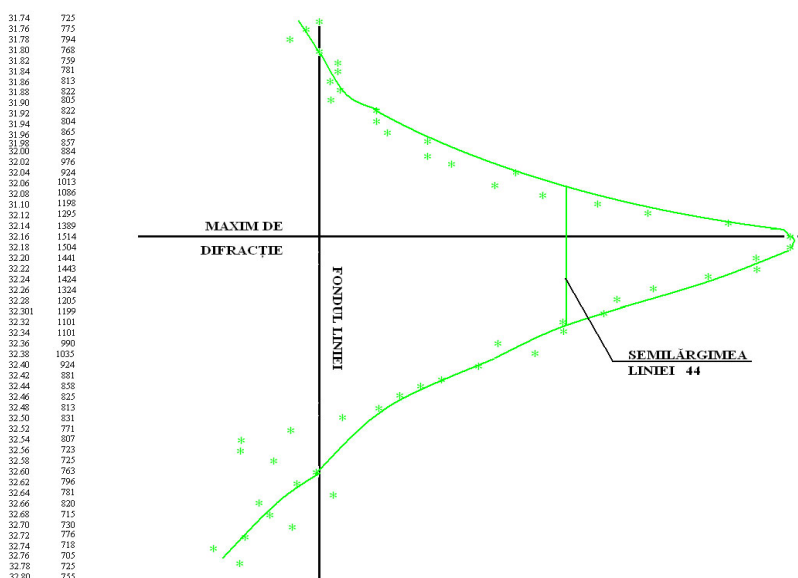


Fig. 4.56 Difractometru de raze X Bruker-AXS tip D8 ADVANCE

- S-a analizat spectrul de difracție și s-au stabilit trei maxime reprezentative (cele mai intense);
- Fără a se scoate nacela cu proba din aparat s-a adus instalația (proba și goniometrul) la poziția inițială pentru a se oferi astfel posibilitatea reluării difracției de raze X pe aceleași familii de plane cristalografice anterior analizate;
- S-a analizat din nou difracția de raze X, dar de data aceasta pasul goniometrului a fost de 0,02 grade și timpul de expunere de 3 secunde;
- S-au obținut în felul acesta imaginile de difracție ale celor trei maxime cele mai intense dar de data aceasta sub forma unor "curbe" expandate. Astfel de curbe pot fi văzute în figura 4.57 pentru mostre de pulbere măcinată 40 de ore umed în lichid aditivat respectiv măcinată 40 de ore și recoaptă;



a) măcinată 40 de ore în lichid aditivat



b) măcinat 40 de ore în lichid aditivat și repect
Fig. 4.57 Maximele de difracție expandate pentru pulberile FB-W

În baza acestei proceduri s-au realizat următoarele:

- s-a stabilit cu exactitate linia corespunzătoare fondului prin medierea valorilor precizate din două în două sutimi de grad ale picurilor din fondul spectrului de difracție;
- trasând corect linia de fond s-a măsurat cu precizie înălțimea maximului de difracție;
- folosindu-se valorile înălțimilor liniilor din două în două sutimi de grad s-a citit cu precizie unghiul 2θ de difracție;
- având în vedere expandarea maximului de difracție s-a măsurat cu precizie lărgimea liniei spectrale la jumătatea înălțimii ei.

Pe baza măsurărilor efectuate pe difractogramele expandate trasate pentru fiecare specimen de pulbere s-au determinat următoarele mărimi:

- h înălțimea maximului de difracție;
- δ lărgimea maximului de difracție măsurată la jumătatea înălțimii acestuia;
- $\delta/2$ semilărgimea maximului de difracție măsurată la jumătatea înălțimii acestuia;
- ε - mărimea rezultată prin calcul numită grad de cristalinitate:

$$\varepsilon = \left(1 - \frac{\delta}{2\lambda}\right) \cdot 100\% \quad (4.60)$$

Datele calculate sunt trecute în tabelele 4.12 și 4.13 iar în graficul din figura 4.58 este reprezentată variația gradului de cristalinitate cu timpul de măcinare pentru cazul pulberilor măcinate uscat timp de 20 de ore și mai departe, umed între 20 și 40 de ore.

Tabel 4.12 Evoluția parametrilor cristalini ai pulberii de FB-W la diferite stadii de măcinare

Timp de măcinare (ore)	Mediu de măcinare: apa						Mediu de măcinare: soluție aditivată					
	2 θ	h (ua)	δ (ua)	$\delta/2$ (ua)	ϵ (%)	ϵ_{med} (%)	2 \square	h (ua)	δ (ua)	$\delta/2$ (ua)	ϵ (%)	ϵ_{med} (%)
10	21,95	55	35	17,5	68,7	75,10	21,93	55	31	15,5	71,8	78,03
	27,11	105	46	23	78,1		27,09	104	40	20	80,8	
	32,45	114	49	24,5	78,5		32,44	119	44	22	81,5	
10+ recopt	21,88	89	32	16	82	82,83	21,85	91	25	12,5	86,3	86,36
	27,03	121	48	24	80,2		27,04	129	39	19,5	84,9	
	32,47	128	35	17,5	86,3		32,45	132	32	16	87,9	
20	21,92	43	36	18	58,9	69,63	21,91	53	39	19,5	63,4	72,36
	27,10	96	48	24	75		27,12	106	59	24,5	76,9	
	32,43	106	53	26,5	75		32,46	111	51	25,5	77	
20+ recopt	21,90	86	30	15	82,6	80,76	21,89	92	27	13,5	85,3	83,86
	27,01	118	46	23	80,5		27,11	118	39	19,5	83,5	
	32,42	125	52	26	71,2		32,43	131	45	22,5	82,8	
30	21,92	34	34	17	50	64,33	22,95	43	33	16,5	61,6	69,66
	27,08	89	50	25	71,9		27,08	97	49	24,5	74,7	
	32,44	95	55	27,5	71,1		32,48	99	54	27	72,7	
30+ recopt	21,90	56	23	11,5	79,5	81,03	22,88	66	22	11	83,3	84,4
	27,02	102	40	20	80,4		27,08	110	35	17,5	84,1	
	32,47	131	44	22	83,2		32,41	116	33	16,5	85,8	
40	-	-	-	-	-		22,91	38	39	19,5	48,7	64,43
	-	-	-	-	-		27,14	88	47	23,5	73,3	
	-	-	-	-	-		32,44	89	51	25,5	71,3	
40+ recopt	-	-	-	-	-		22	83	26	13	84,3	83,15
	-	-	-	-	-		27,11	108	39	19,5	81,9	
	-	-	-	-	-		32,42	126	42	21	83,3	

Tabel 4.13 Gradul de cristalinitate a nanopulberilor în funcție de timpul de măcinare

Mediu de măcinare	Materialul măcinat	Timp de măcinare				
		10	20	30	40	
Apă	FB-W	ϵ %	75.10	69.63	64.33	61.90
		$\Delta\epsilon$ %	7.29	7.42	3.73	
Soluție aditivată	FB-W	ϵ %	78.30	72.36	69.66	64.43
		$\Delta\epsilon$ %	7.59	3.74	7.51	
$\Delta\epsilon_{C-D}$ %			4.09	3.78	7.66	3.93

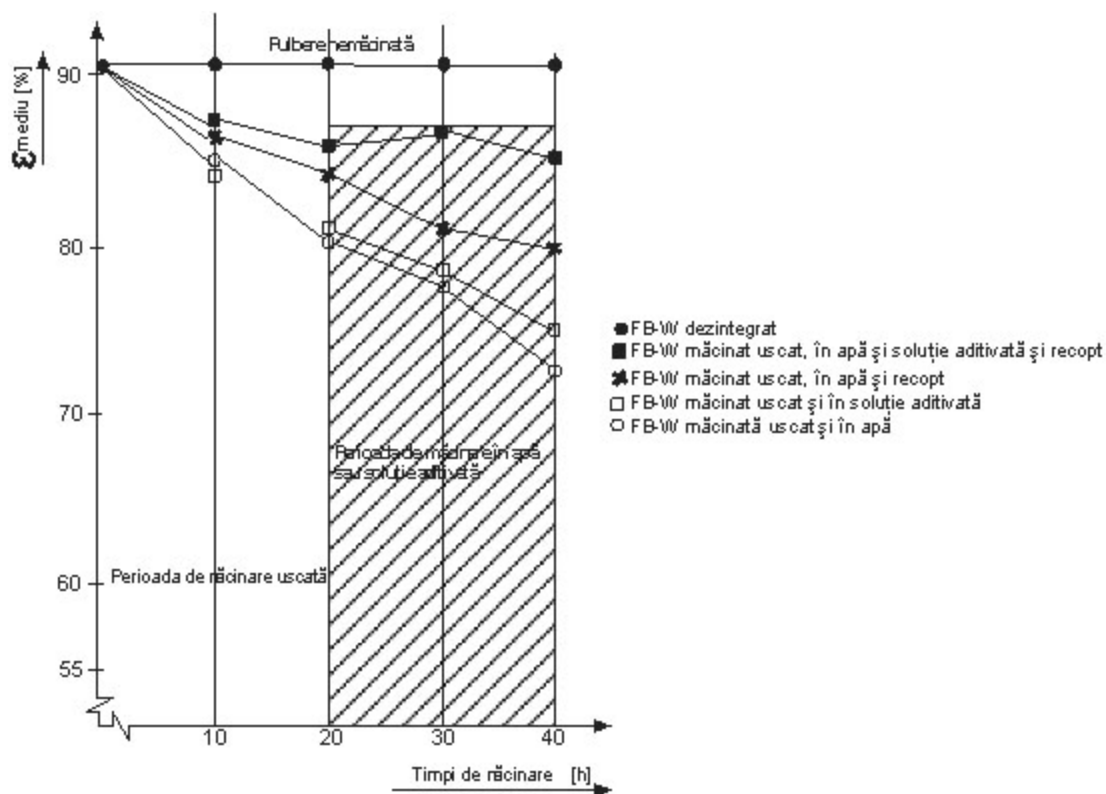


Fig. 4.58 Evoluția gradului de cristalinitate cu timpul de măcinare în cazul pulberilor măcinate în aer și în soluție

Din rezultatele prezentate în tabele și în grafic reies următoarele aspecte:

- gradul de cristalinitate al pulberilor măcinate este întotdeauna mai scăzut comparativ cu a acelorași pulberi în stare recoaptă. Aceasta confirmă faptul că în granulele pulberilor măcinate s-a disipat parțial energia mecanică generată la măcinare perturbând cristalul;
- gradul de cristalinitate al pulberilor rezultate prin măcinare folosind ca mediu apa este întotdeauna mai scăzut în medie cu (6-10%) față de cel al pulberilor măcinate în soluție aditivă cu 3% DAXAD.

În ceea ce privește adoptarea procedurii de măcinare mixtă și anume: 20 de ore uscat + 20 de ore în mediu umed constatăm că gradul de cristalinitate este mai scăzut sau descrește mai mult în perioada de măcinare uscată și mai puțin în perioada de măcinare umedă.

În concluzie, dat fiind faptul că pentru realizarea diferitelor dispozitive magneto-electrice din construcția MEMS-urilor este necesară utilizarea unor pulberi cât mai fine, în special pentru procedeul de microinjectie și care în același timp trebuie să aibă caracteristici magnetice cât mai ridicate pentru ameliorarea lor după măcinare este necesar ca pulberile să fie supuse tratamentului de recoacere.

4.2.3.3 Caracteristicile magnetice ale nanopulberilor măcinate

Caracteristicile magnetice ale pulberilor măcinate în condițiile prezentate la punctul anterior au fost determinate cu ajutorul unui magnetometru cu probă vibrantă tip LAKESHORE prezentat în figura 4.59 a. Pentru valorile calculate s-au folosit curbele de histereză trasate cu un magnetometru WALKER prezentat în figura 4.59 b.



a) Magnetometru LAKESHORE model 7307



b) Magnetometru WALKER

Fig. 4.59 Echipamentele utilizate pentru caracterizarea magnetică a pulberilor măcinate

Trasarea curbelor s-a realizat pe pulberi măcinate conform procedurii prezentată, pulberile fiind presate într-un cilindru etalonat cu volumul de 1 cm^3 . După presare s-a determinat masa pastilei și densitatea (picnometru cu mercur), s-a reintrodus proba într-un cilindru la bazele căruia s-a fixat câte o folie subțire din material plastic (pentru ca măsurătorile să nu fie afectate) și s-a trasat curba de histerezis la magnetometru. Introducerea probelor în cilindru a fost necesară întrucât la varierea câmpului de magnetizare proba se sfărâmă. Determinându-se pe curba de histerezis inducția $Br = 4\pi ms$ s-a determinat M_s și mai departe magnetizarea la saturație σ_s conform relațiilor:

$$M_s = \frac{Br}{4\pi} \text{ iar } \sigma_s = \frac{M_s}{\rho} \quad (4.61)$$

unde ρ este densitatea materialului.

Rezultatele măsurătorilor efectuate și cele calculate de pe curbele de histerezis trasate cu magnetometrul WALKER sunt trecute în tabelul 4.14.

Tabel 4.14 Parametrii magnetici ai pulberilor de FB-W măcinate umed

Timp de măcinare Param. Mag.	10	10R	20	20R	30	30R	40	40R
	Densitate (g/cm ³)	2,06	2,10	2,09	2,07	1,97	1,95	1,92
4 π M _s (măsurat T) x 10 ⁻⁴	920	960	930	940	850	875	825	915
M _s (T calculat) x 10 ⁻⁴	73,14	76,43	74,04	74,84	67,67	69,66	65,68	72,85
σ_s	emu/g	12,28	11,96	12,20	1,60	12,00	11,55	12,35
	creștere (%)	12,0		2,22		3,84		6,53
H _c (kA/m)	167,17	163,20	159,56	169,97	155,13	157,52	189,11	215

Datele din tabel arată că parametrii magnetici ai pulberilor măcinate scad odată cu timpul de măcinare și depind de tipul de lichid folosit. În parte, scăderile parametrilor magnetici se datorează și distorsiunilor din rețea introduse la măcinare. Acest lucru este confirmat de faptul că probele recoapte au parametrii magnetici foarte apropiați. Probele măcinate cu lichid aditivat au caracteristici magnetice superioare celor măcinate în apă.

În figura 4.60 sunt suprapuse ciclurile de histerezis trasate cu magnetometru cu probă vibrantă și din această figură rezultă că valoarea câmpului coercitiv se păstrează aproape la toate probele în jurul valorii de 160 kA/m, doar la proba măcintă 40 de ore valoarea corcivității crește la aproximativ 215 kA/m. Remanența este ridicată pentru probele măcinate 10 respectiv 20 de ore și descrește odată cu creșterea timpului de măcinare.

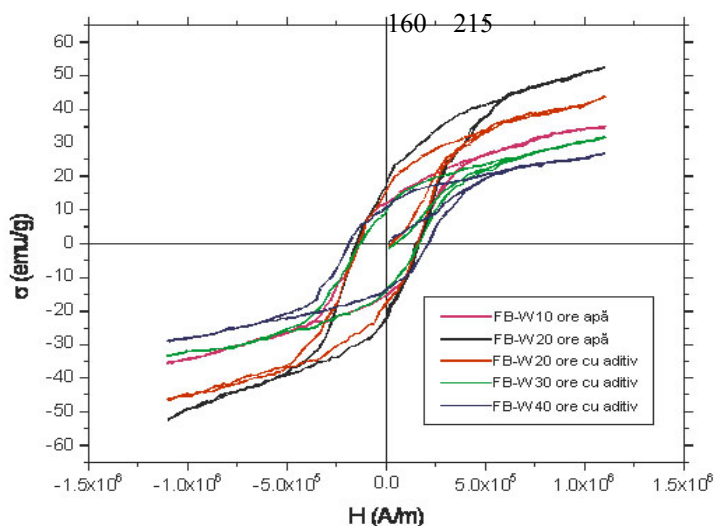


Fig. 4.60 Curbele de histerezis suprapuse pentru analiza comparativă

Rezultatele sunt normale având în vedere interdependența remanenței și a câmpului coercitiv de dimensiunile cristalitelor și anume, remanența crește odată cu creșterea grăunților iar câmpul coercitiv crește odată cu reducerea volumului grăunților.

4.3 Elaborarea de fluide inteligente cu comportare magnetică utilizând nanopulberile obținute

Utilizând nanopulberile elaborate prin cele 3 metode prezentate anterior s-au produs fluide inteligente cu comportare magnetică. Realizarea acestora s-a făcut prin introducerea pulberilor în ulei siliconic având o vâscozitate suficient de mică încât să existe o curgere satisfăcătoare în tuburi relativ mici ca diametru. Analizându-se structura compozită a acestora a fost efectuată o selecție, din cele 14 rețete realizate cu cele 14 nanopulberi, au fost păstrate pentru verificare a funcționalității din punct de vedere magnetic numai 3. Cele 3 pulberi selectate sunt prezentate în tabelul 4.15.

Tabel 4.15 Lichidele magnetice elaborate și selecționate

Nr. crt.	Identificare	Tip nanopulbere	Diametrul echivalent al volumului particulei [nm]	Tip matrice fluidă
1.	LM-SF32	SF32	50	Ulei siliconic
2.	LM-PP2	PP2	11,65	Ulei siliconic
3.	LM-9	9	2070	Ulei siliconic

Alegerea acestor lichide magnetice s-a făcut în baza comportării structurale, prin aceasta înțelegându-se viteza de sedimentare gravitațională. A fost ales câte un lichid magnetic din fiecare clasă de elaborare, după criteriul: cea mai mică viteză de sedimentare. Această comportare este strict necesară în cazul funcționării ca și element activ de sesizare în componența senzorilor.

În figura 4.61 sunt prezentate recipientele cu cele 3 lichide magnetice alese pentru caracterizare în vederea determinării celui mai potrivit pentru a funcționa pe post de element activ de sesizare.

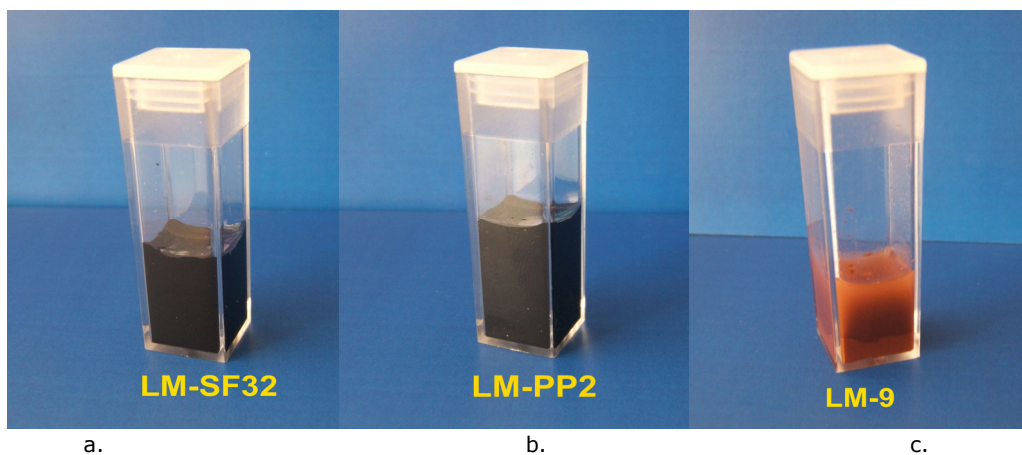
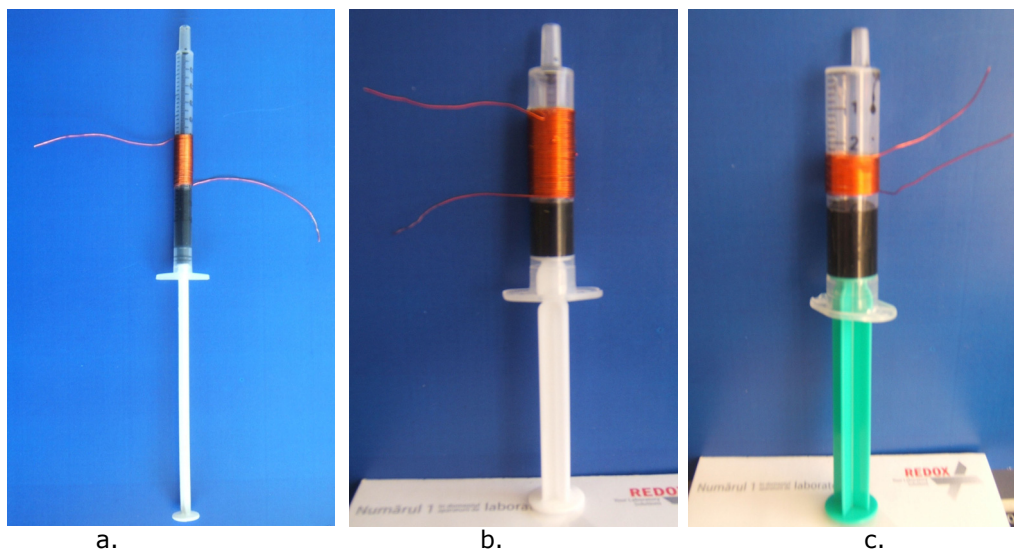


Fig. 4.61 Lichidele magnetice alese pentru caracterizare din punct de vedere al comportării magnetice – a. LM-SF32, b. LM-PP2, c. LM-9

4.4 Caracterizarea din punct de vedere magnetic a fluidelor inteligente elaborate

Conform subcapitolului 2.5.1, în cazul fluidelor inteligente cu comportare magnetică, volumul mare de particule metalice uniform dispersate în masa fluidului purtător asimilează compozitul unui metal lichid care îmbină armonios proprietățile specifice curgerii fluidelor vâscoase cu proprietățile metalelor. Pornind de la această certitudine, exploatabilă în proiectarea de elemente active de sesizare, au fost efectuate încercări de evidențiere și analiză a comportării pe post de miez magnetic a fluidelor inteligente produse (LM-SF32, LM-PP2 și LM-9).

Încercările au constat în determinarea variației inductanțelor unor bobine, având diverși parametri geometrici, la introducerea controlată a unui miez magnetic constituit dintr-o coloană de lichid magnetic (figura 4.62). Schema experimentului este prezentată în figura 4.63.



Volum cilindru:	a. 1 ml	b. 2 ml	c. 3 ml
Lungime coloană lichid introdusă:	a. 10 mm	b. 10 mm	c. 10 mm
Diametru sârmă bobinaj:	a. 0,35 mm	b. 0,35 mm	c. 0,35 mm

Fig. 4.62 Dispozitivele utilizate în experimentări

Determinările au fost efectuate pentru introduceri controlate, pas cu pas, a lichidelor magnetice în bobine. Introducerea s-a făcut utilizându-se dispozitive de tip cilindru cu piston, conform figurii 4.62. Constituindu-se în veritabile miezuri magnetice datorită structurii pulverulente metalice, cele 3 lichide magnetice au provocat variații ale inductanțelor bobinelor utilizate. Valorile determinate ale inductanțelor bobinelor au fost introduse în foi de calcul numeric computerizat în vederea modelării matematice a variației acestora.

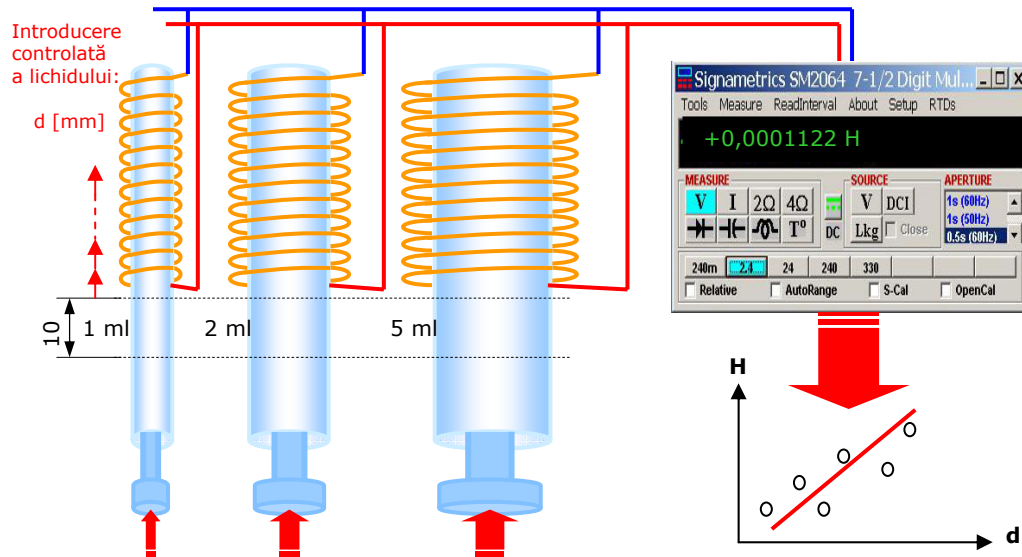


Fig. 4.63 Schema programului experimental de analiză a comportării din punct de vedere magnetic a lichidelor magnetice elaborate

Programul experimental cuprinde două categorii de experimente bazate pe două diametre diferite ale sârmei de bobinaj și o analiză comparativă a rezultatelor obținute. Se prezintă în tabelul 4.15 condițiile de realizare ale experimentului nr. 1:

Tabel 4.15 Condiții de realizare a experimentului

Experiment nr. 1		
Parametri experiment	Condiție	Rezultat
Lungime bobină	Constant: 10 mm	Inductanța finală a bobinei
Diametru sârmă bobinaj	Constant:	
Inductanță inițială a bobinei	Constant:	
Volum lichid magnetic	Variabil: 1 ml, 2ml, 5 ml	

Realizarea experimentului constă în introducerea în interiorul unei bobine de lungime fixă 10 mm a unor volume diferite de fluid magnetic. Deoarece bobina este una fără miez, atunci inductanța inițială în cele 3 situații va fi variabilă deoarece lungimea bobinei este menținută fixă deci pe măsură ce volumul interiorului bobinei crește atunci și valoarea inductanței se va modifica deoarece lungimea spirelor înfășurării va fi diferită.

Au fost realizate pentru fiecare din cele 3 fluide magnetice câte două seturi de experimente pornind de la un tip de sârmă de bobinaj cu diametrul inițial de 0,125 mm și ajungând la diametrul final de 0,35 mm. Prin variația volumului de lichid în cele trei situații se obține un număr total de 18 experimente.

În tabelul 4.16 se prezintă rezultatele experimentului și modelul matematic care caracterizează variația inductanței.

Tabel 4.16 Rezultatele experimentului și modelarea matematică a variației inductanței

Nr. Crt.	Diametru sârmă bobinaj [mm]	Volum fluid magnetic [ml]	Inductanță inițială [μ H]	Model matematic al variației inductanței y – inductanță x – lungimea coloanei de lichid	Factor de intensitate
Lichid Magnetic cod LM-SF 32					
1	0,125	5	159,10	$y = 0,9927 \cdot x + 164,91$	93 %
2	0,125	2	95,10	$y = 0,5465 \cdot x + 97,155$	86 %
3	0,125	1	80,83	$y = 0,304 \cdot x + 80,244$	83 %
4	0,35	5	85,33	$y = 0,0888 \cdot x + 85,837$	84 %
5	0,35	2	68,47	$y = 0,0641 \cdot x + 68,503$	80 %
6	0,35	1	53,13	$y = 0,2435 \cdot x + 53,017$	79 %
Lichid Magnetic cod LM-PP 2					
7	0,125	5	159,10	$y = 1,0391 \cdot x + 158,12$	91 %
8	0,125	2	95,10	$y = 0,479 \cdot x + 97,624$	87 %
9	0,125	1	80,83	$y = 0,1766 \cdot x + 82,279$	82 %
10	0,35	5	83,11	$y = 0,2475 \cdot x + 82,796$	83 %
11	0,35	2	65,55	$y = 0,223 \cdot x + 65,987$	72 %
12	0,35	1	52,41	$y = 0,2546 \cdot x + 52,079$	70 %
Lichid Magnetic cod LM-9					
13	0,125	5	162,80	$y = 0,5855 \cdot x + 162,21$	92 %
14	0,125	2	99,89	$y = 0,5817 \cdot x + 99,061$	86 %
15	0,125	1	81,26	$y = 0,2635 \cdot x + 81,298$	82 %
16	0,35	5	83,11	$y = 0,1659 \cdot x + 81,812$	82 %
17	0,35	2	66,07	$y = 0,442 \cdot x + 65,867$	80 %
18	0,35	1	52,41	$y = 0,1953 \cdot x + 52,222$	76 %

Utilizând criteriul Chauvenet de extragere a valorilor determinate cu erori mai mari decât valoarea arbitrar autoimpusă de 3%, au fost construite modelele matematice prezentate în tabelul 4.17. În anexa 4 se regăsesc sub formă grafică modelele matematice prezentate mai sus.

Concluzionând asupra rezultatelor obținute, se extrag următoarele observații:

- variația inductanței este liniară în cazul fiecărui lichid magnetic în parte;
- evoluția liniară a inductanței este crescătoare;
- toate cele 3 lichide magnetice elaborate și verificate din punct de vedere al comportării magnetice sunt asemănătoare din punct de vedere al variației inductanței bobinelor.

A doua categorie de experimente constă în stabilirea unui volum fix de fluid magnetic și a unei lungimi fixe a bobinei, dar utilizarea a două sârme de bobinaj cu

diametre diferite. Se prezintă în tabelul 4.15 condițiile de realizare ale experimentului nr. 2:

Tabel 4.15: Condiții de realizare a experimentului

Experiment nr. 2		
Parametri experiment	Condiție	Rezultat
Lungime bobină	Constant: 10 mm	Inductanța finală a bobinei
Diametru sârmă bobinaj	Variabil: 0,125 mm, 0,35 mm	
Inductanță inițială a bobinei	Constant:	
Volum lichid magnetic	Constant:	

Realizarea experimentului constă în determinarea variației inductanței bobinei la introducerea unui volum fix de fluid magnetic și modelarea matematică variației inductanței în acest caz. Parametrul variabil din cadrul experimentului va fi sârma de bobinaj, deoarece prin modificarea diametrului acesteia se vor obține inductanțe inițiale diferite. Dimensiunea experimentului constă realizarea a câte 2 experimente pentru fiecare fluid magnetic utilizat pentru 3 volume fixe de lichid. Se vor obține astfel un număr de 18 probe. Se prezintă în tabelul 4.18 rezultatele experimentului și modelul matematic al variației inductanței.

Tabel 4.16 Rezultatele experimentului și modelarea matematică a variației inductanței

Nr. Crt.	Diametru sârmă bobinaj [mm]	Volum fluid magnetic [ml]	Inductanță inițială [μH]	Model matematic al variației inductanței y – inductanță x – lungimea coloanei de lichid	Factor de intensitate
Lichid Magnetic cod LM-SF 32					
1	0,125	1	80,83	$y = 0,304 \cdot x + 80,244$	83%
2	0,35	1	53,13	$y = 0,2435 \cdot x + 53,017$	79 %
3	0,125	2	95,10	$y = 0,4132 \cdot x + 98,163$	86 %
4	0,35	2	68,47	$y = 0,0641 \cdot x + 68,503$	80 %
5	0,125	5	159,10	$y = 0,9927 \cdot x + 164,91$	93 %
6	0,35	5	85,33	$y = 0,0888 \cdot x + 85,837$	84 %
Lichid Magnetic cod LM-PP 2					
7	0,125	1	82,36	$y = 0,1766 \cdot x + 82,279$	83 %
8	0,35	1	52,41	$y = 0,2546 \cdot x + 52,079$	70 %
9	0,125	2	95,10	$y = 0,479 \cdot x + 97,624$	87 %
10	0,35	2	68,47	$y = 0,223 \cdot x + 65,987$	72 %
11	0,125	5	159,10	$y = 1,0391 \cdot x + 158,12$	91 %
12	0,35	5	85,33	$y = 0,2475 \cdot x + 82,796$	83 %
Lichid Magnetic cod LM-9					
13	0,125	1	81,26	$y = 0,2635 \cdot x + 81,298$	82 %
14	0,35	1	52,41	$y = 0,1953 \cdot x + 52,222$	76 %

15	0,125	2	99,89	$y = 0,5817 \cdot x + 99,061$	86 %
16	0,35	2	66,07	$y = 0,442 \cdot x + 65,867$	80 %
17	0,125	5	162,80	$y = 0,5855 \cdot x + 162,21$	92 %
18	0,35	5	83,11	$y = 0,1659 \cdot x + 81,812$	82 %

4.5 Alegerea fluidului inteligent pentru confecționarea senzorilor nanostructurați

Pornind de la rezultatele și concluziile experimentărilor de verificare a comportării din punct de vedere magnetic a lichidelor magnetice elaborate în cadrul capitolului, se poate considera că fiecare dintre cele 3 fluide inteligente poate fi utilizat la confecționarea de elemente de sesizare.

Cum lichidul LM-SF32 a prezentat valori mai mari, aflate într-un domeniu de măsurare mai accesibil, se alege pentru confecționarea senzorilor destinați sistemelor hibride de sudare laser-arc.

5. Elaborarea de senzori nanostructurați pentru monitorizarea mărimilor cu influență pregnantă în cadrul sistemelor hibride de sudare

Acceptând rezultatele și concluziile cercetărilor prezentate în cadrul capitolului 3 se propune elaborarea a 4 senzori nanostructurați având elementele active de sesizare confecționate din fluide inteligente cu comportare magnetică, fluide numite în continuare „lichide magnetice”. Această din urmă denumire este acceptată la acest nivel datorită faptului că elementele active ale senzorilor exploatează numai proprietățile magnetice specifice ale acestor fluide inteligente. Cei 5 senzori nanostructurați ce se propun sunt:

- un senzor pentru determinarea unghiului dintre capul de sudare cu fascicul laser și capul de sudare cu arc electric;
- un senzor pentru determinarea unghiului dintre planul în care se găsește capul de sudare cu arc electric și planul sistemului hibrid;
- un senzor pentru determinarea vitezei de avans a sistemului hibrid;
- un senzor pentru de determinarea stării de mișcare a sistemului hibrid, prin monitorizarea vibrațiilor acestuia.

În continuare se vor prezenta concepțiile constructiv-funcționale ale celor 4 senzori, modul de realizare efectivă a acestora, precum și modul de preluare și interpretare a semnalelor utile.

5.1 Senzor nanostructurat pentru monitorizarea unghiului dintre capul de sudare cu fascicul laser și cel de sudare cu arc electric

Experimentările de sudare hibridă au evidențiat faptul că poziționarea relativă a celor două componente ale sistemului hibrid (figura 5.1), capul de sudare cu fascicul laser și capul de sudare cu arc electric WIG, arc de plasmă sau MIG/MAG, influențează sensibil atât stabilitatea procesului cât și caracteristicile geometrico-dimensionale ale sudurilor.

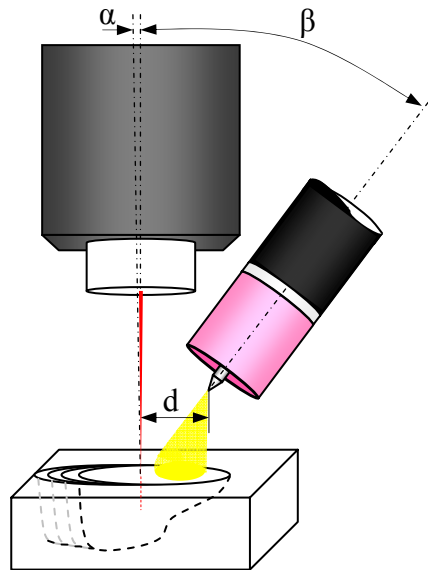


Fig. 5.1 Parametrii geometrici care determină poziția relativă a celor două capete de sudare

Uzual, în timpul sudării poziția relativă a celor două componente menționate este constantă. Relativ rare sunt situațiile în care sunt necesare modificări ale parametrilor care determină această poziție, d și β , în timpul procesului de sudare. În primul caz, poziția relativă este stabilă, reglată și fixată înainte de inițierea procesului de sudare. Pentru aceasta sunt necesare sisteme simple de măsurare a parametrilor d și β . Ceva mai complexă este situația în care cei doi parametri trebuie modificați în timpul procesului de sudare. Această modificare poate avea două motivații: fie se face o corecție devenită necesară în urma observațiilor făcute asupra stabilității procesului sau asupra caracteristicilor geometrico-dimensionale ale sudurii, fie se dorește modificarea voită a caracteristicilor geometrico-dimensionale ale sudurii în funcție de cerințele privind calitatea acesteia. Pentru a putea modifica online cei doi parametri sunt necesare sisteme de monitorizare continuă a acestora conectate la servomotoare sau motoare pas cu pas pe care să le comande în sensul modificării valorilor lor, conform prescripțiilor tehnologiei de sudare aplicate. Oricum, indiferent că este vorba despre una sau despre cealaltă dintre cele două situații, sunt necesare sisteme de determinare a valorilor celor doi parametri atât înaintea modificării, cât și în timpul și la finele modificării.

În continuare se propune proiectarea a doi senzori nanostructurați dedicați sesizării unghiurilor sub care se găsesc la un moment dat cele două capete de sudare din componența sistemului hibrid:

- unghiul față de verticală al capului de sudare cu fascicul laser, α ;
- unghiul dintre axele celor două capete de sudare, $[\beta-30^\circ, \beta+30^\circ]$.

Astfel de senzor, cunoscuți și sub numele generic de „inclinometre nano-magneto-fluidice”, vor funcționa în baza proprietăților specifice ale fluidelor inteligente cu comportare magnetică utilizate pe post de miezuri magnetice în interiorul unor bobine.

Înclinarea capului de sudare cu arc relativ la capul de sudare cu fascicul laser, exprimabilă prin unghiul β dintre axele celor două componente menționate,

reprezintă unul dintre cei mai importanți parametri geometrici ai sistemului hibrid. Modificări cu $5...10^\circ$ ale acestui unghi produc alterări ale stabilității procesului de sudare, precum și modificări ale calității îmbinărilor sudate. Este necesară, așadar, dezvoltarea de senzori care să sesizeze cu o precizie de $1...3^\circ$ valoarea momentană a unghiului aflat în discuție.

Un astfel de senzor se poate construi utilizând proprietatea fluidelor inteligente cu comportare magnetică de a se institui cu succes în veritabile miezuri magnetice fluide destinate modificării inductanțelor unor bobine. Pornind de la această ipoteză se vor proiecta unele soluții constructive de senzori funcționând pe acest principiu.

5.1.1 Soluții constructive pentru senzorul nanostructurat de monitorizare a unghiului β

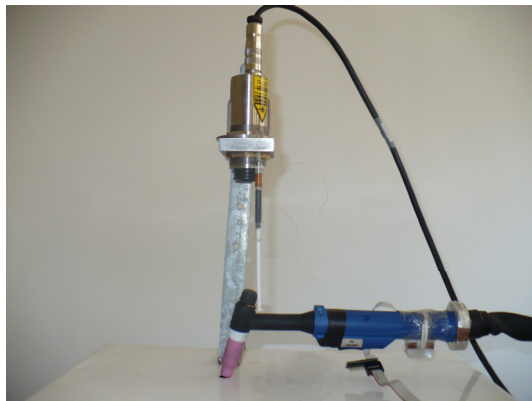
Pentru senzorul de tip inclinometru, având elementul activ confecționat cu lichid magnetic nanostructurat, dorit a se proiecta, se propun trei soluții constructive:

- utilizarea unui mecanism de tip piston-cilindru, acționat prin contact direct de către capul de sudare cu arc, pentru introducerea lichidului magnetic în interiorul bobinei;
- utilizarea gravitației pentru deplasarea lichidului magnetic în interiorul bobinei;
- utilizarea forței magnetice pentru deplasarea lichidului magnetic în interiorul bobinei.

Fiecare dintre aceste trei soluții constructive a fost realizată practic, comportările celor 3 senzori nanostructurați fiind comparate din punct de vedere al modului, costului și facilității de realizare, precum și din punct de vedere al preciziei și al vitezei de funcționare.

5.1.1.1 Senzorul nanostructurat cu mecanism piston-cilindru

Soluția constructivă a acestui tip de senzor este prezentată în figura 5.2. Conform acestei soluții, lichidul magnetic se găsește în interiorul unui cilindru, ocupând parțial volumul acestuia. În dreptul volumului liber al cilindrului este montată bobina, începând chiar de la limita coloanei de lichid magnetic. Introducerea lichidului magnetic în interiorul bobinei se face cu ajutorul unui piston aflat în contact direct cu capul de sudare cu arc electric WIG, MIG/MAG sau plasmă.



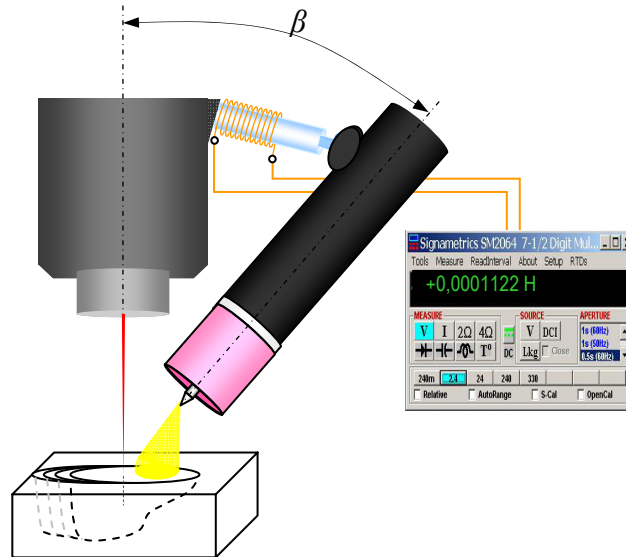


Fig. 5.2 Sensor cu mecanism cilindru-piston

Realizarea acestui sensor s-a dovedit greoaie, sistemul de fixare a pistonului de capul de sudare trebuind să fie mobil și adaptabil fiecărei poziții în parte pentru un domeniu de existență a unghiului β de $\pm 30^\circ$, domeniul maxim de reglare a poziției relative dintre cele două componente ale sistemului hibrid.

Încercările de funcționare aplicate acestui sensor au evidențiat o variație neliniară între inductanța momentană a bobinei și unghiul β , variație prezentată în figura 5.3. Această stare de fapt impune un proces de liniarizare pentru a se asigura funcționalitatea sensorului. O variație liniară s-ar fi putut obține dacă pistonul ar fi fost acționat prin intermediul unei came al cărei profil să fi fost calculat în funcție de expresia matematică care descrie variația inductanței (figura 5.3).

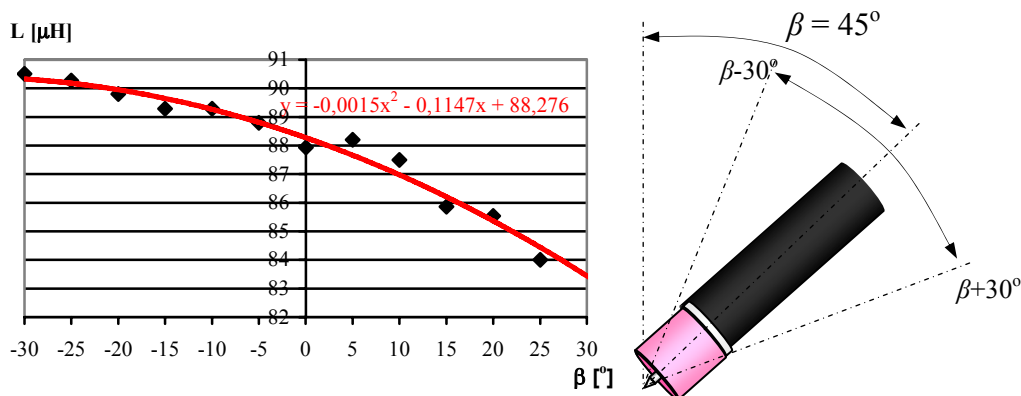


Fig. 5.3 Variația inductanței cu unghiul de înclinare a capului de sudare cu arc

5.1.1.2 Senzorul nanostructurat gravitațional

Soluția constructivă a acestui tip de senzor este prezentată în figura 5.4. Conform acesteia lichidul magnetic este introdus într-un tor pe care sunt așezate două bobine.

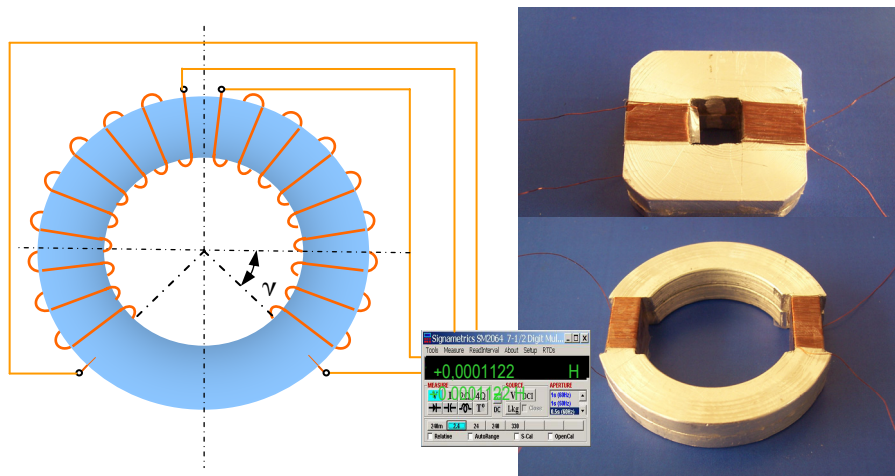


Fig. 5.4 Senzorul nanostructurat gravitațional

Lichidul ocupă o treime din circumferința torului, celelalte două treimi fiind ocupate de către cele două bobine. Poziția determinată de unghiul β (45°) este considerată poziția 0 și este caracterizată prin existența fluidului inteligent în afara bobinelor montate pe tor. Același domeniu de $\pm 30^\circ$ a fost considerat și în cazul acestui senzor, el fiind mai mult decât acoperitor pentru necesitățile de modificare a poziției capului de sudare cu arc electric.

Datorită deplasării circulare date de tor, lichidul magnetic este introdus lent și constant în interiorul bobinelor, motiv pentru care variația inductanței este liniară. Această ipoteză a fost verificată experimental, rezultatul verificării fiind prezentat în figura 5.5.

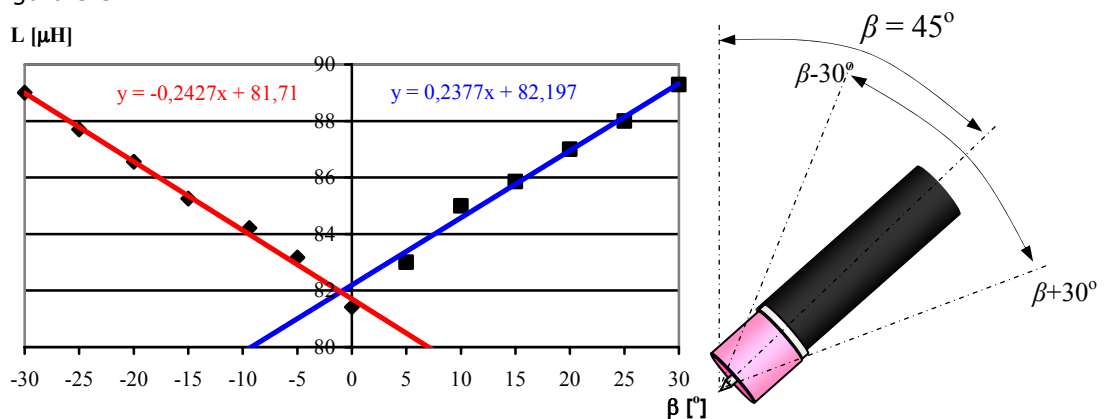


Fig. 5.5 Variația inductanței cu unghiul de înclinare a capului de sudare cu arc

Realizarea imperfectă a bobinelor a condus la obținerea unei mici diferențe între expresiile celor două variații. O reasezare a spirelor celor două bobine ar conduce cu siguranță la obținerea a două expresii identice.

Existența unor variații liniare reprezintă un avantaj incontestabil pentru soluția constructivă prezentată.

5.1.1.3 Senzorul nanostructurat cu suport magnetic

Soluția constructivă a acestui tip de senzor este prezentată în figura 5.6. Conform acesteia senzorul este compus dintr-un tub semicircular în care se găsește lichidul magnetic. La capetele tubului sunt montați doi magneți permanenți care au scopul de a atrage lichidul magnetic. Cum forța de atracție crește o dată cu scăderea distanței dintre magnet și coloana de fluid, a fost de așteptat o variație neliniară a inductanței la modificarea unghiului de înclinare a tubului cu lichid magnetic.

Senzorul a fost verificat în aceleași condiții ca și ceilalți doi, poziția de 0 fiind cea pentru unghiul $\beta = 45^\circ$. Domeniul de $\pm 30^\circ$ a fost menținut, calitatea lichidului magnetic fiind aceeași ca și în cazurile anterioare.

Rezultatele verificării sunt prezentate în figura 5.7. Conform așteptărilor, variația nu a fost liniară, expresia ei putând fi asimilată unui polinom de gradul 2. În acest caz, liniarizarea se va dovedi la fel de dificilă ca și în cazul primului senzor propus.

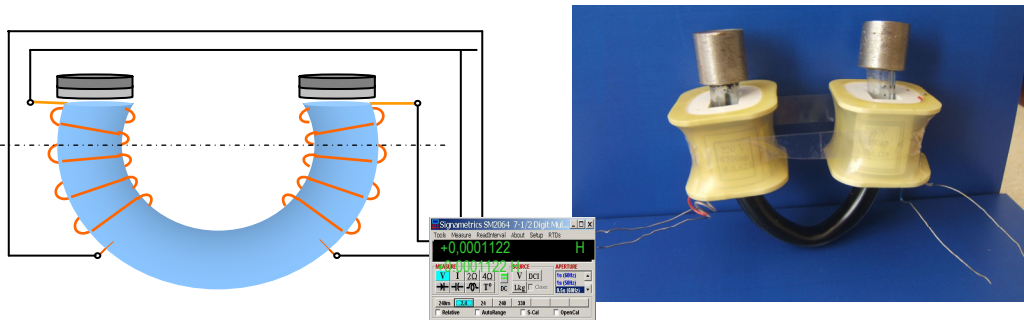


Fig. 5.6 Senzorul nanostructurat cu suport magnetic

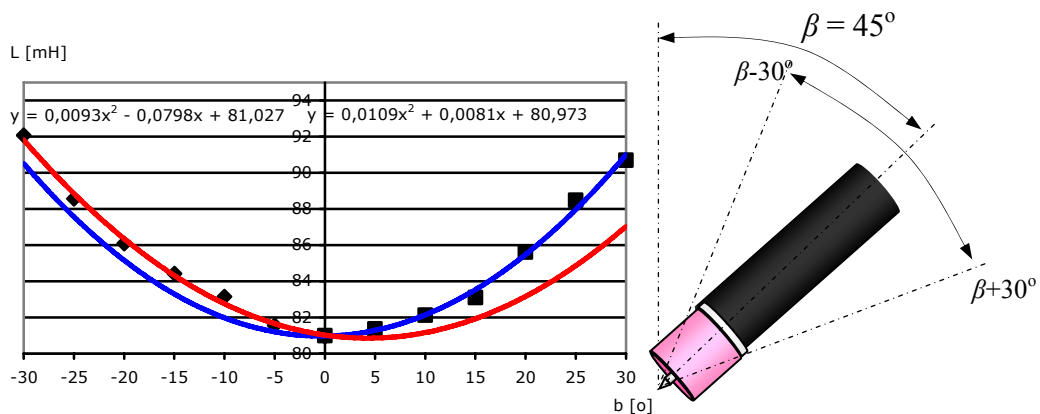


Fig. 5.7 Variația inductanței cu unghiul de înclinare a capului de sudare cu arc

5.1.2 Alegerea senzorului nanostructurat pentru monitorizarea unghiului β

Cele 3 soluții constructive propuse sunt sensibil diferite din punct de vedere al modului de acționare a lichidului magnetic. Această stare de fapt conduce la costuri relativ diferite de la senzor la senzor.

Senzorul cu mecanism cilindru-piston presupune utilizarea a două componente complexe, caracterizate prin costuri mediu spre ridicate: ansamblul cilindru-piston și subansamblul de fixare mobilă a pistonului de capul de sudare cu arc electric. Ansamblul cilindru-piston va trebui astfel realizat încât să asigure și o etanșeitate corespunzătoare, dar și o mișcare relativă lină, fără blocaje și fără apelarea la forțe importante. Așadar, prelucrarea celor două piese care formează ansamblul trebuie să fie caracterizată printr-o precizie relativ ridicată. Subansamblul de fixare mobilă a pistonului de capul de sudare cu arc electric va trebui astfel realizat încât să asigure nu numai un contact continuu între cele două, dar și o acționare lentă și continuă a pistonului.

Această stare de fapt conduce la costuri relativ ridicate legate de construcția efectivă a senzorului.

Senzorul gravitațional este cel mai simplu dintre cei 3 senzori prezentați. Costul realizării torului nu este ridicat, acesta putând fi realizat fie utilizând un simplu tub roluit după o formă

circulară, fie prelucrând canale circulare identice în două piese care ulterior vor forma un ansamblu care va da naștere torului necesar. Așadar, costurile de realizare a acestui senzor nu se ridică la nivelul costurilor implicate în realizarea senzorului cu mecanism cilindru-piston.

Senzorul cu suport magnetic este realizabil la fel de ușor și ieftin ca și senzorul gravitațional. La acest senzor însă, intervine un cost suplimentar legat de achiziționarea și montarea magneților ceramici permanenți care au rolul de a mări cantitatea de lichid magnetic care pătrunde în bobine.

Comparând din punct de vedere economic cele trei soluții constructive, se constată faptul că senzorul gravitațional presupune costuri de realizare mai mici decât ceilalți doi senzori. Analizând semnalele oferite de către cei trei senzori, se observă faptul că senzorul gravitațional este singurul care oferă un semnal liniar. Aceasta înseamnă că în cazul acestui senzor nu mai este necesară efectuarea de liniarizări matematice pentru o bună interpretare a semnalului. În ceea ce privește nivelul semnalului, la fiecare dintre cei trei senzori tipul bobinei (număr de spire, diametru sârmă bobinaj, corectitudine bobinaj) influențează nivelul semnalului, în sensul că un număr mare de spire și un diametru mic al sârmei oferă un semnal cu amplitudine mare, deci ușor de măsurat.

Aceste aspecte au stat la baza deciziei privind alegerea soluției constructive pentru senzorul nanostructurat de tip inclinometru. Alegerea a fost simplă și s-a ales pentru realizarea efectivă senzorul gravitațional.

5.1.3 Modelarea și simularea comportării lichidului magnetic în interiorul torului

O analiză a modului de curgere a fluidului cu nanoparticule prin interiorul torului se poate face abordând mișcarea din punct de vedere energetic. O curgere corespunzătoare, prin „corespunzătoare” înțelegând o curgere prin care lichidul aderă relativ puțin la peretele torului, este o curgere caracterizată prin pierderi energetice reduse.

Optimizarea din acest punct de vedere se bazează pe o analiză a variației funcționalei „energie” la curgerea prin canalul sub formă de tor, în funcție de variația unghiului la centru. Pentru aceasta se consideră energia sub forma sa integrală:

$$E = \frac{1}{2} \int_{\Omega} |v|^2 dx \quad (5.1).$$

Abordarea este caracterizată prin următoarele:

- este cazul tridimensional de integrare, Ω fiind domeniul de calcul al integralei, în cazul de față fiind vorba despre canalul sub formă de tor;
- întrucât $v = v(\mathbf{x}, t)$ calea aleasă pentru modelare constă în studiul variației energiei înregistrată în procesul de curgere, când există o bandă de valori atât pentru cele două raze ale torului, cât și pentru unghiul / unghiurile la centru;
- pentru simulare s-a ales software MAPLE 11; dintre procedurile acestuia s-a apelat la procedura **MultiInt** pentru evaluarea integralei, apoi la procedura **“interactive plot”** pentru reprezentarea variației energiei (funcție de timp) pentru unele situații numerice;
- dat fiind faptul că există o valoare numerică a vitezei de pornire, s-a considerat o expresie polinomială a acesteia, expresie în care este implicat și parametrul timp.

Simulările efectuate în MAPLE 11 au vizat curgerea gravitațională specifică senzorului gravitațional. Au fost utilizate două seturi de dimensiuni pentru senzor, datorită faptului că pe capul de sudare WIG se vor monta doi senzori de tip inclinometru, pentru determinarea unghiului de înclinare după două planuri perpendiculare. Forma specifică a pistolului WIG impune acestor senzori seturi diferite de dimensiuni.

Simularea 1 (senzor gravitațional).

Condiții:

- se consideră pentru tor o rază exterioară $R = 13$ mm și o rază interioară $r = 10$ mm, respectându-se realitatea (diametrul real al canalului de tip tor fiind egal cu 3 mm, cele două raze fiind cele menționate anterior);
- domeniul de integrare: $R1 = \frac{R-r}{2} = 11,5$ mm;
- unghiul la centru (α): $\frac{t}{30}$.

Conform modulelor de calcul și reprezentare din MAPLE 11 rezultă succesiv (extragere formule direct din programul de calcul):

> with(Student[MultivariateCalculus]):

```
MultiInt(t^2, z = -1.5 .. 1.5, y = 0 .. -cos(0.2006111 * t), x = 11.5 ..
-sin(0.2006111 * t));
```

(5.2)

$$-3 \cdot t^2 \cos(0.2006111000t) (-1 \cdot \sin(0.2006111000t) - 11.50000000)$$

(5.3)

with(plots) :

```
> interactive(-3 \cdot t^2 \cos(0.2006111000t) (-1 \cdot \sin(0.2006111000t)
- 11.50000000));
```

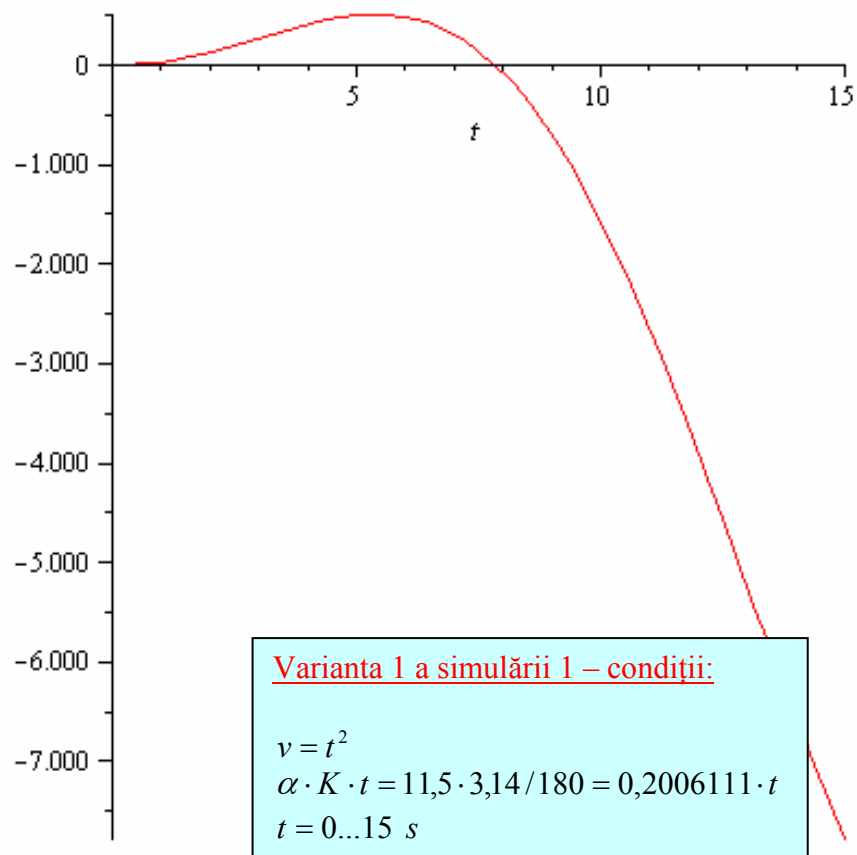


Fig. 5.8 Variația energiei în timp pentru condițiile date (t = 0..15 s)

Concluzii ale analizei graficului - răspuns:

- simularea oferă un răspuns fără acoperire practică, în sensul evoluției unei curgeri cu o decelerare accentuată a fluidului, decelerare dovedită de scăderea bruscă a energiei;
- deficiența simulării constă în faptul că modelul nu consideră în calcul elementele geometrice ale torului.

```
interactive(-3 \cdot t^2 \cos(0.2006111000t) (-1 \cdot \sin(0.2006111000t)
- 11.50000000))
```

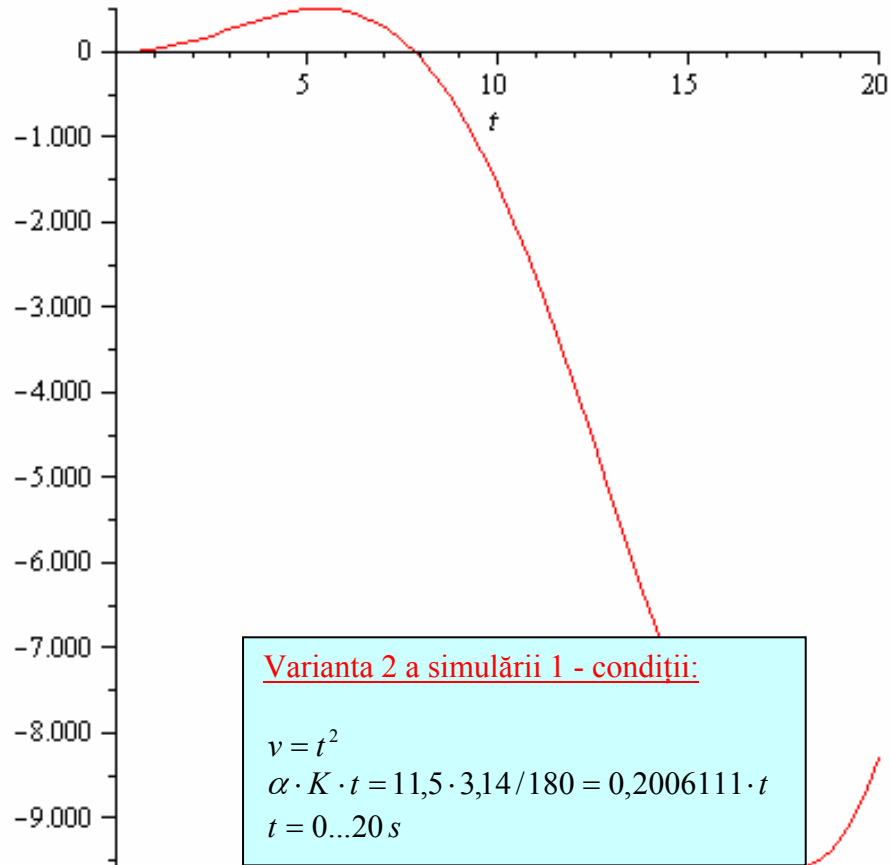


Fig. 5.9 Variația energiei în timp pentru condițiile date ($t = 0 \dots 20 \text{ s}$)

Concluzii ale analizei graficului - răspuns:

- după scăderea bruscă a energiei simularea oferă și o creștere a acesteia, creștere care începe după aproximativ 17-18 s și care nu are o explicație fizică clară din moment ce nu sunt considerate în simulare pierderi de masă prin aderența lichidului magnetic la pereții torului sau trecerea în secunda 17 prin punctul de început caracterizat prin existența unei cantități date de lichid aderent care ar avea rol în reducerea frecării;
- modelul matematic considerat pentru viteza fluidului nu este corespunzător, el oferind erori începând cu secunda 17 a derulării procesului de curgere a lichidului magnetic prin interiorul torului.

Simularea 2 (senzor gravitațional).

Condiții:

- se consideră pentru tor o rază exterioară $R = 13 \text{ mm}$ și o rază interioară $r = 10 \text{ mm}$;

- domeniul de integrare: $R1 = \frac{R-r}{2} = 11,5$ mm;
- unghiul la centru (α): $\frac{t}{30}$.
- se consideră că viteza fluidului are expresia $v = 23 + t^2$ sau $v = 23 - t^2$ sau $v = 23 \cdot t^2$. unde coeficientul "23" provine de la $\Omega \cdot R1$ adică $2^\circ \cdot 11,5$.

Conform modulelor de calcul și reprezentare din MAPLE 11 rezultă succesiv:

> $\text{MultiInt}(23 + t^2, z = -1.5 .. 1.5, y = 0 .. -\cos(0.2006111 \cdot t), x = 11.5$
 $.. -\sin(0.2006111 \cdot t));$

(5.4)

$-69. \cos(0.2006111000t) (-1. \sin(0.2006111000t) - 11.50000000$
 $- 3. t^2 \cos(0.2006111000t) (-1. \sin(0.2006111000t)$
 $- 11.50000000)$

(5.5)

> $\text{interactive}(-69. \cos(0.2006111000t) (-1. \sin(0.2006111000t)$
 $- 11.50000000 - 3. t^2 \cos(0.2006111000t) (-$
 $-1. \sin(0.2006111000t) - 11.50000000));$

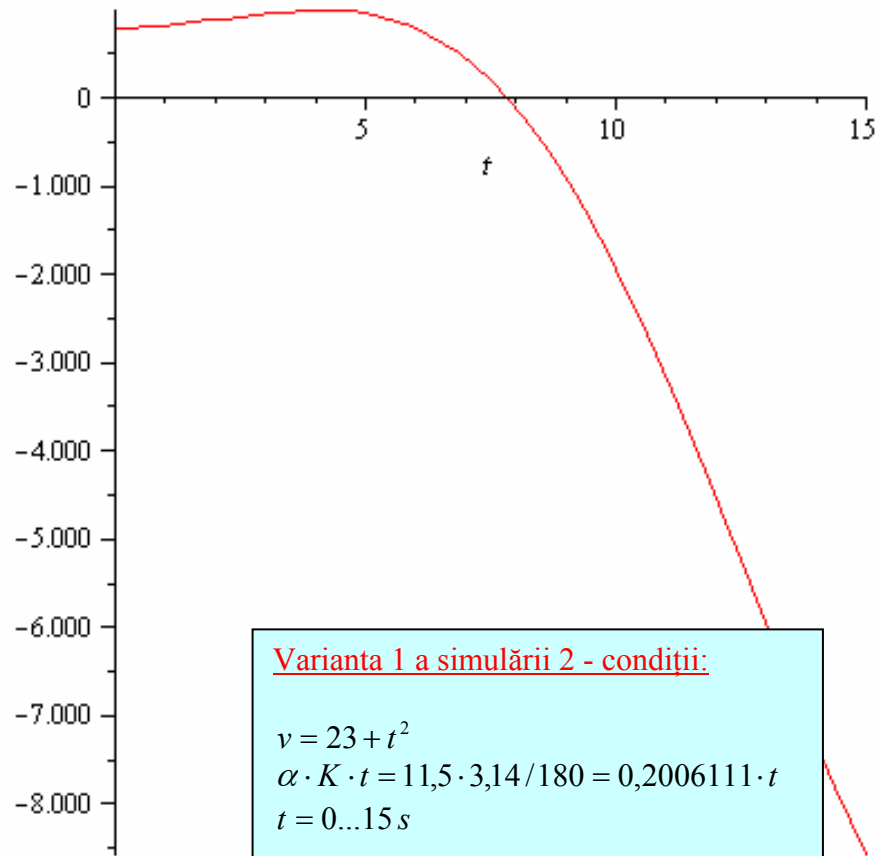


Fig. 5.10 Variația energiei în timp pentru condițiile date (coeficientul "23" se adună)

Concluzii ale analizei graficului - răspuns:

- deși în acest caz modelul consideră în calcul și elementele geometrice ale torului, modul de introducere a acestora nu a fost corespunzător; introducând semnul „+„ între cele două entități;
- o imagine reală este obținută pentru primele 10 s ale curgerii lichidului magnetic.

$$\begin{aligned} &> \text{MultiInt}(23 - t^2, z = -1.5 \dots 1.5, y = 0 \dots -\cos(0.2006111 \cdot t), x = 11.5 \\ &\quad \dots -\sin(0.2006111 \cdot t)); \end{aligned} \quad (5.6)$$

$$\begin{aligned} &-69. \cos(0.2006111000t) (-1. \sin(0.2006111000t) - 11.50000000) \\ &\quad + 3. t^2 \cos(0.2006111000t) (-1. \sin(0.2006111000t) \\ &\quad - 11.50000000) \end{aligned} \quad (5.7)$$

> $interactive(-69. \cos(0.2006111000t) (-1. \sin(0.2006111000t) - 11.50000000) + 3. t^2 \cos(0.2006111000t) (-1. \sin(0.2006111000t) - 11.50000000));$

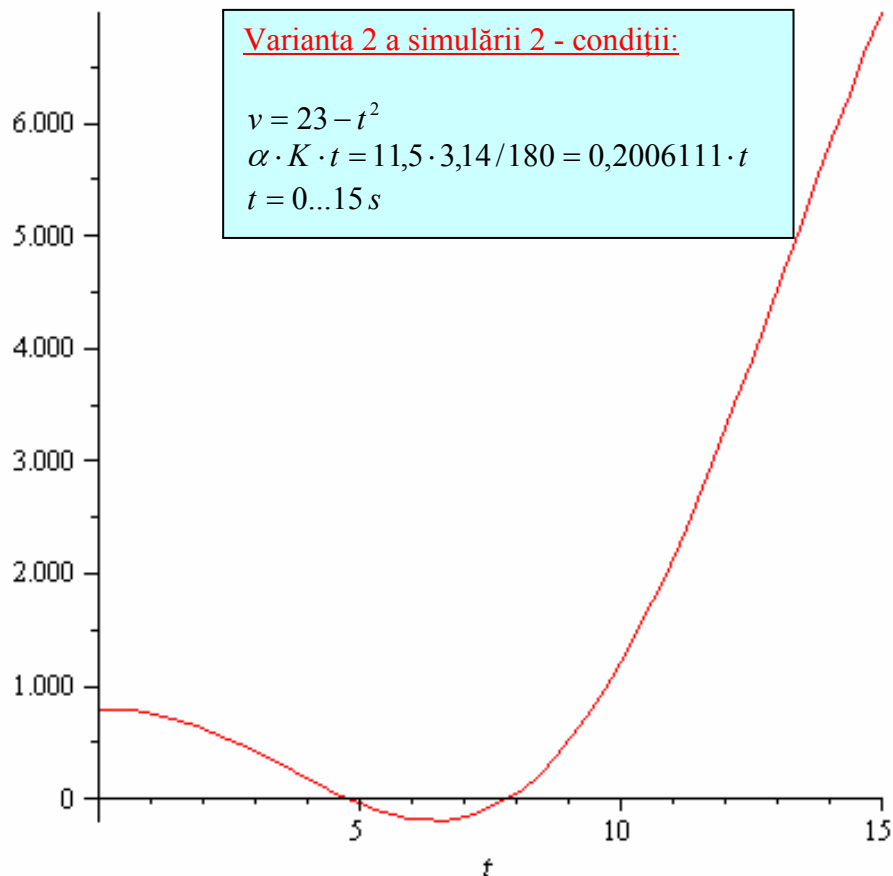


Fig. 5.11 Variația energiei în timp pentru condițiile date (coeficientul "23" se scade)

Concluzii ale analizei graficului - răspuns:

- noul model oferă o imagine reală a procesului pentru întreaga durată de derulare a procesului de curgere: inițierea curgerii se face cu o scădere a energiei, dat fiind faptul că pentru începerea mișcării s-a consumat o cantitate moderată de energie; după inițierea mișcării apare un aport energetic dat de influența gravitației; acesta crește relativ repede, lichidul fiind accelerat prin tor. Această stare de fapt corespunde într-o bună măsură realității, modelul putând fi acceptat sub prezenta formă.

> $MultiInt(23 \cdot t^2, z = -1.5 \dots 1.5, y = 0 \dots -\cos(0.2006111 \cdot t), x = 11.5 \dots -\sin(0.2006111 \cdot t));$ (5.8)

$$-69 \cdot t^2 \cos(0.2006111000t) (-1 \cdot \sin(0.2006111000t) - 11.50000000)$$

(5.9)

$$\text{interactive}(-69 \cdot t^2 \cos(0.2006111000t) (-1 \cdot \sin(0.2006111000t) - 11.50000000));$$

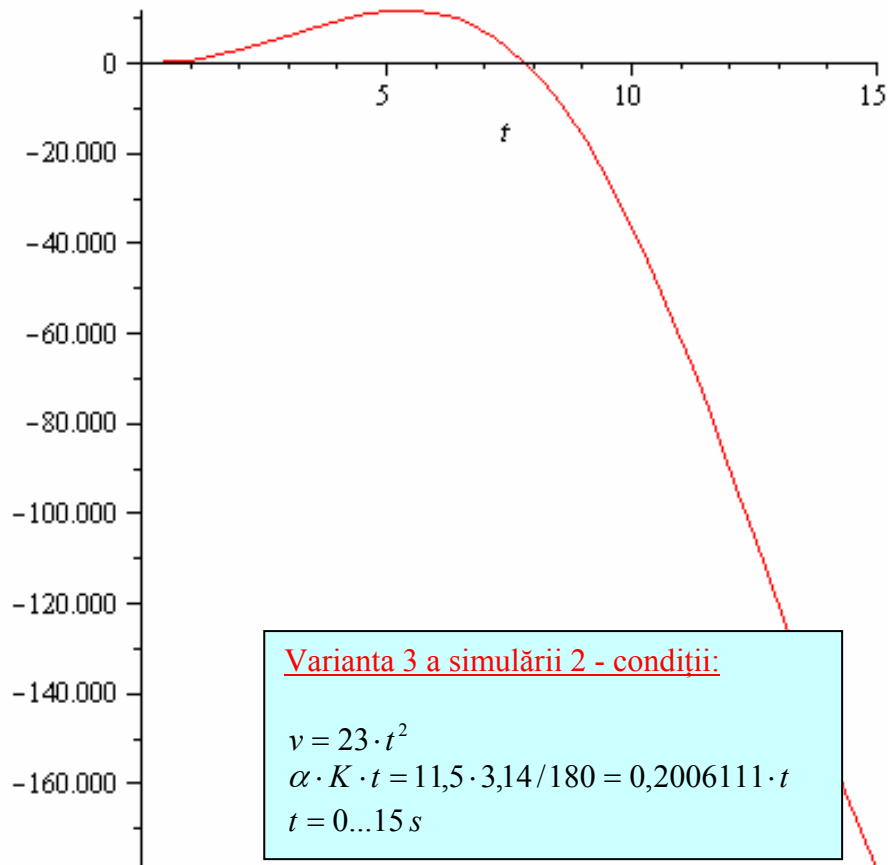


Fig. 5.12 Variația energiei în timp pentru condițiile date (coeficientul "23" este coeficient de proporționalitate)

Concluzii ale analizei graficului - răspuns:

- considerând că viteza crește proporțional cu caracteristica geometrică a torului eroarea modelului a fost relativ mare, simularea evidențiind decelerări exagerate ale fluidului, acesta, nenatural, ajungând în stadiul în care se oprește la mai puțin de 15 s de la pornire.

Simularea 3 (senzor gravitațional).

Condiții:

- se consideră pentru tor o rază exterioară $R = 13 \text{ mm}$ și o rază interioară $r = 10 \text{ mm}$, respectându-se realitatea;
- domeniul de integrare: $R1 = 11,5 \text{ mm}$;

- unghiul la centru (α): $\frac{t}{30}$.
- se consideră că viteza fluidului are expresia $v = 23 - t^3$ sau $v = 23 \cdot t^3$. unde coeficientul "23" provine de la $\Omega \cdot R1$ adică $2^\circ \cdot 11,5$.

Conform modulelor de calcul și reprezentare din MAPLE 11 rezultă succesiv:

$$\begin{aligned} > \text{MultiInt}(23 - t^3, z = -1.5 .. 1.5, y = 0 .. -\cos(0.2006111 \cdot t), x = 11.5 \\ & \quad .. -\sin(0.2006111 \cdot t)); \end{aligned} \quad (5.10)$$

$$\begin{aligned} & -69. \cos(0.2006111000t) (-1. \sin(0.2006111000t) - 11.50000000) \\ & + 3. t^3 \cos(0.2006111000t) (-1. \sin(0.2006111000t) \\ & - 11.50000000) \end{aligned} \quad (5.11)$$

$$\begin{aligned} > \text{interactive}(-69. \cos(0.2006111000t) (-1. \sin(0.2006111000t) \\ & - 11.50000000) + 3. t^3 \cos(0.2006111000t) (- \\ & -1. \sin(0.2006111000t) - 11.50000000)); \end{aligned}$$

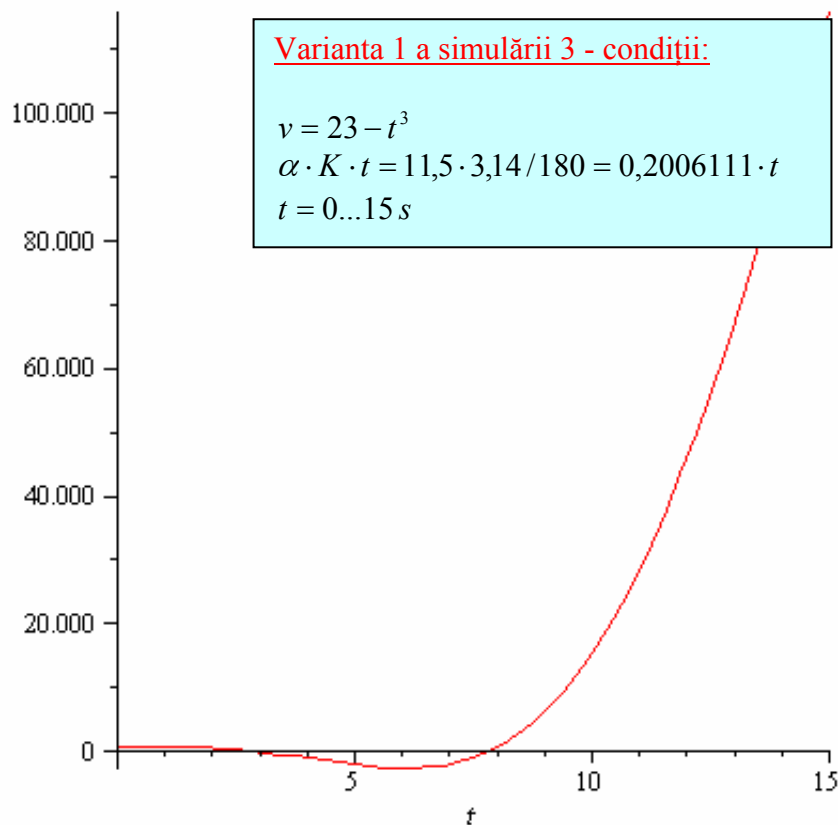


Fig. 5.13 Variația energiei în timp pentru condițiile date (coeficientul "23" se scade)

Concluzii ale analizei graficului - răspuns:

- ca și în cazul în care expresia vitezei conține semnul „-” între coeficientul care exprimă caracteristicile geometrice ale torului și pătratul timpului și în acest caz evoluția energetică a procesului are o bună acoperire în realitate, motiv pentru care și acest model poate fi considerat corespunzător;
- deficiența modelului constă în prezentarea inițierii mișcării ca fiind neconsumatoare de energie, deci pentru primele 5 secunde ale procesului de curgere simularea nu reprezintă fidel realitatea.

> $MultiInt(23 \cdot t^3, z = -1.5 .. 1.5, y = 0 .. -\cos(0.2006111 \cdot t), x = 11.5 .. -\sin(0.2006111 \cdot t));$ (5.12)

$-69 \cdot t^3 \cos(0.2006111000t) (-1 \cdot \sin(0.2006111000t) - 11.50000000)$

(5.13)

> $interactive(-69 \cdot t^3 \cos(0.2006111000t) (-1 \cdot \sin(0.2006111000t) - 11.50000000));$

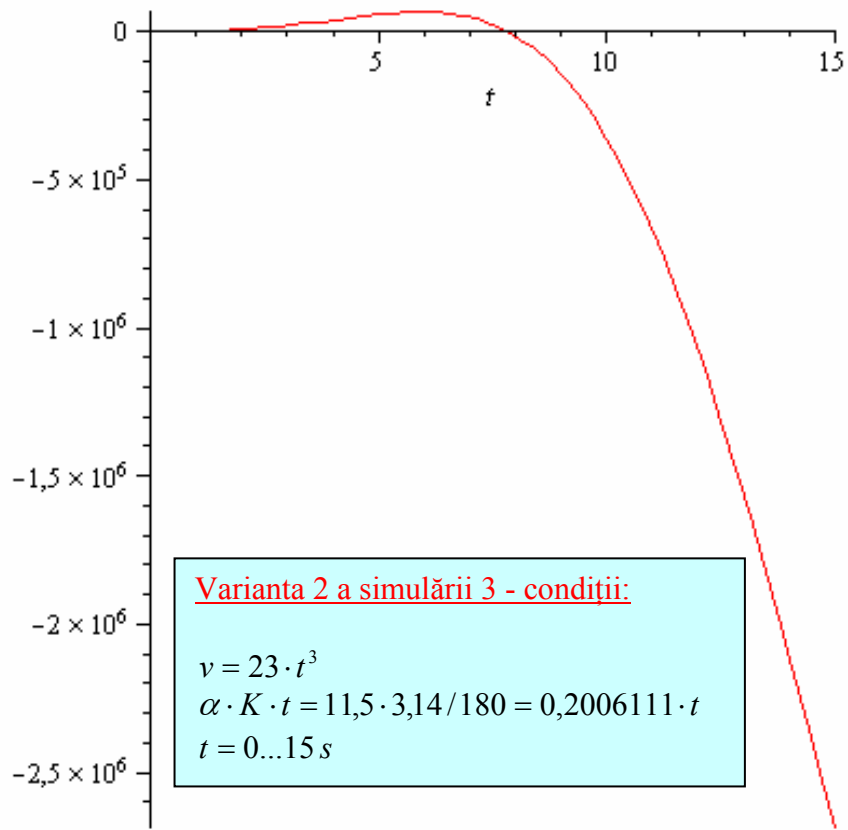


Fig. 5.14 Variația energiei în timp pentru condițiile date (coeficientul "23" este coeficient de proporționalitate)

Concluzii ale analizei graficului - răspuns:

- model nereprezentând stări reale, deci eronat.

Simularea 4 (senzor gravitațional).

Condiții:

- se consideră pentru tor o rază exterioară $R = 22$ mm și o rază interioară $r = 18$ mm, respectându-se realitatea (diametrul real al canalului de tip tor fiind egal cu 4 mm, cele două raze fiind cele menționate anterior);
- domeniul de integrare se modifică astfel: $\Omega \cdot R1$ adică $2^\circ \cdot 20 = 40 = v$;
- $\alpha \cdot K \cdot t = 20 \cdot 3,14/180 = 0,34888888 \cdot t$;
- unghiul la centru (α): $\frac{t}{30}$;

se consideră că viteza fluidului are expresia $v = 40 + t^2$ sau $v = 40 - t^2$ sau $v = 40 \cdot t^2$. Conform modulelor de calcul și reprezentare din MAPLE 11 rezultă succesiv (extragere formule direct din programul de calcul):

$$\begin{aligned} > \text{MultiInt}(40 + t^2, z = -1.5 .. 1.5, y = 0 .. -\cos(0.34888888 t), y = 20 .. \\ & \quad -\sin(0.348888 t)); \end{aligned} \quad (5.14)$$

$$\begin{aligned} & -120. \cos(0.348888800t) (-1. \sin(0.3488880002t) - 20.) \\ & \quad - 3. t^2 \cos(0.348888800t) (-1. \sin(0.3488880002t) - 20.) \end{aligned} \quad (5.15)$$

$$\begin{aligned} > \text{interactive}(-120. \cos(0.348888800t) (-1. \sin(0.3488880002t) \\ & \quad - 20.) - 3. t^2 \cos(0.348888800t) (-1. \sin(0.3488880002t) \\ & \quad - 20.)); \end{aligned}$$

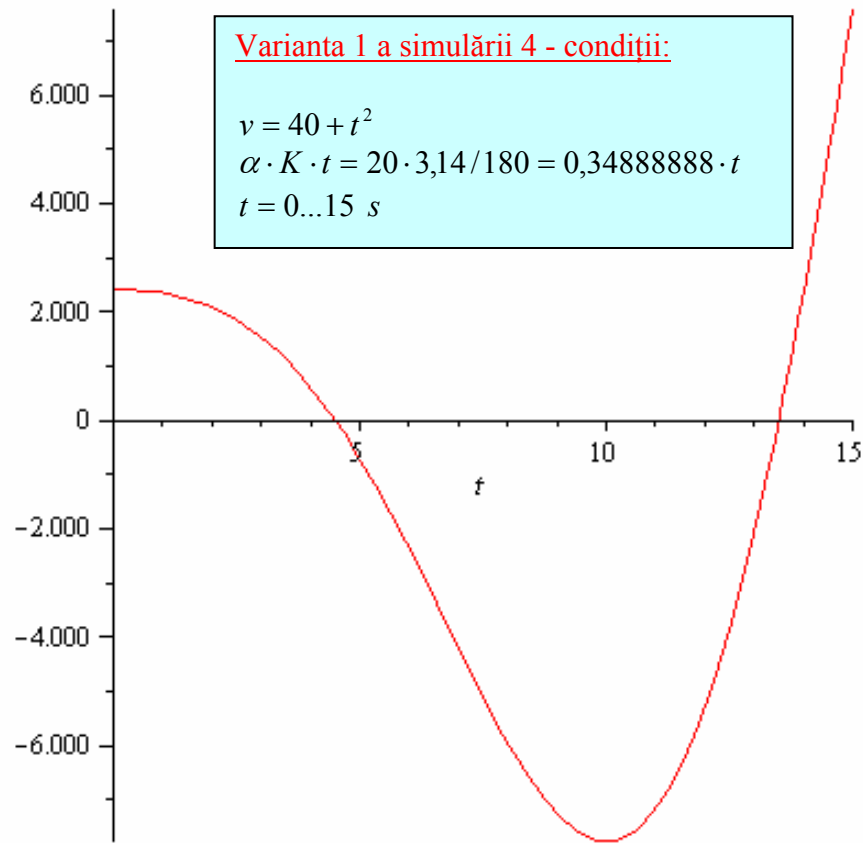


Fig. 5.15 Variația energiei în timp pentru condițiile date (coeficientul "40" se adună)

Concluzii ale analizei graficului - răspuns:

- scăderea relativ mare a energiei în primele 10 s nu este justificată fizic, motiv pentru care modelul se consideră eronat.

> $MultiInt(40 - t^2, z = -1.5 .. 1.5, y = 0 .. -\cos(0.34888888 t), y = 20 .. -\sin(0.348888 t));$

(5.16)

$$-120. \cos(0.348888800t) (-1. \sin(0.3488880002t) - 20.) \\ + 3. t^2 \cos(0.348888800t) (-1. \sin(0.3488880002t) - 20.)$$

(5.17)

> $interactive(-120. \cos(0.3488888800t) (-1. \sin(0.3488880002t) - 20.) + 3. t^2 \cos(0.3488888800t) (-1. \sin(0.3488880002t) - 20.));$

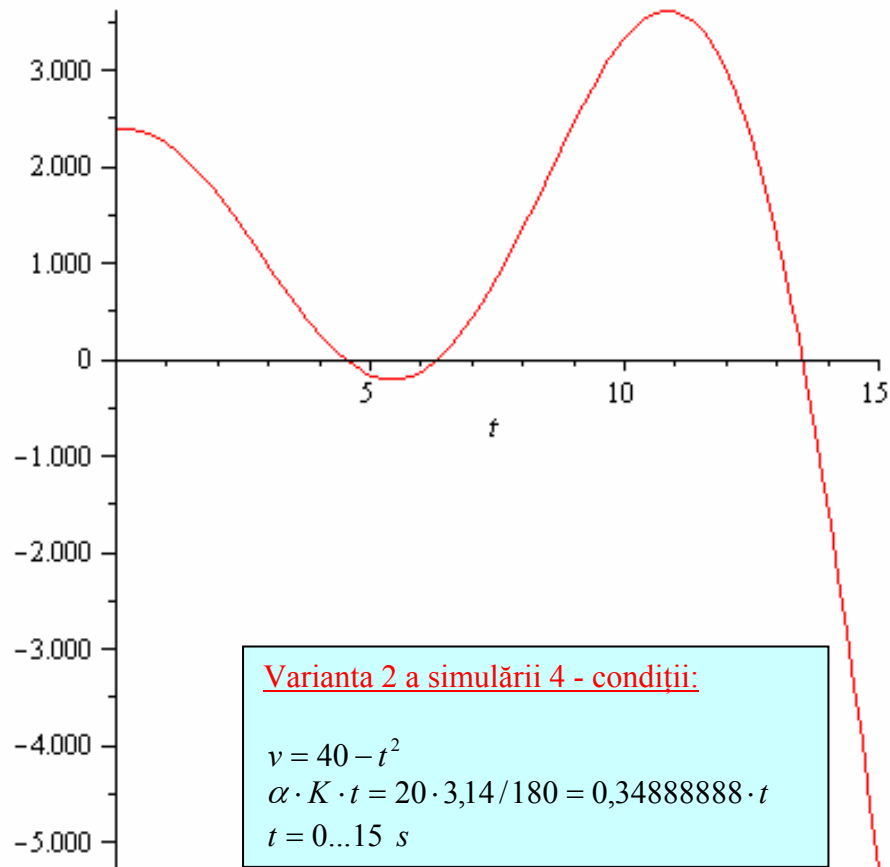


Fig. 5.16 Variația energiei în timp pentru condițiile date (coeficientul "40" se scade)

Concluzii ale analizei graficului - răspuns:

- scăderea relativ mare a energiei după primele 10 s nu este justificată fizic, motiv pentru care modelul se consideră eronat;
- modelul funcționează numai pentru procese scurte, deci când senzorul gravitațional funcționează pentru determinarea unghiurilor suficient de mici încât să nu presupună deplasări pe durate mari de timp ale lichidului magnetic; așadar senzorul cu dimensiuni mari poate funcționa în cazul unghiurilor mici.

$$\begin{aligned} &> \text{MultiInt}(t^2, z = -1.5 \dots 1.5, y = 0 \dots -\cos(0.34888888 t), y = 20 \dots \\ &\quad -\sin(0.348888 t)); \end{aligned} \tag{5.18}$$

$$\begin{aligned} &-3. t^2 \cos(0.3488888800t) (-1. \sin(0.3488880002t) - 20.) \end{aligned} \tag{5.19}$$

> *interactive* (-3. $t^2 \cos(0.3488888800t)$ (-1. $\sin(0.3488880002t)$ - 20.));

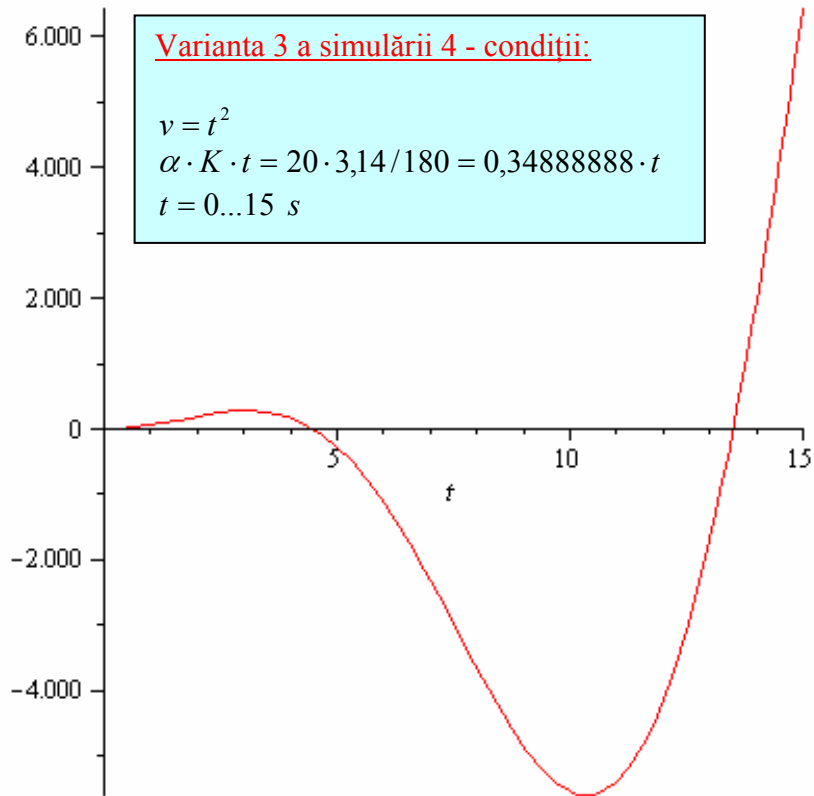


Fig. 5.17 Variația energiei în timp pentru condițiile date (fără coeficientul "40")

Concluzii ale analizei graficului - răspuns:

- ca și în cazul senzorului cu dimensiuni mici și în acest caz modelul vitezei de curgere se consideră eronat.

Simularea 5 (senzor gravitațional).

Condiții:

- se consideră pentru tor o rază exterioară $R = 22$ mm și o rază interioară $r = 18$ mm, respectându-se realitatea (diametrul real al canalului de tip tor fiind egal cu 4 mm, cele două raze fiind cele menționate anterior);
- domeniul de integrare se modifică astfel: $\Omega \cdot R1$ adică $2^\circ \cdot 20 = 40 = \nu$;
- $\alpha \cdot K \cdot t = 20 \cdot 3,14 / 180 = 0,34888888 \cdot t$;
- unghiul la centru (α): $\frac{t}{30}$;

se consideră că viteza fluidului are expresia $v = 40 + t^2$ sau $v = 40 - t^2$ sau $v = 40 \cdot t^2$. Conform modulelor de calcul și reprezentare din MAPLE 11 rezultă succesiv:

$$\begin{aligned} > \text{MultiInt}(t^3, z = -1.5 .. 1.5, y = 0 .. -\cos(0.34888888 t), y = 20 .. \\ & \quad -\sin(0.348888 t)); \end{aligned} \quad (5.20)$$

$$-3. t^3 \cos(0.348888800t) (-1. \sin(0.3488880002t) - 20.) \quad (5.21)$$

$$\begin{aligned} > \text{interactive}(-3. t^3 \cos(0.348888800t) (-1. \sin(0.3488880002t) \\ & \quad - 20.)); \end{aligned}$$

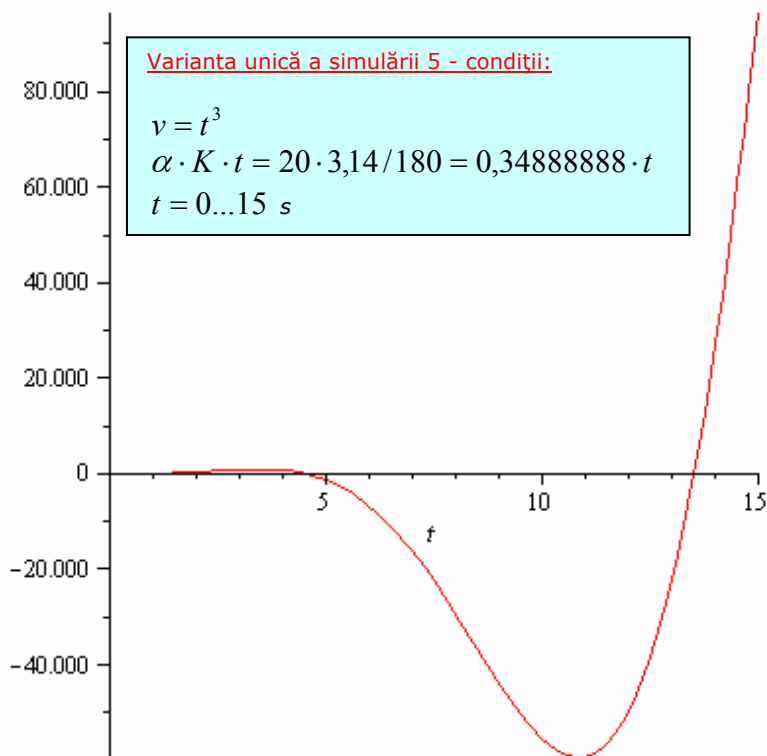


Fig. 5.18 Variația energiei în timp pentru condițiile date (fără coeficientul "40")

Concluzii ale analizei graficului - răspuns:

- ca și în cazul senzorului cu dimensiuni mici și în acest caz modelul vitezei de curgere se consideră eronat.

Pornind de la cele rezultate în urma simulărilor se consideră că modelul de curgere cel mai potrivit este modelul în care viteza variază după legea:

- $v = 23 - t^2$ pentru senzorul cu dimensiuni mici;
- $v = 40 - t^2$ pentru senzorul cu dimensiuni mari.

5.1.4 Realizarea senzorului gravitațional pentru monitorizarea unghiului β

Realizarea efectivă a senzorului gravitațional a comportat următoarele etape:

- alegerea materialului pentru confecționarea torului;
- realizarea torului;
- introducerea lichidului magnetic;
- realizarea celor două bobine;
- montarea pe capul de sudare cu arc electric.

Inițial s-a încercat confecționarea torului dintr-un tub de plastic sau din sticlă. După o serie de încercări, toate reușite, s-a ajuns la concluzia că o astfel de soluție va conduce tot timpul la realizarea unui senzor cu dimensiuni relativ mari. Cel mai mic senzor realizat prin această metodă a avut peste 40 mm în diametru. Această dimensiune a fost considerată nepotrivită pentru caracterul de nanostructurat al senzorului. Din acest motiv s-a optat pentru o altă soluție constructivă și anume realizarea torului ca și canal în interiorul unui bloc de material nemagnetic.

Materialul ales pentru realizarea corpului senzorului a fost un aliaj al aluminiului cu magneziul: AlMg5.

Corpul senzorului a fost proiectat ca fiind compus din două componente identice asamblabile prin lipire. Pe fețele interioare ale acestora au fost prelucrate prin așchiere canale circulare identice având diametrul egal cu 4 mm, iar secțiunea semicirculară. În acest fel, prin asamblarea celor două componente s-a obținut un canal continuu, circular, având secțiunea un cerc cu diametrul de 4 mm (figura 5.19).

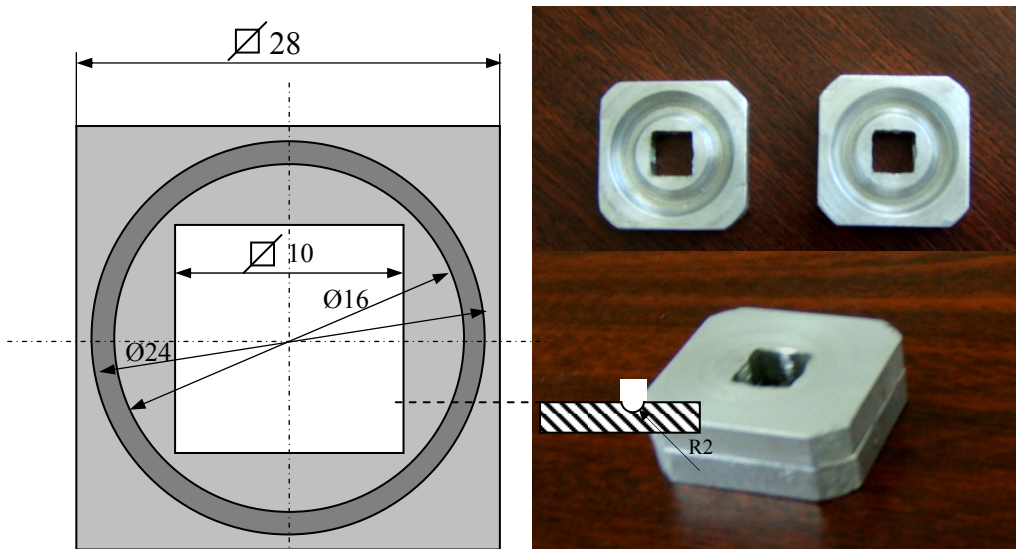


Fig. 5.19 Corpul senzorului gravitațional

Partea centrală a corpului a fost decupată după o formă pătrată, astfel încât să se faciliteze construirea ulterioară a bobinei. Acceptându-se dimensiunile pereților

interiori, astfel încât să poată fi facil prelucrați, s-a ajuns la o dimensiune de gabarit de numai 28 mm, dimensiune considerată acceptabilă în raport cu nivelul semnalului obținut.

După realizarea canalului circular s-a introdus lichidul magnetic într-unul din cele două semicanale, astfel încât să se ocupe aproximativ 60% din înălțimea semicanalului. În acest fel, la realizarea canalului final prin asamblarea celor două componente, s-a ajuns la ocuparea a aproximativ o treime din întregul canal. Cele două componente ale corpului sensorului au fost apoi asamblate prin lipire. Pentru lipire s-a utilizat un adeziv pentru lipit metale confecționat din rășini epoxidice.

După asamblarea prin lipire a corpului sensorului a urmat realizarea celor două bobine, conform figurii 5.20 și măsurarea inductanței proprii a bobinei.

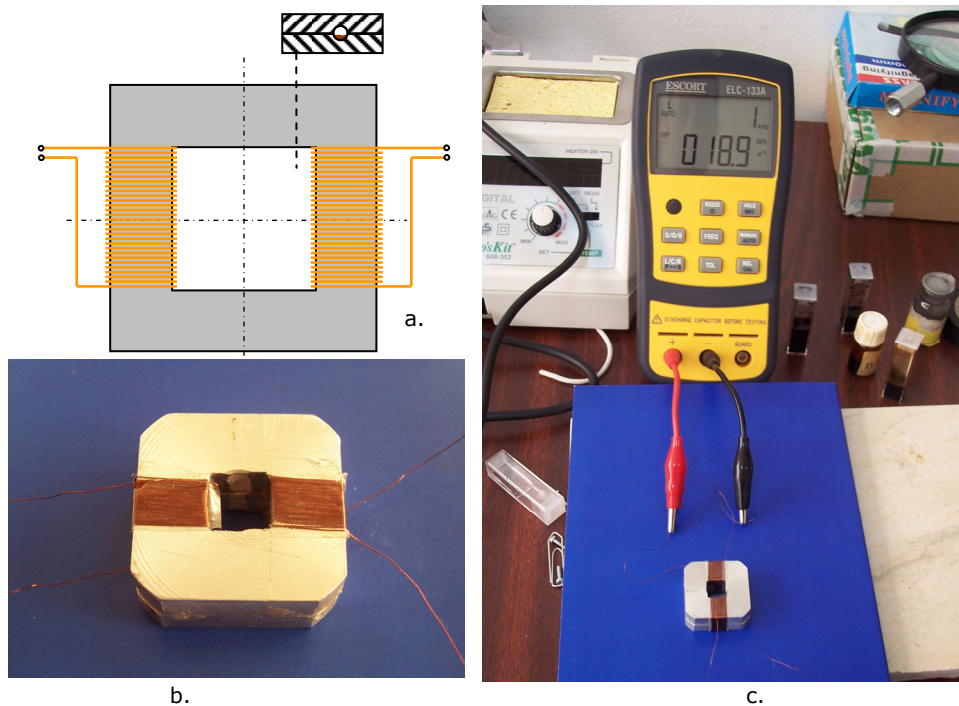


Fig. 5.20 Montarea bobinelor pe corpul sensorului gravitațional și măsurarea inductanței proprii (a. schema corpului sensorului, b. imaginea corpului sensorului, c. imagine din timpul măsurării inductanței proprii a bobinei, înainte de introducerea lichidului magnetic)

5.1.5 Integrarea sensorului gravitațional în pistolul pentru sudare WIG

Pentru verificare sensorul a trebuit să fie montat pe un cap de sudare cu arc electric. În vederea efectuării acestei operații a fost constituit un sistem hibrid de sudare compus dintr-un cap de sudare cu fascicul laser Nd-YAG și un cap de sudare WIG. A fost, așadar, necesară montarea sensorului pe pistolul de sudare WIG.

În dorința legitimă de a asigura și o manevrabilitate facilă a pistolului și un aspect cu o oarecare estetică, s-a adoptat ideea integrării sensorului în corpul pistolului WIG.

În plus, pornind de la necesitatea poziționării într-un singur plan (figura 5.21) a celor două componente ale sistemului hibrid (capul pentru sudare cu fascicul laser și pistolul WIG), s-a ajuns la concluzia că există riscul modificării accidentale a poziției pistolului WIG, prin ieșirea acestuia din planul respectiv și afectând în acest mod sistemul hibrid.

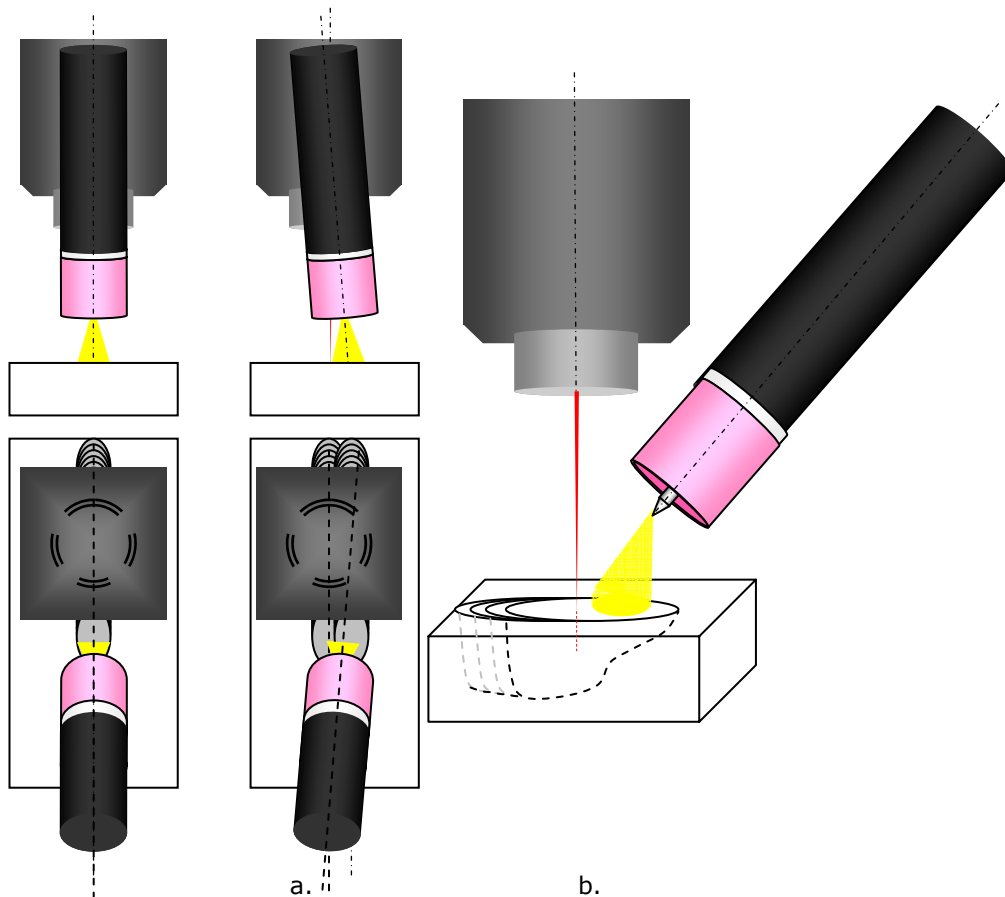


Fig. 5.21 Poziționarea după planul care conține direcția de avans (a. în același plan – situație de poziționare corectă, b. în planuri distincte – situație de poziționare incorectă)

Pentru reducerea acestui risc s-a considerat oportună și realizarea unui al doilea inclinometru nano-magneto-fluidic care să fie montat pe pistolul WIG astfel încât să se poată sesiza cu precizie înclinarea pistolului după un plan perpendicular pe planul care trebuie să conțină sistemul hibrid. Acest al doilea senzor este tot un senzor gravitațional, fiind asemănător celui prezentat anterior, cu diferența că dimensiunile sale sunt crescute ușor din rațiuni legate de montarea pe pistolul WIG (figura 5.22). În figura 5.23 este prezentat pistolul WIG cu cei doi senzori montați pe el, formând împreună un corp comun.

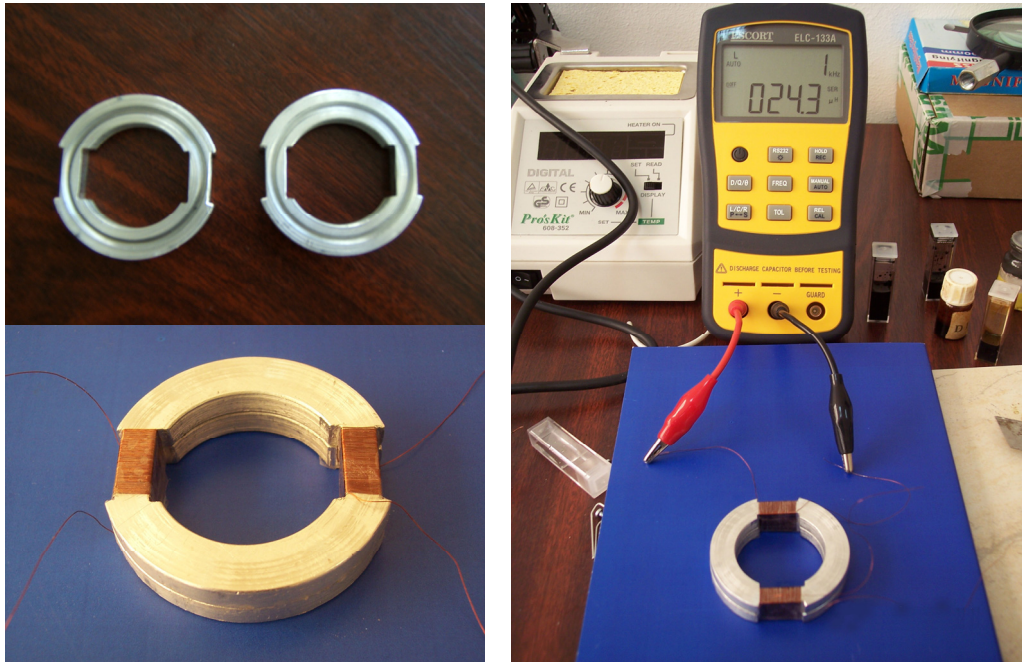


Fig. 5.22 Inclinatorul pentru determinarea poziției într-un plan perpendicular pe planul celor două capete de sudare

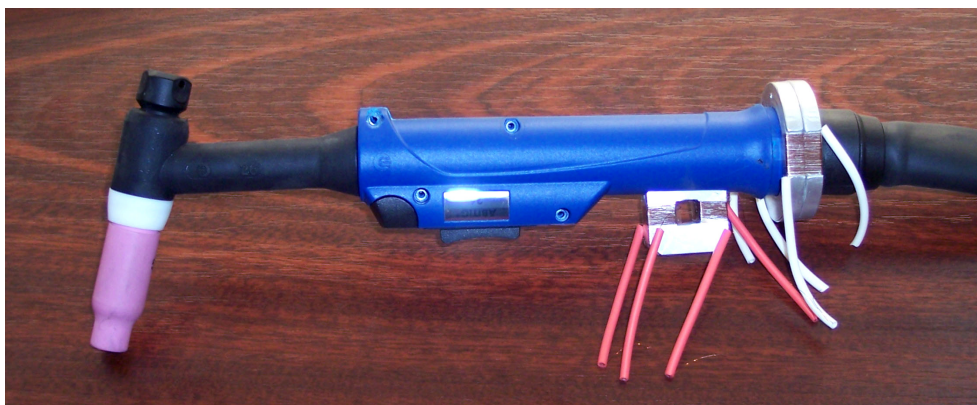
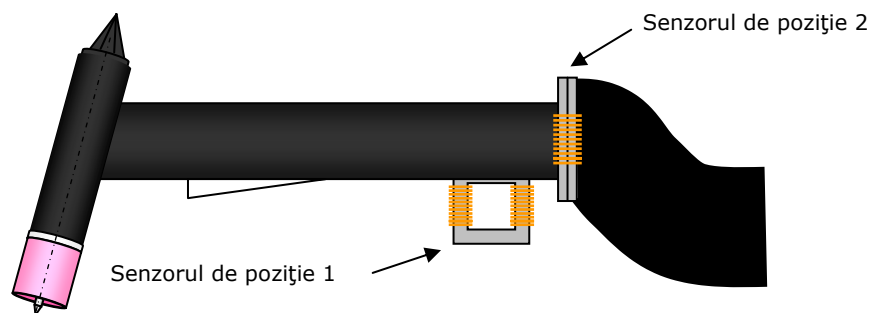


Fig. 5.23 Montarea celor doi senzori pe pistolul WIG

Prin montarea celor doi senzori s-a obținut un pistol WIG cu senzori integrați care poate fi cu succes propus pieței producătorilor de echipamente de sudare.

5.1.6 Achiziția și interpretarea semnalului celor doi senzori nanostructurați de tip inclinometru

Funcționarea sensorului se manifestă prin variația inductanței bobinei în care intră sau din care iese lichidul magnetic. Ambii senzori sunt similari din punct de vedere constructiv și funcțional și, în plus, în cazul ambilor senzori semnalul util provine de la o singură bobină. Această din urmă stare de fapt este dată de soluția constructivă propriu-zisă a senzorilor, soluție care prevede că în poziția neutră (încălinare 0°) lichidul este poziționat în afara ambelor bobine montate pe corpul sensorului, deci inductanța măsurabilă la capetele fiecărei bobine este chiar inductanța inițială a bobinelor.

Așadar, sensorul va oferi la ieșire un semnal relativ la valoarea inițială a inductanței bobinei, dar un semnal simplu, acceptabil direct ca valoare.

Etapele prelucrării acestui semnal sunt prezentate în figura 5.24.

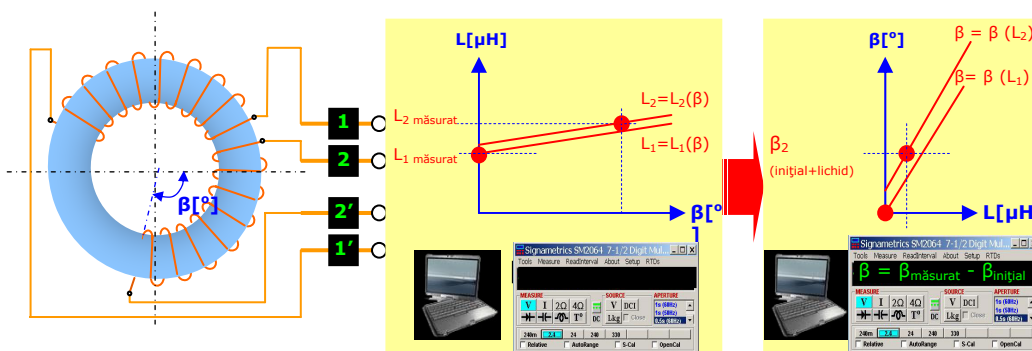


Fig. 5.24 Obținerea valorii absolute pentru unghiul de rotire a sensorului

Fiecare dintre cele două bobine prezintă câte două terminale conectate la un sistem de achiziție a datelor. Semnalul preluat este inductanța momentană a bobinei. Fără miez magnetic bobina are propria ei inductanță, inductanță determinată de caracteristicile constructive ale bobinei. Așadar, fără miez magnetic, semnalul la nivelul terminalelor este egal cu cel inițial (fără miez magnetic). Introducând lent lichidul în interiorul bobinei, inductanța începe să crească de la valoarea inițială la o valoare determinată de cantitatea de lichid magnetic introdus pe post de miez magnetic. Această valoare este preluată discret de către sistemul de achiziție a datelor și introdusă într-un sistem de calcul numeric (calculator + software) care extrage din ea valoarea inițială a inductanței bobinei (inductanța proprie a bobinei). Astfel se obține valoarea absolută a inductanței pentru o anumită cantitate de lichid magnetic introdus în interiorul bobinei. Cum introducerea lichidului se face prin rotirea sensorului, între valorile inductanței și unghiul de rotire există o legătură directă. Conform celor prezentate atât în capitolul 4 cât și la începutul acestui capitol, relația dintre cele două este liniară. Sistemul de calcul numeric va fi astfel capabil să extragă valoarea unghiului de rotire în funcție de valoarea momentană a inductanței, aplicând o simplă relație polinomială de ordinul I.

Conform celor prezentate anterior, concepția sensorului a ținut cont de un aspect relativ important: în poziția neutră să nu se găsească lichid magnetic în nici una dintre bobine. În acest fel rotind sensorul în oricare dintre cele două sensuri posibile, după axa sa centrală, într-una dintre bobine nu se va găsi deloc lichid magnetic, iar semnalul dat de acea bobină va avea valoarea inițială (figura 5.25).

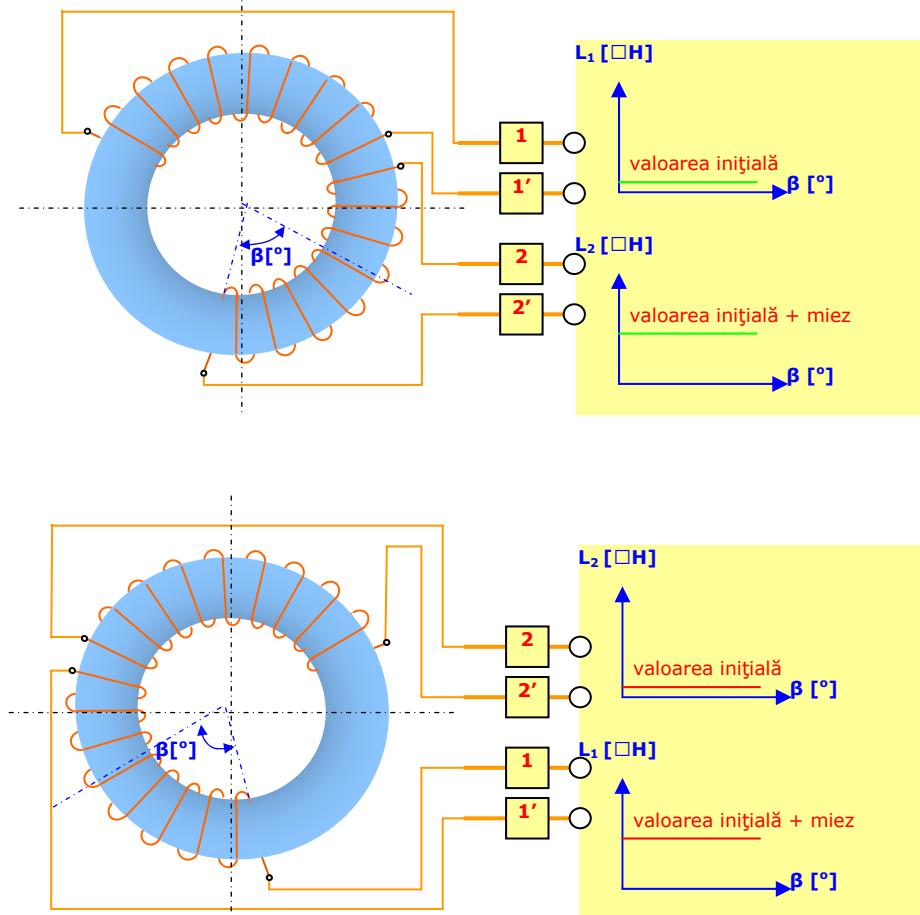


Fig. 5.25 Rotirea în orice sens a sensorului menține una dintre bobine fără miez

În acest fel semnalul dat de bobina cu miez magnetic lichid este semnalul util, operându-se astfel cu valori directe și nu diferențiale.

Funcționarea celor doi senzori se face după curbele prezentate în figura 5.15. Aceste curbe au fost determinate cu senzorii montați pe pistolul de sudare cu arc electric, conform figurii 5.26, în regim offline.

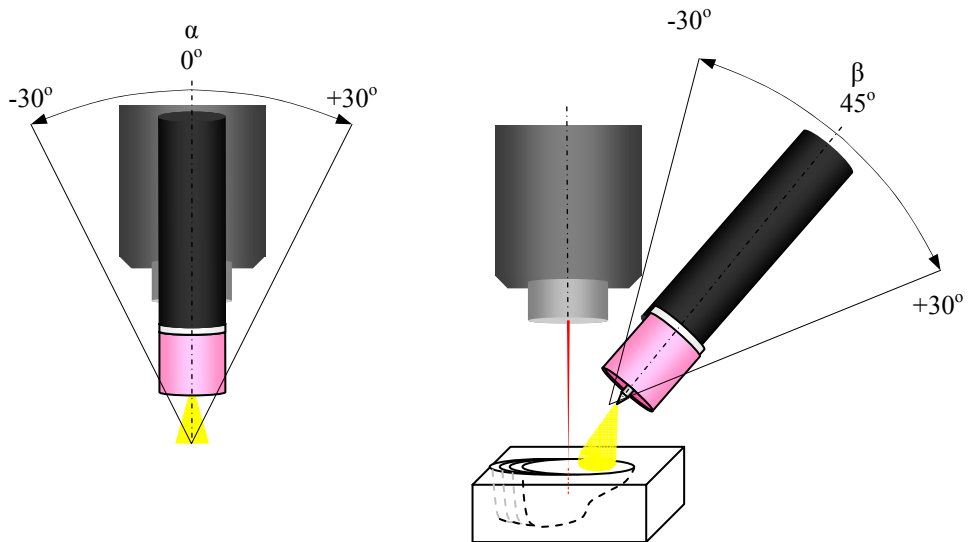
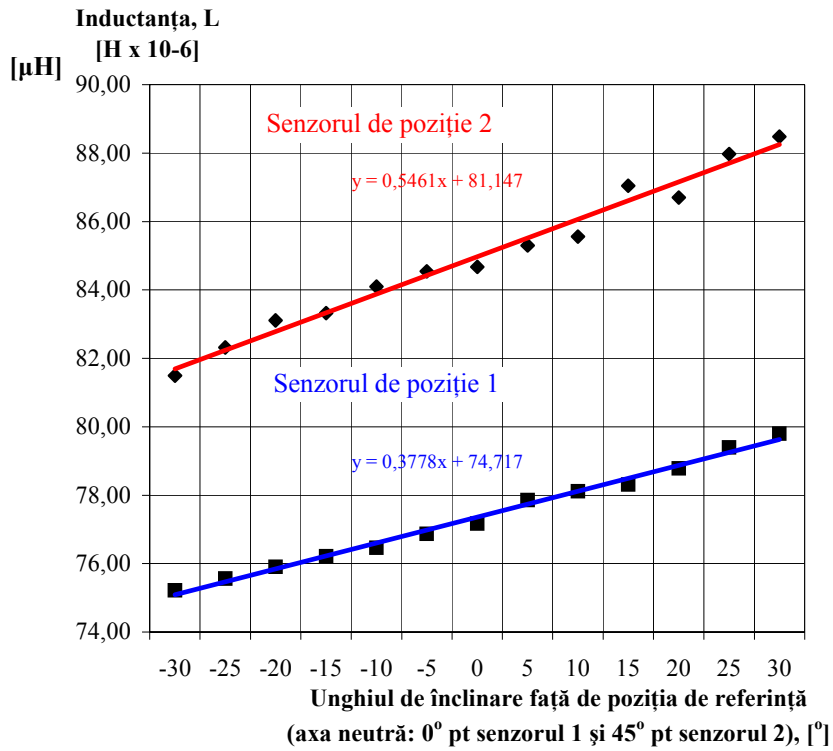


Fig. 5.26 Caracteristicile de funcționare ale celor doi senzori de poziționare

5.2 Senzor nanostructurat pentru determinarea unghiului de înclinare a capului de sudare cu laser

Capul de sudare cu fascicul laser are o poziție bine determinată, poziție dată de eficiența acțiunii fasciculului. Astfel, o poziție perpendiculară pe suprafața supusă încălzirii asigură o pătrundere mai bună comparativ cu poziționarea sub un alt unghi decât cel de 90° . Situația are loc indiferent de planul care conține verticala în punctul de încălzire (figura 5.27).

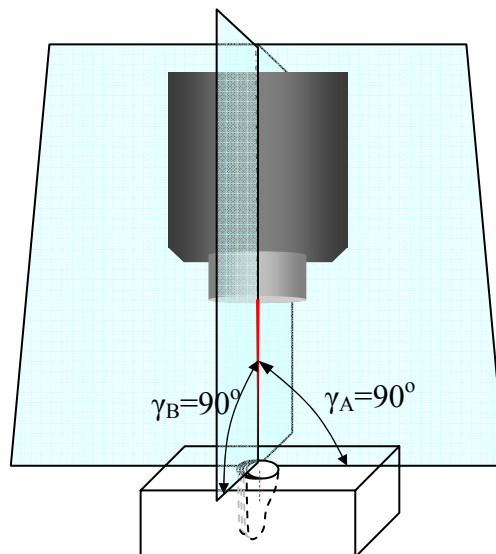


Fig. 5.27 Poziția cea mai recomandată pentru capul de sudare cu fascicul laser

Uzual, în timpul procesului de sudare, poziția capului de sudare cu fascicul laser este menținută constantă. În acest caz este necesară numai o poziționare inițială, imediat premergătoare procesului de sudare. Pentru această acțiune se propune elaborarea unui nou senzor nanostructurat, care, fiind tot un inclinometru nano-magneto-fluidic, va fi conceput din punct de vedere constructiv și funcțional similar celor doi senzori prezentați anterior.

5.2.1 Principiul constructiv-funcțional al senzorului

Este evident faptul că fiecare dintre cei doi senzori prezentați anterior pot fi utilizați cu succes și în această aplicație. Interesul însă, este orientat către confecționarea de senzori având dimensiuni cât mai mici pentru a nu se afecta funcționarea sistemului hibrid. Primii doi senzori, prin necesitățile impuse de funcționarea sistemului hibrid, sunt caracterizați prin dimensiuni de gabarit relativ mari. Senzorul pentru capul de sudare cu fascicul laser, cap având dimensiuni relativ mici (aproximativ $80 \times 50 \times 50$ mm), montându-se pe acesta din urmă, va trebui să ocupe un spațiu mai mic decât ocupă senzorii montați pe capul de sudare cu arc electric. Din acest motiv se va încerca elaborarea unui senzor care să aibă măcar una dintre dimensiunile de gabarit mai mică decât dimensiunea similară a senzorilor de pe capul de sudare cu arc electric. În figura 5.28 a, b și c sunt prezentate schema de principiu și imaginea senzorului de tip inclinometru propus pentru

determinarea unghiului de înclinare a capului de sudare cu fascicul laser din componența sistemului hibrid de sudare laser-arc, precum și schema funcțională a senzorului. Similitudinea constructiv-funcțională cu predecesorii săi este întreruptă de forma sa liniară și de existența în poziția neutră a lichidului magnetic în ambele bobine.

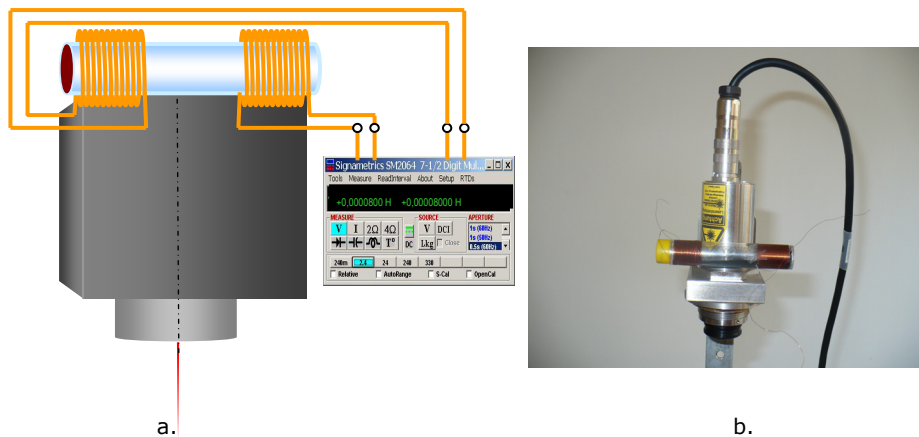


Fig. 5.28 Senzorul de poziționare a capului de sudare cu fascicul laser
 a. schița de principiu; b. realizare și adaptare senzor la dispozitivul laser

5.2.2 Realizarea senzorului pentru monitorizarea unghiului γ de înclinare a capului de sudare cu fascicul laser

Realizarea efectivă a senzorului de poziționare a constat din alegerea unui tub din material plastic flexibil și transparent, având un diametru interior de 8 mm. Diametrul relativ mare a fost ales pentru a se asigura o cantitate suficientă de miez magnetic lichid în interiorul bobinelor, încât să existe variații sensibile ale inductanței bobinei în care intră fluidul. Pe capetele tubului s-au montat două bobine relativ identice, având o inductanță inițială proprie (figura 5.29).

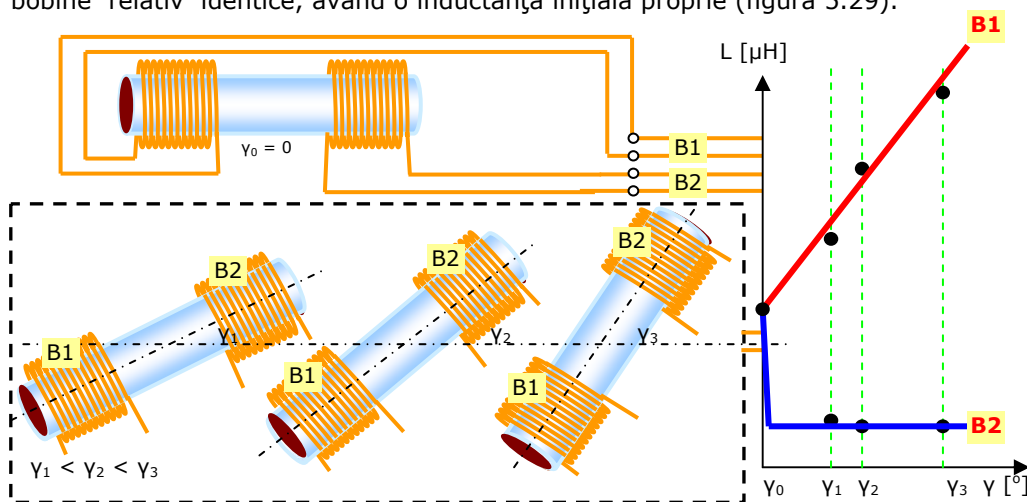


Fig. 5.29 Principiul de funcționare al senzorului

Terminalele celor două sunt conectate la un instrument de măsurare de tip RLC-metru pentru determinarea momentană a valorilor inductanței. Pentru realizarea bobinelor s-a utilizat sârmă specială pentru bobinaj, având un diametru egal cu 0,35 mm și izolație exterioară din email. Drept lichid magnetic a fost utilizat același LM-SF32, în cantitate de 0,5 ml.

5.2.3 Achiziția, prelucrarea și interpretarea semnalului oferit de bobine

Cele două bobine oferă propriul semnal. Dacă în poziția neutră (poziția orizontală) în ambele bobine se găsește lichid magnetic, la modificarea unghiului de înclinare într-o bobină scade cantitatea de miez lichid, pe când în cealaltă începe să crească. Specific cantității de lichid magnetic introdus în tub îi este faptul că în momentul golirii unei bobine, cealaltă se umple. Așadar, de la valori egale ale inductanței, prin modificarea unghiului de înclinare se poate ajunge la un maxim al inductanței în cazul unei bobine și la un minim în cazul celeilalte bobine, acest minim fiind egal de fapt cu inductanța proprie a bobinei fără miez magnetic.

Semnalul util (figura 5.30) reprezintă diferența dintre semnalul maxim furnizat de cele două bobine și valoarea specifică poziției neutre oferind astfel o dublă informație:

- sensul de rotire a sensorului, deci sensul în care este înclinat capul de sudare cu laser;
- valoarea relativă (calculabilă diferențial) a unghiului de înclinare a capului de sudare.

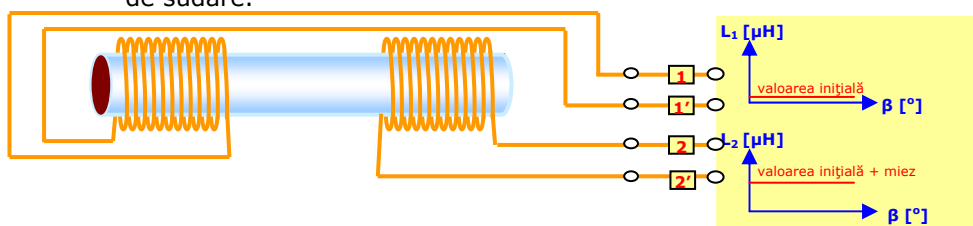


Fig. 5.30 Variația inductanței bobinei cu unghiul de înclinare a sensorului

Funcționarea sensorului se face după curbele prezentate în figura 5.31, curbe ridicate cu sensorul montat pe capul de sudare cu fascicul laser, în regim offline.

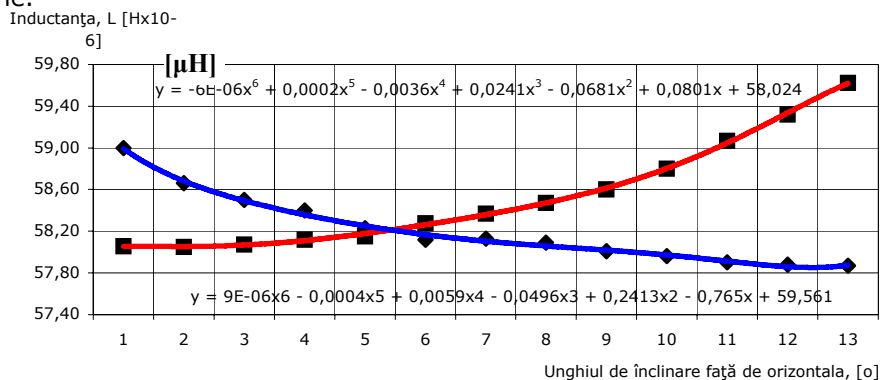


Fig. 5.31 Caracteristica statică de funcționare a sensorului de poziționare

Din figura 5.31 se observă că variațiile inductanței sunt polinoame de grad mare ceea ce indică faptul că răspunsul senzorului prin variația inductanței la înclinare este unul neliniar.

5.3 Senzor nanostructurat cu impulsuri temporale pentru determinarea vitezei de deplasare a tractorului de sudare

Viteza de sudare reprezintă un parametru tehnologic determinant pentru calitatea rezultatului procesului de sudare. Din acest motiv cunoașterea și/sau controlarea acestui parametru reprezintă un deziderat al utilizatorilor procedurii de sudare hibridă laser-arc, și nu numai. Pornind de la această stare de fapt se propune un senzor nanostructurat care, indirect, poate fi utilizat la determinarea vitezei de deplasare a tractorului de sudare pe care se fixează capul de sudare hibrid (figura 5.32).

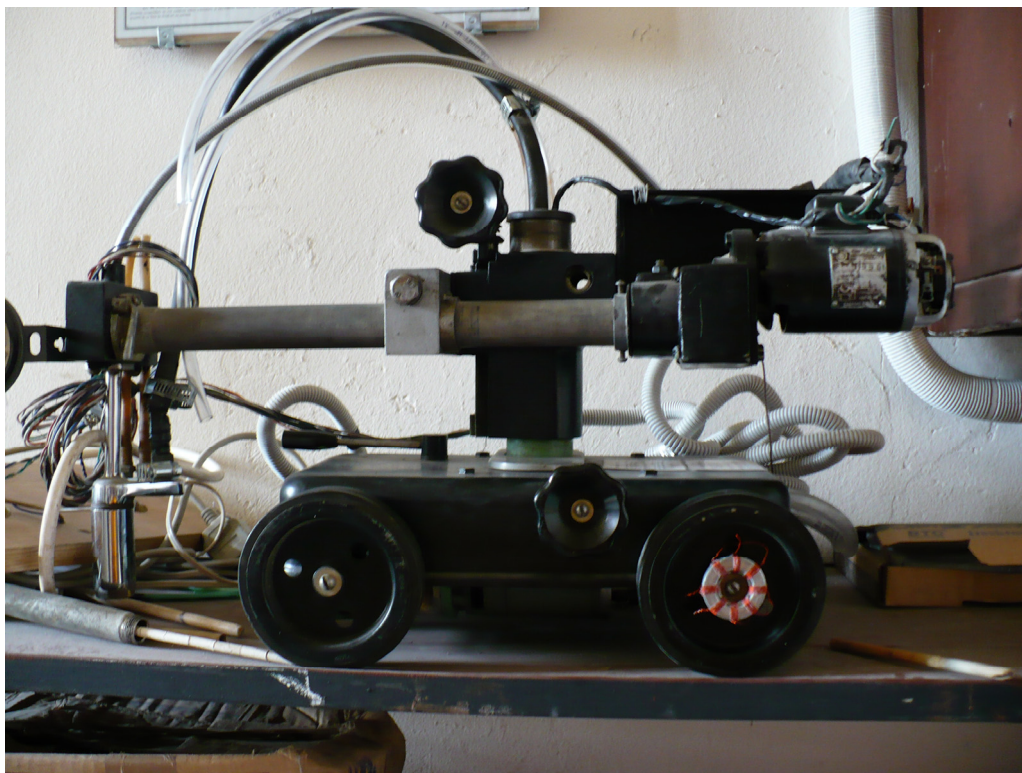


Fig. 5.32 Tractor utilizabil la aplicarea procedurii de sudare hibridă

5.3.1 Principiul constructiv-funcțional al senzorului

Principiul de funcționare a senzorului propus este asemănător celor ale senzorilor prezentați anterior. Trecerea unui volum de lichid nanostructurat magnetizabil prin interiorul unei bobine provoacă variații cunoscute aprioric ale inductanței acesteia din urmă. Utilizând o soluție constructivă asemănătoare

primului inclinometru prezentat, este posibilă proiectarea unui senzor, cu dimensiuni relativ mici, care să sesizeze numărul de rotiri ale unei anumite roți a tractorului de sudare. Cunoscându-se caracteristicile geometrice ale acestei roți (defășurata fibrei de rază maximă – figura 5.33) și numărul de rotiri ale roții într-un interval de timp dat, este posibilă determinarea prin calcul (deci indirect!) a vitezei de deplasare a tractorului.

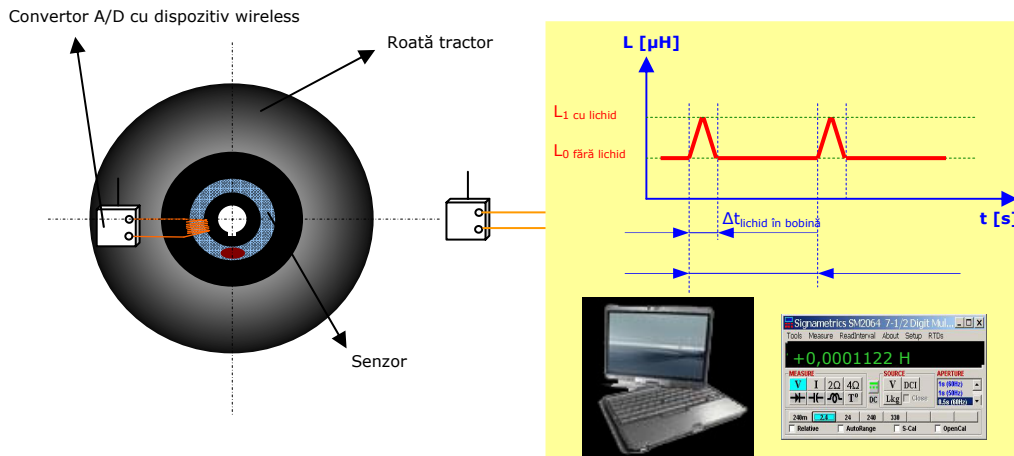


Fig. 5.33 Montarea pe roată a senzorului și tipul semnalului de ieșire

Soluția constructivă constă în montarea pe una dintre roțile tractorului a unui tor, conținând nanolichid cu comportare magnetică, asemănător celui utilizat la senzorii de unghi montați pe pistolul de sudare WIG. Cantitatea de lichid cu comportare magnetică este relativ mică, ea depinzând de dimensiunile torului și de lungimea bobinei montate pe tor. Principiul de realizare al experimentului este prezentat în figura 5.34.

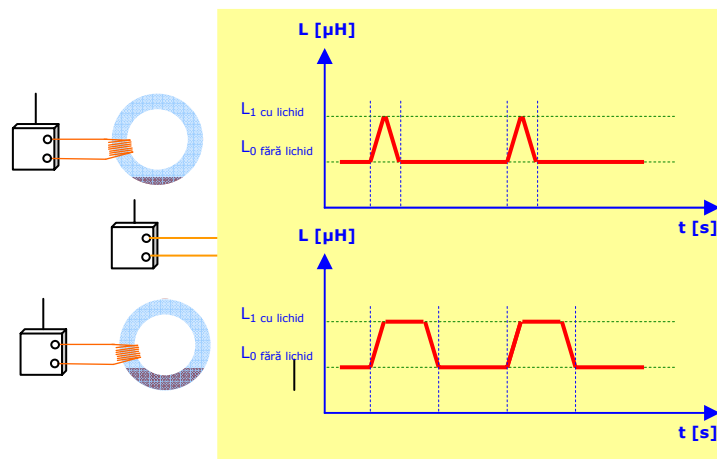


Fig. 5.34 Principiul de funcționare al senzorului și achiziția semnalului

Condițiile de experimentare pentru studiul variației inductanței la trecerea fluidului magnetic sunt prezentate în tabelul 5.1

Tabel 5.1 Condițiile de realizare a experimentului pentru senzorul de viteză

Volum tor [ml]	Volum lichid [ml]	Tip lichid magnetic	Lungime bobină [mm]	Viteză deplasare tractor [cm/min]
1,5	0,1	LM-SF32	5	20
1,5	0,2	LM-SF32	5	20
1,5	0,3	LM-SF32	5	20
1,5	0,5	LM-SF32	5	20

Experimentările preliminare de sesizare efectuate au evidențiat faptul că în funcție de lungimea volumului de lichid din interiorul torului perioada de menținere a inductanței la valori ridicate variază aproape liniar (puterea a II-a având un coeficient de 9×10^{-16} , deci, considerând erorile de măsurare a timpului se poate concluziona cu o bună precizie faptul că variația este de ordinul I), conform figurii 5.35.

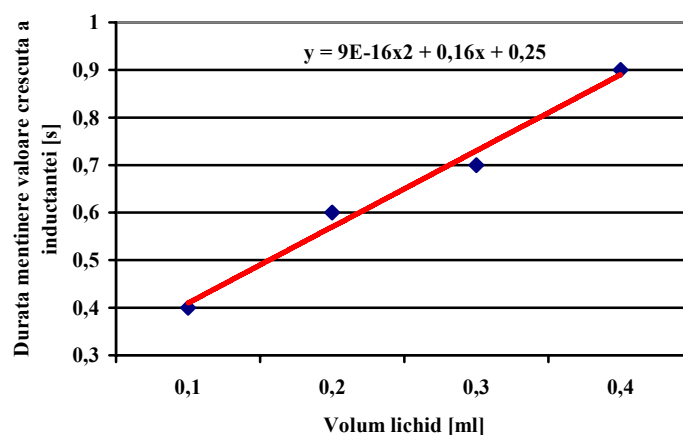


Fig. 5.35 Influența volumului de lichid magnetic asupra răspunsului de ieșire

Pornind de la această experiență s-a decis introducerea unui volum de lichid care să aibă o lungime (în interiorul torului) egală cu lungimea bobinei.

Funcționarea senzorului se manifestă prin variația inductanței bobinei în care intră sau din care iese lichidul. Cum lichidul magnetic are o greutate specifică proprie relativ ridicată ($1,2 \dots 1,4 \text{ kg/dm}^3$ în funcție de natura și vâscozitatea fluidului purtător și în funcție de natura și de masa de particule solide magnetizabile) acesta se va găsi într-un echilibru general în partea inferioară a torului, fără a se înregistra sedimentări ale particulelor pe perioade mai mici de 24 de ore (studiile arată că rata de sedimentare a fazei solide este de 2-3 % într-un interval de trei luni). La rotirea torului, lichidul magnetic tinde să își păstreze poziția, gravitațional. Pentru lichide mai puțin vâscoase menținerea poziției este mai facilă decât în cazul lichidelor cu vâscozitate ridicată. În cazul acestora din urmă, creșterea vâscozității produce o curgere mai lentă, situație în care menținerea gravitațională a poziției este sensibil

mai greoaie. În cazul lichidului ales spre utilizare, LM-SF32, menținerea poziției a fost suficient de bună până la viteze de avans al tractorului de 3,5 m/min. Domeniul de viteze 0...3,5 m/min este suficient de larg pentru derularea procesului de sudare hibridă și nu numai.

În timpul rotirii torului, fixat rigid pe roata tractorului, lichidul tinde să își mențină poziția inferioară, în timp ce bobina, fixată la rândul ei rigid pe tor, avansează circular trecând periodic peste volumul de lichid magnetic. Așadar, diferit de soluția constructivă a senzorului de unghi, în cazul acestui senzor nu se deplasează lichidul magnetic în interiorul unei bobine fixe, ci se deplasează bobina relativ la volumul de lichid magnetic, acesta din urmă fiind considerat relativ fix datorită forței de gravitație.

La fiecare rotire bobina îmbracă o dată volumul de lichid magnetic și își modifică în sens crescător inductanța.

5.3.2 Realizarea senzorului cu impulsuri temporale pentru determinarea vitezei de sudare

Constructiv, senzorul este asemănător celui pentru determinarea unghiurilor, prezentat la începutul capitolului. În interiorul unui canal cu secțiune pătrată, prelucrat în două piese simetrice confecționate din aliajul de aluminiu $AlSi_3$, s-a introdus un volum de 0,1 ml lichid magnetic de tip LM-SF32. După lipirea etanșă a celor două componente, peste canalul cu lichid s-au realizat prin înfășurare directă opt bobine identice având inductanțele proprii egale cu 67 μH .

Pentru mărirea preciziei de lucru, pe tor nu a fost instalată numai o bobină (conform celor prezentate la principiul de funcționare a senzorului) ci opt bobine, dispuse astfel încât să împartă circumferința torului în opt sectoare egale. Astfel, la o deplasare egală cu desfășurata roții sistemul emite opt impulsuri și nu unul singur. Datorită acestei modificări sistemul poate decela și modificări ale vitezei care au loc în mai puțin decât o rotație completă a roții (figura 5.36).



Fig. 5.36 Senzor nanostructurat de viteză

Capetele bobinelor au fost conectate la o mufă USB pentru facilitarea achiziției valorii momentane a inductanței bobinei. În mufa USB s-a conectat un

sistem de recepție-emisie wireless. Soluția adoptată s-a datorat faptului că senzorul fiind în mișcare conectarea acestuia la un instrument de măsură de tip RLC-metru ar fi fost dificilă. Prin soluția adoptată (emițător wireless) s-a reușit transmiterea informațiilor necesare monitorizării, fără o conecție hardware care să complice sistemul.

Fixarea senzorului pe roata tractorului s-a făcut concentric cu axa roții, astfel încât să fie evitate orice erori legate de curgerea cu viteză constantă a fluidului magnetic în interiorul canalului.

5.3.3 Achiziția și interpretarea semnalului senzorului cu impulsuri temporale pentru determinarea vitezei de sudare

Achiziția și transmiterea semnalului util se face prin ansamblului următor (figura 5.37)

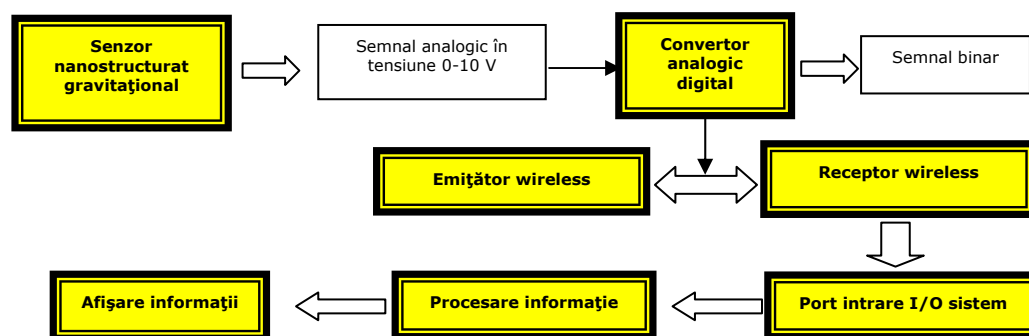


Fig. 5.37 Schema bloc a sistemului de achiziție

Principiul de achiziție și procesare a informațiilor pentru furnizarea de date corecte utilizatorului constă în preluarea semnalului electric furnizat de bobina parcursă de fluidul inteligent, bobina fiind inclusă într-un amplificator tip rețea Wien astfel încât variația inductanței bobinei din cadrul rețelei se transpune în variația tensiunii de ieșire a amplificatorului. Semnalul în tensiune (0 .. 10) V este preluat prin intermediul unui circuit electronic compus dintr-un voltmetru și un convertor analogic digital cu emițător wireless încorporat. Semnalul binar de la ieșirea convertorului analogic digital este transmis prin undă către un receptor instalat într-un sistem de calcul. Porturile de intrare-ieșire ale sistemului de calcul sunt comandate printr-un software specializat creat de autorul lucrării și prezentat în anexa 5. Calculul pentru afișarea vitezei tractorului de sudare din aplicația informatică se regăsește în relațiile următoare.

Diametrul roții tractorului este egal cu 100 mm. Desfășurata roții oferă un perimetru egal cu:

$$P = 2 \cdot \pi \cdot R = \pi \cdot D = 3,14 \cdot 100 = 314 \text{ mm} \quad (5.22)$$

unde:

- P – perimetrul roții [mm]
- R – raza roții [mm].

Așadar, la o rotație completă a roții tractorului, acesta avansează cu 314 mm. În timpul efectuării acestei deplasări se înregistrează câte o variație a

inductanței fiecărei bobine. Astfel, între două semnale impuls succesive, se parcurge o distanță dată, D :

$$D = \frac{P}{n} = \frac{P}{8} = \frac{314}{8} = 39,25 \text{ mm} \quad (5.23)$$

unde n reprezintă numărul de semnale impuls date de sistemul senzorial pentru o rotație completă a roții tractorului

Măsurând timpul dintre două semnale impuls succesive, $t_{\text{intre_2_semnale}}$, este posibilă determinarea vitezei pe porțiunea parcursă, D , aceasta fiind egală cu:

$$v_{\text{intre_2_semnale}} = \frac{D}{t_{\text{intre_2_semnale}}} = \frac{39,25}{t_{\text{intre_2_semnale}}} \text{ [mm]} \quad (5.24)$$

Astfel se cunoaște viteza pe porțiuni relativ mici parcurse de tractor. La nivelul unei rotații complete se poate estima o viteză medie calculabilă cu relația:

$$v_{\text{medie/rotatie}} = \frac{\sum_{i=1}^n v_{\text{intre_2_semnale}}}{n} \text{ [mm]} \quad (5.25)$$

iar la nivelul unei distanțe oarecare, d , parcurse de tractor, viteza medie poate fi apreciată cu relația:

$$v_{\text{medie}} = \frac{\sum_{j=1}^N v_{\text{medie/rotatie}}}{N} \text{ [mm]} \quad (5.26).$$

5.4 Senzor nanostructurat de vibrații pentru sesizarea stării de deplasare a tractorului de sudare

Schimbarea stării de mișcare a tractorului de sudare (porniri, opriri, variații bruște ale vitezei de deplasare) este sesizabilă prin schimbarea nivelului vibrațiilor diverselor componente ale tractorului. Cunoașterea acestor modificări de stare este importantă din punct de vedere tehnologic, ea oferind informații cu privire la momentul în care trebuie inițiate arcul electric și fasciculul laser (în cazul pornirii, din starea de repaus, a tractorului), la momentul în care acestea trebuie modificate în vederea păstrării unei energii liniare date (în cazul variației vitezei de sudare), precum și la momentul în care cele două surse termice trebuie întrerupte simultan sau succesiv (în cazul finalizării deplasării tehnologice).

Pornind de la această stare de fapt se propune proiectarea și realizarea unui senzor de vibrații care să sesizeze aceste variații de stare.

5.4.1 Principiul constructiv-funcțional al senzorului de vibrații

Principiul de funcționare a senzorului propus se bazează pe proprietatea fluidelor magnetice de a fi conductoare electrice în condiții magnetice date. La introducerea lichidului magnetic în interiorul unui câmp magnetic nanoparticulele magnetizabile se orientează după direcția liniilor de câmp. În funcție de raportul dintre volumul de nanoparticule magnetizabile și volumul total al lichidului magnetic, orientarea conduce la formarea unor șiruri continue de nanoparticule, șiruri asimilabile unui conductor electric.

Exploatănd această proprietate a lichidelor magnetice se propune utilizarea unui lichid magnetic, bun conductor electric, pe post de mediu conductor care să închidă circuitele electrice deschise.

Soluția constructiv funcțională propusă pentru senzorul de vibrații este prezentată în figura 5.35. Într-o sferă confecționată dintr-un material izolator (polimer, ceramică sau material lemnos) se introduce o cantitate judicios determinată de lichid magnetic. Circular, pe ecuatorul sferei, sunt montate contacte electrice deschise, sub formă de simple borne. Pentru o bună precizie se consideră oportună (în baza unor experimentări preliminare efectuate) montarea a opt perechi de borne, iar cantitatea de lichid magnetic introdusă în sferă trebuie să ocupe un volum care să acopere minim 90% din raza sferei (figura 5.38).

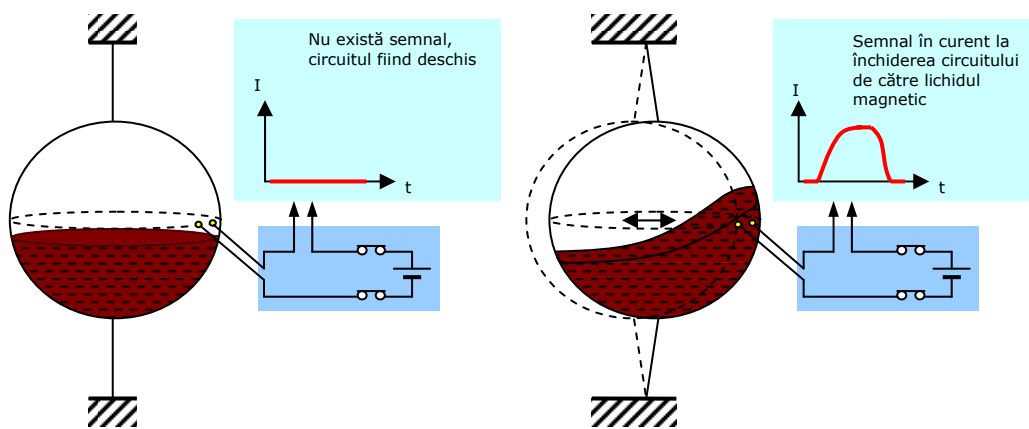


Fig. 5.38 Principiul de funcționare a senzorului de vibrații

Elementele componente din structura senzorului sunt prezentate în figura 5.39.

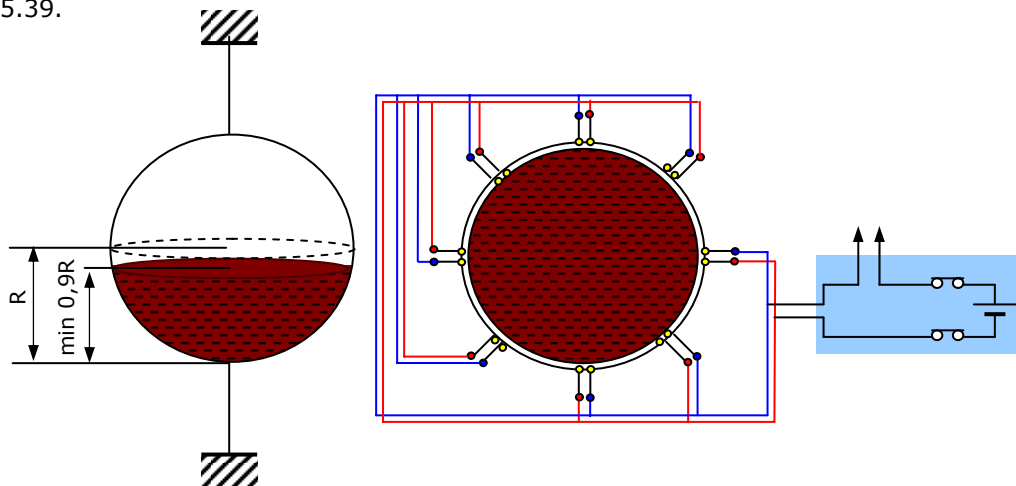


Fig. 5.39 Elementele component-constructive ale senzorului

În acest fel devin perceptibile și vibrațiile caracterizate prin amplitudini foarte mici, specifice schimbărilor mici și aleatoare ale stării de deplasare.

Sfera este suspendată între două fire flexibile fixate rigid, în stare întinsă, între două puncte ale tractorului de sudare, dispuse după o direcție verticală.

La modificarea stării de mișcare a tractorului sistemul format sfera cu lichid magnetic și cele două fire flexibile va începe să vibreze. Vibrarea, chiar dacă va fi caracterizată de o amplitudine relativ mică, va produce, inerțial, o mișcare a lichidului magnetic. Acesta va atinge o parte dintre contactele montate pe ecuatorul sferei închizând circuitul electric construit. Astfel, se va transmite un semnal în tensiune, semnal care atestă modificarea stării de mișcare.

5.4.2 Modelarea și simularea comportării sensorului de vibrații în condiții definite specifice exploatării

Funcționarea sensorului este dificil de anticipat, datorită faptului că, în realitate, există o serie de parametri perturbatori, dintre care se amintesc:

- lipsa de omogenitate a lichidului magnetic;
- existența unui număr finit de contacte electrice, dispuse fără a se cunoaște cu precizie direcția în care va evolua valul de lichid magnetic care se formează în momentul modificării stării de mișcare a tractorului de sudare;
- lipsa de omogenitate a materialului polimeric din care este confecționată sfera;
- variația inerentă a grosimii peretelui sferei;
- variația reacției motorii a lichidului cu dimensiunile elementelor constructive ale sensorului.

Ținând cont de aceste deficiențe ale unui calcul precis al comportării sensorului, se propune modelarea și simularea acestei comportări în condițiile introducerii unor ipoteze simplificatoare care să permită un calcul facil și obținerea unor rezultate cu erori relativ mici. Aceste ipoteze simplificatoare sunt următoarele:

- lichidul magnetic este omogen și izotrop în orice punct al său și după orice direcție;
- sfera este perfectă, grosimea pereților acesteia este constantă, iar materialul din care este confecționată nu prezintă neomogenități, defecte, discontinuități sau variații de grosime;
- vibrația se produce într-un singur plan, considerat cunoscut; planul respectiv conține cel puțin o pereche de contacte care pot închide circuitul electric;
- dimensiunile elementelor componente ale sensorului și elementele definitorii ale vibrației sunt considerate cunoscute aprioric.

Pornind de la aceste aspecte se procedează la elaborarea modelului matematic al evoluției procesului de vibrație a sistemului fire flexibile – sferă, pornindu-se de la ecuația definitorie a unei vibrații plane elastice (5.28). În continuare sunt prezentate construcțiile matematice care își propun să modeleze comportarea ansamblului fire flexibile – sferă în condiții de vibrație impuse. Modelele sunt simulate în programul MAPLE 11, rezultatele simulărilor fiind interpretate comparativ cu starea reală de vibrație pentru alegerea modelului celui mai potrivit.

Simularea 1 – condiții de simulare:

- model matematic elaborat: soluția ecuației coardei vibrante (5.29), cu vibrație în plan (limitare la variabila x , alături de variabila timp t – abordare datorită impunerii ca vibrația să aibă loc într-un singur plan,

plus datorită faptului că ecuația coardei vibrante prezintă simetrie vis-à-vis de planurile de lucru):

> $PDE1 := \text{diff}(u(x, t), t, t) = -1/10 * \text{diff}(u(x, t), x, x);$

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} u(x, t) = -\frac{1}{10} \frac{\partial^2}{\partial x^2} u(x, t) \quad (5.28)$$

$IBC1 := \{u(x, 0) = 0, u(-30, t) = 0, D[1](u)(-30, t) = 0,$
 $u(30, t) = 0, D[1](u)(30, t) = 0\};$

$\{u(x, 0) = 0, u(-30, t) = 0, D_1(u)(-30, t) = 0, u(30, t) = 0,$
 $D_1(u)(30, t) = 0\}$

$\text{struc1} := \text{pdsolve}(PDE1, \text{HINT} = f(x) * g(t));$

$(u(x, t) = f(x) g(t)) \&\text{where} \left[\left\{ \frac{d^2}{dx^2} f(x) = -c_1 f(x), \frac{d^2}{dt^2} g(t) = \right. \right.$
 $\left. \left. -\frac{1}{10} -c_1 g(t) \right\} \right]$

$PDEtools[\text{build}](\text{struc1});$

$$\begin{aligned} u(x, t) = & -C3 \sin\left(\frac{1}{10} \sqrt{10} \sqrt{-c_1} t\right) -C1 e^{\sqrt{-c_1} x} \\ & + \frac{-C3 \sin\left(\frac{1}{10} \sqrt{10} \sqrt{-c_1} t\right) -C2}{e^{\sqrt{-c_1} x}} \\ & + -C4 \cos\left(\frac{1}{10} \sqrt{10} \sqrt{-c_1} t\right) -C1 e^{\sqrt{-c_1} x} \\ & + \frac{-C4 \cos\left(\frac{1}{10} \sqrt{10} \sqrt{-c_1} t\right) -C2}{e^{\sqrt{-c_1} x}} \end{aligned} \quad (5.29)$$

- semnul „-” al coeficientului $a = -\frac{1}{10}$ introdus în ecuația coardei vibrante nu afectează considerațiile tehnice ale problemei, el având rolul de a pune de acord modelul cu valorile măsurate în prealabil; valoarea acestui coeficient se alege, în general, în funcție de unele considerente legate de sistemul vibrant: natura materialului, tensiunea din firul flexibil, etc.
- constantele de integrare cu semnul „-” sunt de obicei lăsate la alegerea utilizatorului; pentru calculul numeric al soluției și pentru simulare ele se vor considera pentru început +1;
- condițiile inițiale consideră faptul că sistemul fire flexibile – sferă se găsesc în stare de repaus, în poziție neutră, înainte de apariția vibrației, motiv pentru care toți parametri au valoarea zero;

- dimensiunile sistemului considerate în calcul sunt: lungime fire – 30 mm, diametru sferă – 30 mm.

> *with(plots)* :

$$\text{interactive} \left(\sin\left(\frac{1}{10} \sqrt{10} \cdot t\right) \cdot e^x + \frac{\sin\left(\frac{1}{10} \sqrt{10} \cdot t\right)}{e^x} + \cos\left(\frac{1}{10} \sqrt{10} \cdot t\right) \cdot e^x + \frac{\cos\left(\frac{1}{10} \sqrt{10} \cdot t\right)}{e^x} \right);$$

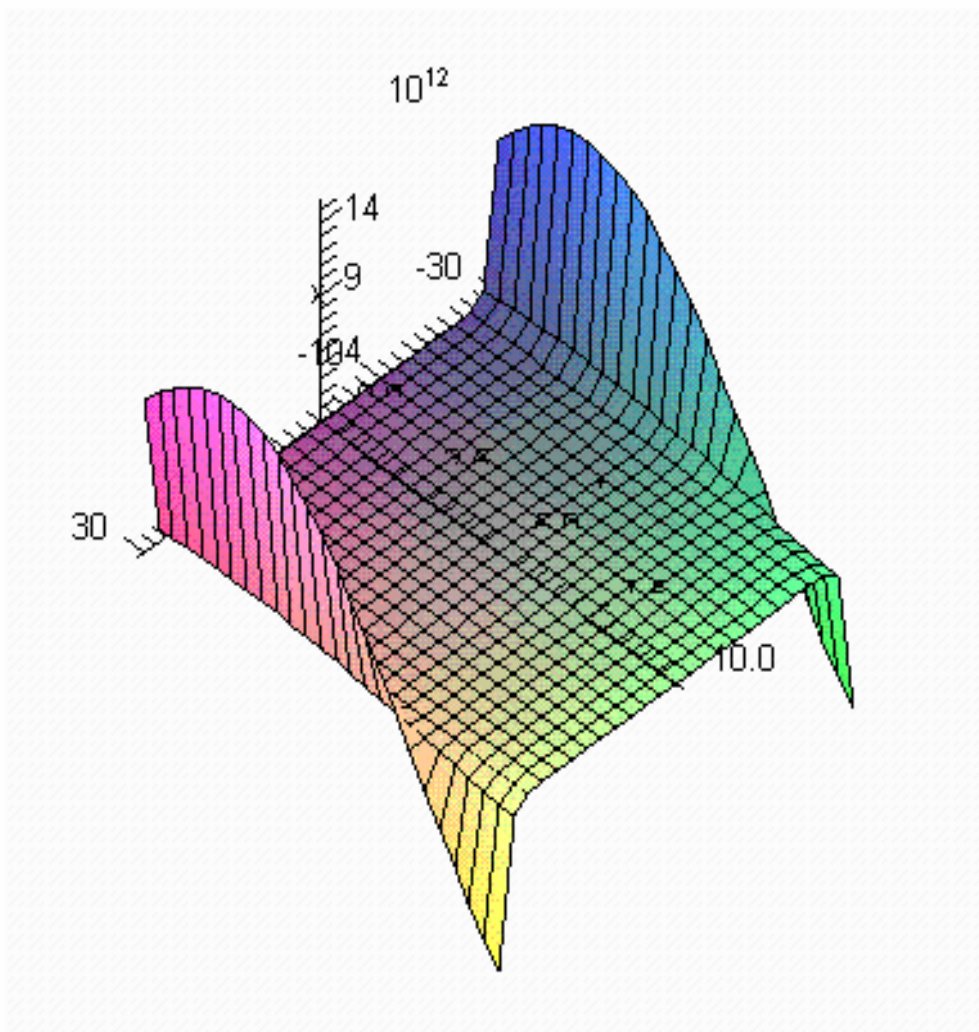
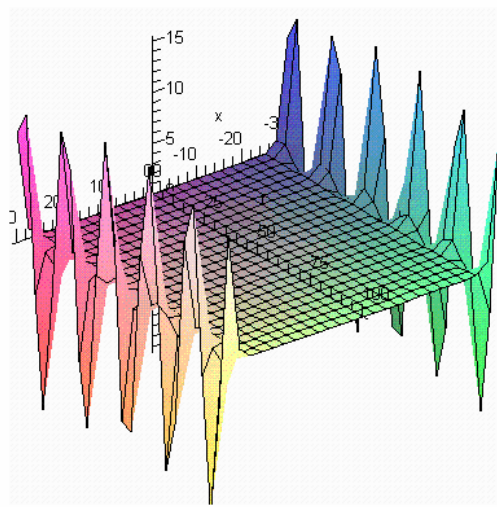


Fig. 5.40 Soluția ecuației coardei vibrante modificată prin introducerea sferei, pentru primele 10 unități de timp

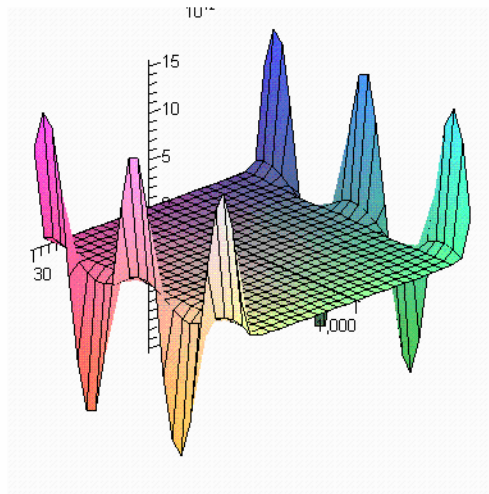
Mărand perioada de timp pentru expunerea soluției la 100 și 1000 de unități de timp, se obține o variație periodică care exprimă evoluția temporală a amplitudinii punctului de pe ecuatorul sferei aflat în planul de evoluție a vibrației.

Pentru reprezentare plotter:

$$\begin{aligned}
 &> \text{interactive} \left(\sin\left(\frac{1}{10} \sqrt{10} \cdot t\right) \cdot e^x + \frac{\sin\left(\frac{1}{10} \sqrt{10} \cdot t\right)}{e^x} \right. \\
 &\quad \left. + \cos\left(\frac{1}{10} \sqrt{10} \cdot t\right) \cdot e^x + \frac{\cos\left(\frac{1}{10} \sqrt{10} \cdot t\right)}{e^x} \right);
 \end{aligned}$$



a.



b.

Fig. 5.41 Soluția ecuației coardei vibrante pentru primele 100 unități de timp (a.) și pentru primele 1000 unități de timp (b.).

Răspunsul corespunde stării reale, motiv pentru care se poate considera că modelul matematic construit pe baza ecuației coardei vibrante corespunde și situației în care la mijlocul coardei se găsește un corp sferic.

Simularea 2 – condiții de simulare:

- se păstrează aceleași condiții principale ca și în cazul primei simulări;
- se modifică valorile coeficienților de integrare pentru a urmări efectele modificării matematice asupra fenomenului tehnic; se propun următoarele valori: $C3=+1$, $C4= - 1$, $C2=+1$, $C1=+1$

$$\begin{aligned} > \text{interactive} \left(\sin\left(\frac{1}{10} \sqrt{10} \cdot t\right) e^x + \frac{\sin\left(\frac{1}{10} \sqrt{10} \cdot t\right)}{e^x} \right. \\ \left. - \cos\left(\frac{1}{10} \sqrt{10} \cdot t\right) \cdot e^x - \frac{\cos\left(\frac{1}{10} \sqrt{10} \cdot t\right)}{e^x} \right); \end{aligned}$$

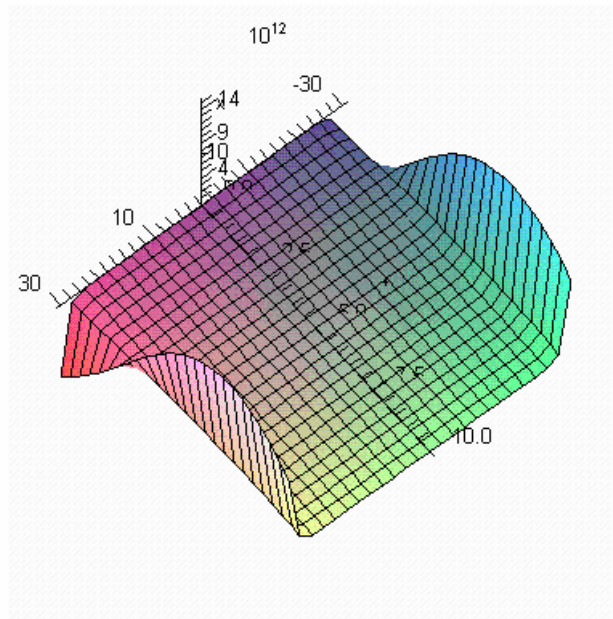
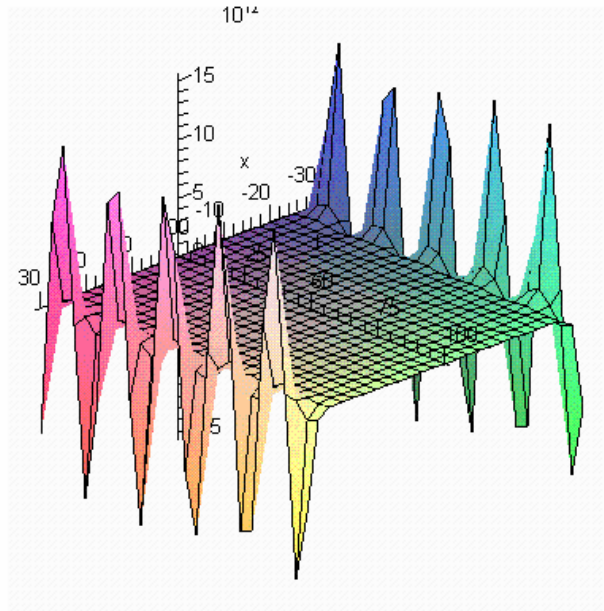
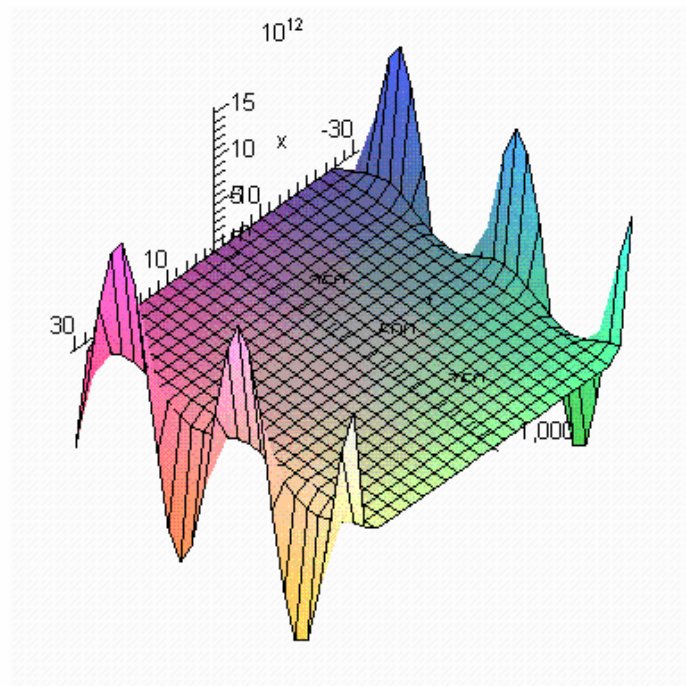


Fig. 5.42 Soluția ecuației coardei vibrante modificată prin introducerea sferei, pentru primele 10 unități de timp

$$\begin{aligned} > \text{interactive} \left(\sin\left(\frac{1}{10} \sqrt{10} \cdot t\right) e^x + \frac{\sin\left(\frac{1}{10} \sqrt{10} \cdot t\right)}{e^x} \right. \\ \left. - \cos\left(\frac{1}{10} \sqrt{10} \cdot t\right) \cdot e^x - \frac{\cos\left(\frac{1}{10} \sqrt{10} \cdot t\right)}{e^x} \right); \end{aligned}$$



a.



b.

Fig. 5.43 Soluția ecuației coardei vibrante pentru primele 100 unități de timp (a.) și pentru primele 1000 unități de timp (b).

Modificarea coeficienților nu influențează sensibil răspunsul modelului. Așadar, cu o relativ bună precizie se pot utiliza ambele situații în ceea ce privește integrarea.

5.4.3 Realizarea senzorului de vibrații

Pentru ca funcționarea senzorului să fie întocmai celor precizate la punctul anterior, trebuie îndeplinite cel puțin una dintre următoarele două condiții:

- lichidul magnetic se găsește în interiorul unui câmp magnetic astfel încât să devină conductor electric în urma orientării particulelor magnetizabile după direcția liniilor de câmp;
- lichidul magnetic prezintă o concentrație ridicată de nanoparticule magnetizabile, astfel încât acestea se găsesc continuu în contacte relative, conducând astfel curentul care ia naștere în circuit.

Adoptarea primei variante presupune montarea, în anumite puncte critice ale sferei, un număr de magneți permanenți capabili să asigure câmpul magnetic necesar orientării nanoparticulelor magnetizabile. Această acțiune prezintă două mari dezavantaje:

- masa sferei crește, crescând implicit și amplitudinea minimă critică a vibrației care produce o mișcare suficient de amplă a lichidului încât acesta să atingă contactele electrice închizând circuitul electric; drept rezultat: sensibilitatea senzorului scade, el nemai fiind capabil să sesizeze vibrații cu amplitudini foarte mici.
- trebuie derulate studii ample care să evidențieze pozițiile critice și numărul minim critic de magneți permanenți pentru o funcționare corespunzătoare a senzorului; poziționarea magneților permanenți trebuie făcută astfel încât valul de lichid magnetic să se găsească în interiorul câmpului magnetic creat de magneți, dar în același timp poziționarea trebuie să evite blocarea lichidului magnetic în dreptul magneților permanenți.

Datorită acestor dezavantaje, se propune utilizarea celei de-a doua variante și anume creșterea concentrației în nanoparticule magnetizabile a lichidului magnetic. S-a procedat astfel la creșterea concentrației lichidului magnetic LM-SF32, până când acesta a devenit ușor conductor electric.

Pentru menținerea unei vâscozități acceptabile matricea lichidă, formată inițial din ulei sintetic, a fost înlocuită cu benzen. Astfel, a fost îmbunătățită conductibilitatea electrică a lichidului păstrându-se o vâscozitate suficient de redusă încât să se formeze valuri chiar și pentru vibrații cu amplitudine mică.

Drept elemente constructive au fost folosite următoarele:

- fire flexibile din oțel având diametrul de 0,5 mm; lungimea fiecărui fir a fost aleasă la valoarea de 30 mm, valoare obținută în urma studiului prezentat în capitolul 5.4.2.
- sfera este compusă dintr-un polimer termorigid ușor;
- învelitoarea sferei a avut o grosime de 0,3 mm;
- diametrul sferei a fost ales, tot în urma derulării studiului prezentat în capitolul 5.4.2, la valoarea de 30 mm;
- cele 8 perechi de contacte electrice utilizate au fost din cupru electrotehnic;

- lichidul magnetic utilizat a fost LM-SF32 modificat conform celor prezentate anterior.

Senzorul este prezentat în figura 5.44 a. Pentru verificări, senzorul a fost montat pe tractorul de sudare utilizat în experimentări (figura 5.44 b) și verificat prin pornirea și oprirea tractorului.

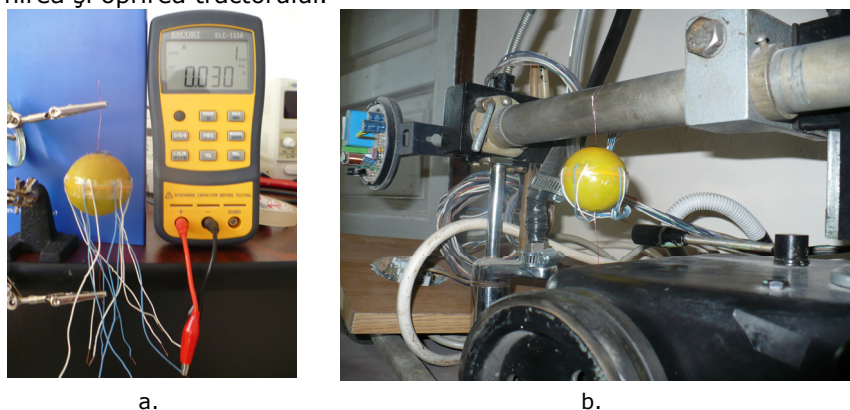


Fig. 5.44 Senzorul nanostructurat pentru sesizarea vibrațiilor
a. verificarea senzorului pe stand; b. integrarea senzorului în tractorul de sudare

5.4.4 Achiziția și interpretarea semnalului senzorului pentru vibrații

Toate cele opt perechi de contacte sunt conectate la un singur circuit electric conținând o sursă de tensiune continuă de 1,5 V. Din circuitul respectiv a fost scoasă o priză de curent care a fost conectată la un ampermetru și apoi, prin intermediul unui releu a fost comandată alimentarea sursei de sudare WIG. Aceasta este prima sursă termică a sistemului hibrid care intră în operă, laserul urmându-i cu o întârziere de aproximativ 0,5 s. Circuitul de comandă respectiv este prezentat în figura 5.45.

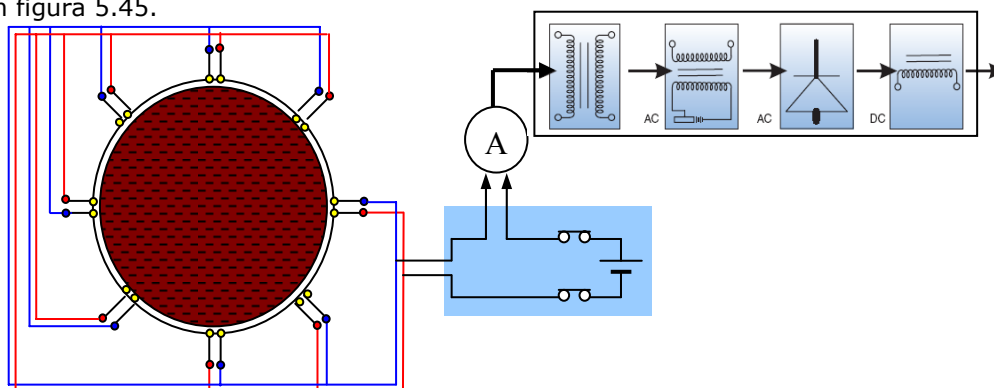


Fig. 5.45 Semnalul utilizat pentru comandarea sursei WIG

Prin această conectare senzorul nu este utilizat numai pentru monitorizarea stării de mișcare, dar și pentru comanda inițierii arcului de sudare WIG din cadrul sistemului hibrid laser-arc.

6. Concluzii

Creșterea productivității proceselor de sudare reprezintă una dintre direcțiile prioritare ale cercetării în domeniul sudării, în acest sens fiind urmărite de introducerea de noi procedee de sudare caracterizate prin rate de depunere și viteze de sudare ridicate, dezvoltarea de noi variante ale procedeelor de sudare existente, mecanizarea / automatizarea / robotizarea proceselor de sudare și dezvoltarea de noi materiale de sudare caracterizate prin rate de topire ridicate și randamente supraunitare. Sudarea hibridă laser-arc, constând în realizarea unui tandem funcțional, compus dintr-un fascicul laser și un arc electric de sudare, reprezintă o dezvoltare recentă, caracterizată prin viteze de sudare ridicate și pătrunderi în materialul de bază superioare procedeelor de sudare cu laser.

6.1 Cercetarea documentară

Cercetarea literaturii de specialitate a evidențiat faptul că, acțiune intens urmărită de cercetători, automatizarea proceselor de sudare în general și a proceselor de sudare hibridă în special este bazată pe dezvoltarea unor sisteme specifice de sesizare care să ofere informații de tip intrare componentelor hardware de comandă și execuție, în vederea obținerii unui control strict și eficient al procesului. Calitatea și sensibilitatea sistemelor senzoriale sunt determinante pentru derularea procesului de sudare și pentru calitatea viitoarelor suduri.

În urma cercetărilor documentare efectuate s-a concluzionat faptul că sudarea hibridă laser-WIG este într-o fază incipientă a cercetării, majoritatea lucrărilor științifice fiind orientate cu precădere către sudarea hibridă laser-MIG sau laser-MAG. Această concluzie a condus la decizia de abordare în vederea studierii a procesului de sudare hibridă laser-WIG, cercetarea fiind orientată cu predilecție către parametrii care influențează procesul de sudare hibrid.

În cazul sudării hibride parametrii cu influență puternică sunt:

- parametrii de proces: puterea fasciculului laser, focalizarea fasciculului laser, parametrii de puls și frecvența pulsurilor la sudarea cu fascicul pulsant, curentul prin arc, tensiunea arcului, viteza de sudare, natura și debitul gazului de protecție;
- parametrii de sistem: parametrii geometrici de poziționare relativă a celor două capete de sudare care compun sistemul hibrid, ordinea celor două capete în direcția de sudare, poziția de sudare, caracteristicile stării de mișcare a sistemului hibrid.

Dintre acești parametri s-au ales pentru monitorizare, în sensul conceperii, proiectării și realizării de senzori, următorii parametri: unghiul dintre axele celor două capete de sudare, poziția capului de sudare cu fascicul laser relativ la verticală (ambele caracterizând poziția relativă a celor două capete din componența sistemului hibrid), viteza de sudare și modificările momentane ale stării de mișcare a sistemului hibrid.

Pentru acești parametri s-a urmărit dezvoltarea unor sisteme de sesizare de ultimă generație. Una dintre categoriile relativ noi de astfel de sisteme de sesizare este constituită din clasa nanosenzorilor. Nanosenzorii, sub cele două forme de prezentare, senzori cu dimensiuni nanometrice și senzori micro- și macrometrici confecționați din materiale nanostructurate (purtând și numele de senzori nanostructurați), sunt recomandați a fi utilizați în diverse sisteme automate de următoarele caracteristici:

- timp de reacție sensibil redus comparativ cu senzorii clasici;
- precizie sensibil îmbunătățită de modificarea la nivel nanometric a proprietăților materialului din care este confecționat elementul activ de sesizare;
- costuri de fabricație relativ reduse;
- fenomene de sesizare caracterizate prin simplitate principală.

Cercetările actuale în domeniul nanoștiințelor și nanotehnologiilor au relevat faptul că elementele sesizoare nanometrice sau nanostructurate au o dublă comportare în procesele de sesizare:

- își modifică caracteristicile electrice sau optice la apariția unei modificări de stare sau de valoare a unei mărimi;
- prin acțiunea lor asupra elementului de sesizat modifică parametrii electrice și magnetici ai ansamblului sesizor.

S-a decis așadar conceperea principală și structurală, proiectarea și realizarea unor senzori nanostructurați (având elementul activ de sesizare confecționat dintr-unul sau mai multe materiale nanostructurate). Conform rezultatelor cercetărilor derulate, dintre materiale nanostructurate utilizabile la confecționarea unor astfel de senzori, se amintesc: fluidele inteligente având comportare magnetică, magneto-reologică și electro-reologică, straturile subțiri și compozitele nanostructurate realizate prin diverse procedee tehnologice, cum ar fi de exemplu sinterizarea.

Aceste materiale nanostructurate utilizate în construcția elementelor active din sistemele de sesizare au fost studiate în cadrul cercetărilor pentru identificarea aplicațiilor din domeniul sudării în care se pot implementa.

Concluzia care s-a extras din cercetările documentare este că majoritatea materialelor nanostructurate pot fi folosite în elaborarea de senzori de câmp magnetic, temperatură, gaze, debit, radiație luminoasă, proximitate, etc.

Analizând caracteristicile, proprietățile și aplicabilitatea acestor materiale atenția a fost atrasă de lichidele inteligente cu comportare magnetică. Materiale cu proprietăți fizice comandabile, lichidele inteligente cu comportare magnetică sunt o clasă de materiale ale căror proprietăți reologice, electrice și termice se modifică în câmp magnetic exterior. Modificările au loc aproape instantaneu și sunt dependente de intensitatea câmpului magnetic aplicat și fracția volumică a fazei magnetizabile.

Având astfel de comportări, lichidele inteligente cu comportare magnetică au constituit materialul nanostructurat care a stat la baza conceperii elementelor active de sesizare pentru senzorii propuși a fi concepuți.

6.2 Dezvoltările teoretice

Conceperea principiilor de funcționare, a structurilor elementelor active de sesizare, precum și a soluțiilor constructive pentru senzorii nanostructurați propuși a fi realizați a impus și efectuarea unor dezvoltări teoretice, în special sub forma unor

modele matematice ale fenomenelor fizice specifice funcționării acestor senzori. Aceste dezvoltări teoretice au fost de ajutor în următoarele puncte ale cercetării:

- optimizarea instalației și a parametrilor de elaborare a nanoparticulelor în jet de plasmă, dezvoltările teoretice vizând câmpul de viteze, câmpul de temperaturi și fenomenul de vaporizare a metalului în jetul plasmei de argon. Din aceste puncte de vedere s-au obținut, matematic, următoarele:
 - viteza jetului de plasmă are o variație pătratică relativ la curentul utilizat pentru realizarea plasmei de argon, sensul fiind același (creșterea curentului producând creșterea jetului de plasmă);
 - viteza jetului de plasmă scade o dată cu creșterea distanței de la centrul jetului la punctul de analiză, creșterea fiind pătratică;
 - temperatura plasmei scade pătratic cu distanța dintre centrul jetului de plasmă și punctul de analiză;
 - diametrul maxim al picăturilor formate în momentul topirii metalului în jet de plasmă este direct proporțional cu tensiunea superficială a metalului topit și invers proporțională cu pătratul vitezei jetului de plasmă;
 - numărul de particule emise prin topire este direct proporțional cu diametrul coloanei de plasmă, cu densitatea metalului supus topirii și invers proporțional cu densitatea metalului picăturii și cu pătratul diametrului acesteia;
- optimizarea formei nano- și microparticulelor elaborate, modelul fiind utilizat la optimizarea parametrilor de elaborare în sensul obținerii unor particule sferice. S-a obținut astfel faptul că diametrul echivalent al particulei sferice este strict dependent de rădăcina cubică a raportului dintre temperatura vaporilor și cea a metalului lichid;
- optimizarea structurii lichidului magnetic în sensul obținerii unei variații liniare a inductanței bobinei care folosește drept miez magnetic un astfel de lichid; astfel s-a obținut faptul că măririi densității fluidului, prin creșterea volumului de particule magnetizabile, se accentuează caracterul liniar al variației;
- evidențierea relațiilor directe dintre unghiul de înclinare a capului de sudare cu arc și inductanța bobinei sensorului, în vederea optimizării structurii lichidului magnetic utilizat pe post de miez magnetic; relația devine liniară la utilizarea unui lichid magnetic mai concentrat în particule magnetizabile;
- analiza comportării lichidului magnetic în interiorul unui tub toroidal în vederea determinării vitezei de reacție a sensorului, prin viteza de intrare a lichidului magnetic în interiorul bobinei;
- determinarea cantității optime de lichid magnetic care trebuie introdusă în canalul toroidal pentru o funcționare rapidă și sensibilă a senzorilor;
- analiza comportării sensorului de vibrații în condiții definite specifice exploatarei, de interes fiind evoluția amplitudinii vibrației sferei, element important în structurarea constructiv-dimensională a sensorului. Rezultatul a evidențiat faptul că funcționarea sensorului este analizabilă utilizând ecuația coardei vibrante.

Majoritatea dezvoltărilor teoretice sunt abordări proprii, existând însă și continuări sau adaptări ale unor studii efectuate de alți cercetători în domenii

similare celor supuse cercetării în cadrul prezentei lucrări, în aceste cazuri autorul aducându-și aportul propriu prin completarea sau modificarea unor modele existente.

6.3 Cercetarea experimentală

Programul experimental derulat a cuprins cercetări orientate către două direcții:

- cercetări pentru evidențierea caracteristicilor și relațiilor specifice sistemelor implicate: sistemul hibrid de sudare și sistemul, compozit structural, al nanofluidelor inteligente cu comportare magnetică;
- cercetări pentru optimizarea principiului de funcționare, a soluției constructive (geometrie, dimensiuni, material, etc.) și a răspunsului senzorilor nanostructurați elaborați (concepuți, proiectați și realizați).

În cadrul cercetării sistemului hibrid de sudare au fost studiate influențele principale care se manifestă la nivelul procesului, concluzionându-se următoarele:

- prin combinarea acțiunii fasciculului laser cu acțiunea arcului electric, temperatura din coloana arcului crește rezultând o creștere a densității purtătorilor de sarcină;
- arcul electric încălzește suprafața materialului care se dorește a se suda îmbunătățind pătrunderea fasciculului laser în materialul de bază;
- creșterea vitezei de sudare conduce la o scădere aproape liniară a pătrunderii în materialul de bază;
- creșterea distanței dintre cele două capete de sudare ale sistemului hibrid conduce la scăderea pătrunderii în materialul de bază;
- creșterea unghiului dintre cele două capete de sudare ale sistemului hibrid conduce la scăderea pătrunderii în materialul de bază;
- consumul energetic pentru o pătrundere dată este mai mic în cazul sudării hibride, decât în cazul sudării cu fascicul laser.

Cercetarea experimentală a sistemelor compozite de tip fluid inteligent cu comportare magnetică a condus la obținerea unor rezultate în baza cărora au putut fi trase următoarele concluzii:

- nano- și microparticule magnetizabile utilizabile la confecționarea de lichide magnetice pot fi elaborate prin diverse metode; optimizarea parametrilor de elaborare se poate face fie teoretice, prin dezvoltarea unor modele matematice specifice, fie empiric, prin încercări succesive;
- caracterizările particulelor obținute prin elaborare în jet de plasmă, piroliză laser și măcinare în mori planetare cu bile au evidențiat că toate particulele prezintă caracteristici corespunzătoare necesităților impuse de confecționarea lichidelor magnetice;
- la elaborarea în jet de plasmă a nano- și microparticulelor, forma sferică a acestora se obține mărind debitul gazului plasmagen;
- modificând mediul de colectare a nanoparticulelor, dintr-unul oxidant într-unul inert ($Ar + H_2$, $Ar + N_2$), oxidarea particulelor a scăzut aproape la zero;
- introdus în interiorul unei bobine lichidul magnetic se comportă ca și un miez magnetic, variind inductanța bobinei; cu cât lichidul magnetic este mai concentrat în particule magnetizabile cu atât crește variația inductanței și în plus devine din ce în ce mai liniară.

În ceea ce privește cercetarea experimentală în vederea conceperii și optimizării principiului de funcționare și a soluției constructive a senzorilor, studiile au fost orientate către proprietatea lichidelor magnetice de a se constitui în veritabile miezuri magnetice când sunt introduse în interiorul unei bobine. Astfel, experimental, s-a observat faptul că, utilizate drept miez magnetic în interiorul unei bobine, lichidele inteligente cu comportare magnetică produc în condiții specifice o variație liniară a inductanței bobinei respective. Pornind de la această caracteristică, după elaborarea mai multor tipuri de lichide inteligente cu comportare magnetică utilizând nanoparticule produse prin trei metode distincte (piroliză laser, elaborare în jet de plasmă, măcinare în mori planetare cu bile), au fost proiectați doi senzori de tip inclinometru, destinați monitorizării poziției capului de sudare cu fascicul laser relativ la verticală și a poziției relative a celor două capete de sudare: cu fascicul laser și cu arc. Ambele elemente active de sesizare exploatează caracteristica amintită anterior a lichidelor inteligente cu comportare magnetică, particularizând forma bobinei în funcție de aplicația căreia i se adresează.

Concluziile cercetărilor experimentale privind influența parametrilor geometrici ai ansamblului hibrid de sudare laser-arc arată necesitatea sesizării poziției relative dintre cele două capete de sudare componente ale sistemului de sudare laser-arc. Pentru aceasta s-au conceput și realizat doi senzori prezentați în cele ce urmează.

Senzorul 1+2 – sesizarea poziției relative dintre cele două capete de sudare componente ale sistemului hibrid laser-arc:

- au fost propuse trei soluții constructive dintre care, după o analiză tehnico-economică, a fost aleasă varianta optimă în baza următoarelor criterii: liniaritate, cost de elaborare redus;
- legile de funcționare a senzorului sunt (existând două bobine neidentice există două legi de funcționare) direct liniare, fapt care simplifică interpretarea semnalului util.
- lichidul inteligent cu comportare magnetică curge prin interiorul bobinelor variindu-și energia; pentru optimizarea formei și dimensiunilor canalului prin care curge elementul activ nanostructurat a fost construit un model al variației energiei acestuia în timpul funcționării senzorului;
- senzorul a fost integrat în corpul pistolului WIG;
- au fost confecționați doi senzori, unul pentru planul care conține cele două capete de sudare, iar celălalt pentru planul perpendicular pe acesta din urmă.

Senzorul 3 – sesizarea poziției capului de sudare cu fascicul laser relativ la poziția verticală, considerată optimă:

- Principiul de funcționare exploatează aceeași caracteristică a lichidelor magnetice;
- Caracteristica statică de funcționare a senzorului este descrisă de relații direct liniare, nefiind necesară o liniarizare ulterioară a senzorului;

Experimentările de sudare hibridă laser-arc efectuate în cadrul cercetărilor au relevat de asemenea influența vitezei de sudare asupra pătrunderii în material. Concluzia aceasta a condus la decizia conceperii și realizării unui senzor de viteză pentru tractorul de sudare al ansamblului de sudare hibridă laser-WIG.

Senzorul 4 – monitorizarea vitezei tractorului de sudare:

- funcționarea se bazează tot pe variația inductanței unei bobine la introducerea lichidului magnetic în interior pe post de miez magnetic;
- de această dată, însă, este exploatată doar modificarea în sine, calitativă și nu cantitativă.

De asemenea, un aspect important în calitatea îmbinărilor sudate a fost evidențiat de vibrațiile induse în timpul procesului de sudare. Această concluzie a determinat conceperea și realizarea unui senzor pentru determinarea modificărilor de mișcare a tractorului de sudare a ansamblului hibrid de sudare.

Senzorul 5 – sesizarea modificărilor stării de mișcare a tractorului de sudare care poartă capul hibrid:

- lichidul inteligent cu comportare magnetică devine electroconductor în condiții specifice:
 - când este introdus într-un câmp magnetic constant ca orientare;
 - când concentrația în nanoparticule depășește o valoare minimă critică.
- exploatând această caracteristică funcționarea senzorului se bazează pe închiderea unor circuite electrice de către lichidul magnetic electroconductor, când acesta vibrează cu o amplitudine critică minimă;
- evoluția senzorului urmează legea coardei vibrante, în condiții specifice, modelul fiind apoi simulat în condițiile geometrice specifice formei senzorului. Simularea a avut drept rol determinarea amplitudinii vibrației sferei, amplitudine care aduce informații asupra nivelului de ridicare a lichidului cu comportare electro-reologică din interiorul sferei. Aceste informații sunt necesare în poziționarea contactelor electrice, astfel încât să existe închideri ale acestor contacte chiar și pentru amplitudini mici ale vibrațiilor care iau naștere în timpul funcționării sistemului;
- drept elemente constructive au fost folosite următoarele:
 - fire flexibile din oțel având diametrul de 0,5 mm; lungimea fiecărui fir a fost aleasă la valoarea de 30 mm;
 - sfera este compusă dintr-un polimer termorigid ușor;
 - învelitoarea sferei a avut o grosime de 0,3 mm;
 - diametrul sferei a fost ales la valoarea de 30 mm;
 - cele 8 perechi de contacte electrice utilizate au fost din cupru electrotehnic;
 - lichidul magnetic utilizat a fost LM-SF32 modificat în sensul măririi volumului total de particule introduse în matricea lichidă.

Conceperea și realizarea celor 5 senzori, aflați în stare de funcționare, înseamnă rezolvarea temei de cercetare propuse.

În urma verificărilor experimentale a senzorilor concepuți, realizați și implementați în sistemele de sudare hibridă laser-WIG s-a concluzionat faptul că principiul de sesizare bazat pe măsurarea inductivității unei bobine parcursă de un fluid inteligent poate fi aplicat cu succes în diferite sisteme senzoriale.

A fost conceput, proiectat, realizat și optimizat un cap pentru sudare hibridă, cu ajutorul căruia au fost cercetate experimental principalele influențe care se manifestă în cadrul procesului de sudare hibridă laser-arc. Au fost modelate matematic o serie de fenomene fizice specifice, modelele ajutând ulterior la

optimizarea soluției constructive adoptate și a geometriei și dimensiunilor senzorilor elaborați (concepție-proiectare-verificare funcțională-optimizare-construcție finală).

Fiecare dintre cei 5 senzori au fost verificați atât off-line (fără derularea procesului de sudare) cât și on-line (în timpul derulării procesului de sudare), comportarea lor fiind apreciată drept corespunzătoare. O concluzie importantă care s-a extras din cercetările experimentale constă în necesitatea identificării de materiale pentru construcția efectivă a senzorilor care să mențină condițiile de magnetism în timpul funcționării ansamblului hibrid de sudare laser-WIG la fel ca în situația în care prin circuitul electric al pistolului WIG nu trece un curent.

A fost derulat un număr relativ mare de experimentări de elaborare a nanoparticulelor destinate confecționării lichidelor magnetice optime pentru realizarea senzorilor, experimentări care s-au extins pe o perioadă de aproximativ 3 ani. Pentru aceasta au fost efectuate următoarele experimentări:

- sudarea hibridă laser-arc cu realizarea de experimentări la sudarea hibridă laser-WIG
 - determinarea influenței vitezei de sudare asupra pătrunderii în material: 9 seturi de experimente pentru cele 3 cazuri (laser simplu, laser-WIG și WIG-laser) obținându-se astfel câte 27 de probe selectate pentru analiză
 - determinarea influenței distanței dintre electrod și fasciculul laser asupra pătrunderii în material: 9 seturi de experimente pentru cele 3 distanțe relevante obținându-se astfel câte 27 de probe selectate pentru analiză; experimentările au fost realizate de asemenea ținându-se cont și de procedeul conducător
 - determinarea influenței unghiului dintre capul de sudare laser și pistolul WIG asupra pătrunderii în material: 6 seturi de experimente obținându-se astfel 18 probe selectate pentru analiză; experimentările au fost realizate de asemenea ținându-se cont și de procedeul conducător
 - determinarea eficienței energetice pentru pătrunderea maximă: au fost realizate 3 seturi de experimente din care au rezultat 4 probe.
- nanosenzori și senzori nanostructurați cu studiul documentar al capacităților de sesizare
- obținerea de particule magnetice utilizabile la realizarea de fluide inteligente:
 - elaborare nanoparticule prin piroliză laser: au fost realizate 3 seturi de experimente în urma cărora au fost obținute nanoparticule de Fe_2O_3
 - elaborare nanoparticule în jetul de plasmă: au fost realizate 2 seturi de experimentări în urma cărora au fost obținute nanoparticule magnetice de Fe_3O_4
 - elaborare nanoparticule prin măcinare în moară cu bile: au fost realizate 3 seturi de experimentări în urma cărora au fost obținute nanoparticule de ferită de Bariu de tip W
- obținerea de fluide inteligente pe bază de nanoparticule magnetice produse în cele trei procedee prezentate anterior; au fost realizate 6 tipuri de fluide magnetice din care au fost selectate 3 pentru experimentări ca element de sesizare
- experimentări cu fluide inteligente cu comportare magnetică pentru determinarea variației inductanței la trecerea unui fluid prin bobină: au

fost realizate 3 seturi experimente însemnând un număr de 18 încercări și o analiză comparativă între cele 3 fluide utilizate.

În urma derulării cercetărilor au fost obținute rezultate științifice care au fost, parțial, făcute publice în cadrul unor conferințe internaționale din domeniul sudării, precum și în cadrul unor articole publicate în reviste cotate ISI sau CNCSIS (B+). Unul dintre rezultatele fizice ale cercetărilor, pistolul pentru sudare WIG cu senzori de poziție nanostructurați încorporați, a reprezentat subiectul unei cereri de brevet depuse la finele cercetărilor.

7. Contribuții proprii

Lucrarea reprezintă o structurare ponderată a rezultatelor cercetărilor documentare, cercetărilor experimentale și dezvoltărilor teoretice în domeniile sudării hibride laser-arc, nanosenzorilor pentru mărimi specifice proceselor și sistemelor de sudare și lichidelor inteligente. Cercetarea documentară a vizat peste 140 de titluri din ultimii 5 ani. Cercetările experimentale au constat în elaborări de materiale nanostructurate, de caracterizări ale acestora și de determinări ale proprietăților și caracteristicilor elementelor dezvoltate (materiale nanostructurate, senzori nanostructurați, etc.). Dezvoltările teoretice au constat în modelări matematice ale diverselor fenomene fizice implicate în activitatea de sesizare, precum și de modelări matematice ale influențelor determinate în cadrul cercetărilor experimentale. După elaborare, unele modele matematice au fost simulate în programe de analiză matematică cum este de exemplu MAPLE11.

Contribuția personală a autorului constă în următoarele:

A. Dezvoltări teoretice

- Modelarea matematică a câmpului de viteze și de temperaturi în jetul plasmă de argon; Scopul modelării a fost evidențierea distribuției valorilor celor doi parametri care influențează transportul particulelor prin jetul de plasmă, în vederea optimizării acestuia;
- Modelarea matematică a fenomenului de vaporizare a metalului solid. Scopul modelării a fost obținerea unor relații matematice care să ofere informații cu privire la diametrul și numărul particulelor emise și transportate în jetul de plasmă, în funcție de parametrii tehnologici specifici acestui proces;
- Modelarea matematică a procesului de generare de nano- și microparticule sferice. Scopul acestei modelări a fost optimizarea parametrilor procesului de elaborare în sensul obținerii unor particule sferice;
- Modelarea matematică a variației inductanței cu unghiul de înclinare a capului de sudare cu arc pentru fiecare dintre soluțiile constructive propuse și pentru fiecare dintre cei doi senzori de poziție elaborați. Scopul acestor modele a fost evidențierea caracterului liniar sau neliniar al reacției senzorilor;
- Modelarea și simularea comportării lichidului magnetic în interiorul torului (5 simulări ale soluției pentru diverse situații extrase din condițiile de exploatare). Scopul acestor modelări a fost elaborarea unei relații cu ajutorul căreia să se poată determina viteza de curgere a lichidului magnetic prin canalul toroidal. Această informație a fost utilizată la determinarea vitezei de reacție a senzorului prin viteza de intrare a lichidului magnetic în interiorul bobinei;

- Modelarea matematică a variației inductanței cu unghiul de înclinare a capului de sudare cu laser. Scopul acestui model a fost evidențierea caracterului liniar sau neliniar al reacției sensorului;
- Modelarea matematică a influenței volumului de lichid introdus în tor asupra duratei de menținere la valoarea crescută a inductanței bobinei sensorului. Scopul acestei acțiuni a fost determinarea cantității optime de lichid magnetic care trebuie introdusă în canalul toroidal;
- Modelarea și simularea comportării sensorului de vibrații în condiții definite specifice exploatarei. Scopul acestei simulări a fost determinarea amplitudinii vibrației sferei pentru a se putea aprecia nivelul la care urcă lichidul magnetic în interiorul sferei.

B. Cercetări experimentale

- Cercetări experimentale asupra comportării lichidelor magnetice în condiții specifice de exploatare. Scopul cercetărilor a fost evidențierea calitativă și cantitativă a proprietăților și caracteristicilor utilizabile în sesizare ale acestor materiale nanostructurate;
- Conceperea și realizarea unui ansamblu de sudare hibrid pentru cuplarea dispozitivului laser cu pistolul de sudare WIG;
- Cercetări experimentale asupra caracteristicilor procesului de sudare hibridă laser-arc, cu variantele laser-WIG și WIG-laser. Scopul cercetărilor a fost evidențierea calitativă și cantitativă a principalelor influențe care se manifestă în cadrul procesului de sudare prin procedeul de sudare hibridă, influențe care au ajutat la stabilirea mărimilor de proces și de sistem care trebuie monitorizate și eventual controlate on-line în vederea asigurării unei stabilități corespunzătoare a procesului de sudare și a unei calități minim impuse a îmbinărilor sudate realizate;
- Cercetări experimentale comparative între caracteristicile tehnico-economice ale sudării hibride laser-WIG, ale sudării WIG și ale sudării laser. Scopul cercetărilor a fost evidențierea calitativă și cantitativă a eficienței procesului de sudare hibridă în comparație cu procedeele componente implicate considerate separat;
- Cercetări experimentale asupra elementelor principale de fizica procesului de sudare hibridă laser-arc. Scopul cercetărilor a fost evidențierea calitativă și cantitativă a principalelor fenomene fizice care se manifestă în cadrul procesului de sudare prin procedeul de sudare hibridă, fenomene care introduc influențe în cadrul procesului de sudare hibridă și care trebuie monitorizate pentru o stabilizare minim necesară a procesului;
- Cercetări experimentale privind influențele introduse de parametri tehnologici ai procesului de sudare hibridă laser-arc asupra caracteristicilor geometrico-dimensionale și calității îmbinărilor sudate, împreună cu evidențierea parametrilor tehnologici și de sistem cei mai influenți, în vederea stabilirii mărimilor pentru care se vor elabora senzorii nanostructurați. Scopul cercetărilor a fost evidențierea calitativă și cantitativă a principalelor influențe introduse de parametri de proces și de sistem în vederea alegerii mărimilor pentru care se vor concepe și realiza senzori nanostructurați;
- Cercetări experimentale asupra lichidelor inteligente de tipul lichidelor magnetice, lichidelor magnetoreologice și lichidelor electroreologice, cu evidențierea structurii nanometrice, a proprietăților și a caracteristicilor.

Scopul cercetărilor a fost evidențierea proprietăților și caracteristicilor acestor materiale nanostructurate care le fac utilizabile în procese de sesizare;

- Cercetări experimentale asupra nanoparticulelor utilizabile la elaborarea de lichide inteligente; au fost studiate metodele de elaborare a nanoparticulelor, influențele naturii, ale formelor și ale dimensiunilor nanoparticulelor asupra proprietăților viitoarelor lichide inteligente. Scopul cercetărilor a fost evidențierea influențelor pe care le introduc nanoparticulele asupra proprietăților și caracteristicilor lichidelor inteligente cu comportare magnetică;
- Elaborarea de nano- și microparticule magnetizabile prin trei metode: piroliza laser, pulverizare în jet de plasmă și măcinare umedă, uscată și cu lichid aditivat în mori planetare cu bile. Scopul acestor acțiuni a fost obținerea de nanoparticule pentru confecționarea de lichide magnetice;
- Caracterizarea morfologiilor, a formelor și a dimensiunilor, nano- și micropulberilor elaborate, utilizând tehnicile moderne specifice: spectroscopie RAMAN, spectroscopie IR, microscopie TEM, difracție electronică SAED, difracție de raze X (XRD), imagistică HRTEM, determinare dimensională cu fascicul laser și evaluări experimentale ale proprietăților magnetice. Scopul acestei acțiuni a fost cunoașterea tuturor caracteristicilor geometrico-dimensionale și structurale ale nano- și microparticulelor elaborate;
- Optimizarea instalației de elaborare în jet de plasmă a nano- și microparticulelor. Scopul acestei acțiuni a fost eficientizarea procesului de elaborare a nano- și microparticulelor în jet de plasmă prin optimizarea sistemului de avans al materialului solid către jetul de plasmă;
- Elaborarea de fluide inteligente cu comportare magnetică utilizând nanopulberi. Scopul acestei acțiuni a fost realizarea de materiale nanostructurate de tip lichid magnetic destinate experimentărilor care au avut drept scop conceperea și optimizarea elementelor de sesizare;
- Caracterizarea fluidelor inteligente elaborate. Scopul acestei acțiuni a fost determinarea principalelor caracteristici utilizabile în cadrul proceselor de sesizare ale lichidelor magnetice elaborate;
- Cercetări experimentale privind comportarea lichidelor magnetice elaborate în condiții specifice de exploatare. Scopul acestei acțiuni a fost determinarea modului de comportare a lichidelor magnetice elaborate în condițiile specifice de exploatare ulterioară;
- Elaborarea modelelor matematice ale variației inductanței unor bobine prestabilite la introducerea lichidelor magnetice elaborate în interior, pe post de miez magnetic. Scopul acestor modele a fost evidențierea caracterului liniar sau neliniar al reacției, precum și optimizarea numărului de spire și al diametrului sârmelor utilizate la realizarea bobinelor, în sensul obținerii unui senzor liniar și cu o interpretare facilă a semnalului de ieșire;
- Conceperea, proiectarea, realizarea și optimizarea a doi senzori nanostructurați destinați monitorizării unghiului dintre capul de sudare cu fascicul laser și cel de sudare cu arc electric; elaborarea a trei soluții constructive, analiza comparativă a acestora și stabilirea soluției adoptate pentru construirea senzorului. Scopul acestor acțiuni a fost elaborarea a doi senzori nanostructurați de tip inclinometru;

- Conceperea, proiectarea, realizarea și optimizarea unui pistol de sudare WIG cu senzorii de poziție încorporați. Scopul acestor acțiuni a fost realizarea unui sistem integrat pistol de sudare WIG – senzori nanostructurați de poziție, ca și componentă unitară și monobloc a sistemului hibrid de sudare;
- Conceperea, proiectarea, realizarea și optimizarea unui senzor nanostructurat destinat monitorizării unghiului de înclinare a capului de sudare cu laser, Scopul acestor acțiuni a fost elaborarea unui senzor nanostructurat de tip inclinometru;
- Conceperea, proiectarea, realizarea și optimizarea unui senzor nanostructurat cu impulsuri temporale pentru determinarea vitezei de deplasare a tractorului de sudare. Scopul acestor acțiuni a fost elaborarea unui senzor nanostructurat care să sesizeze trecerea printr-o poziție dată a unei roți a tractorului;
- Elaborarea unui program de calcul pentru interpretarea semnalului de ieșire al senzorului de viteză; a fost utilizată platforma Visual Basic 5.0, formulele din codul sursă al programului fiind elaborate de către autor. Scopul programului este de a interpreta online semnalul de ieșire al senzorului de viteză;
- Conceperea, proiectarea, realizarea și optimizarea unui senzor nanostructurat de vibrații pentru sesizarea stării de deplasare a tractorului de sudare. Scopul acestor acțiuni a fost elaborarea unui senzor nanostructurat pentru vibrații;
- Implementarea unui sistem de achiziție a semnalului furnizat de sistemul senzorial prin măsurarea precisă a inductanței solenoidului toroidal și transmiterea acestuia unui sistem de calcul în vederea procesării. Scopul acestei acțiuni a fost de a se mări sensibilitatea de măsurare a semnalelor oferite de senzori în condițiile unor variații relativ mici ale mărimilor monitorizate;
- Elaborarea unei aplicații informatice pe platforma LabVIEW pentru interpretarea semnalului analizat și furnizarea informațiilor într-o prezentare armonioasă pentru utilizator. Scopul programului este de a interpreta online semnalul de ieșire al senzorului.

Aplicațiile informatice LabVIEW elaborate de autor pot fi extinse pentru alte tipuri de semnale electrice, constituindu-se într-o platformă de dezvoltare pentru alte soluții de sisteme senzoriale prin amplificarea în tensiune a semnalelor preluate cu ajutorul amplificatoarelor operaționale.

Unele dintre rezultatele acestor contribuții personale ale autorului au fost făcute publice fie în cadrul unor lucrări științifice sau contracte de cercetare naționale:

- prezentate în cadrul unor conferințe internaționale din domeniul sudării (cum ar fi conferințele internaționale ale Institutului Internațional de Sudură organizate la Dubrovnik, Croația în iulie 2007 și Graz, Austria în iulie 2008 sau conferința internațională a Federației Europene de Metalurgia Pulberilor organizată la Toulouse în octombrie 2007): 6 lucrări
- publicate în reviste de specialitate cu cotație ISI (revista *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*): 2 lucrări
- publicate în reviste de specialitate cotate CNCSIS (revista *Sudura, BID-ISIM* cotație CNCSIS B+): 3 lucrări

- pagina web a contractului de cercetare PNCDI 2 nr. 186/01.10.2007 cod TD-330 având titlul „Senzori nanostructurați pentru sistemele de sudare hibridă laser-arc”, director de proiect – drd. ing. Sorin SAVU

Autorul a mai emis și o cerere de brevetare a pistolului WIG cu senzori de tip inclinometru integrați către OSIM, cerere aflată în curs de analiză la instituția sus amintită.

Bibliografie

1. Accelrys Inc, 2004 – Electromechanical: Application of Carbon Nanotubes as electromechanical sensors, www.accelrys.com
2. Ahn Y., Ahmadian M., and Morishita S. - Vehicle System Dynamics International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility, Volume 32 Issue 2 & 3, 1999, ISSN 0042-3114
3. Asai S., Minami K., ș.a. – YAG – TIG hybrid welding process for coil cover plate of stainless steel – IIW Doc. No. XII – 1855 – 05, The 58th Annual Assembly and International Conference, July 2005, Prague
4. Bednarek S. – Non-linearity and hysteresis of Hall effect in magnetorheological suspensions with conducting carrier – Journal of Magnetism and Magnetic Materials vol. 264, pag. 251-257, 2003.
5. Bednarek S. – The giant transverse magnetoresistance in a magnetorheological suspension with a conducting carrier – Journal of Magnetism and Magnetic Materials pag. 264-251, 2003.
6. Bednarek S. – Magnetic suspensions based on composite particles – Journal of Magnetism and Magnetic Materials, pag. 183-195, 1998
7. Bednarek S. – Flow and relaxation of magnetoresistance in a magnetorheological suspension with conducting carrier – Material Science and Engineering B 67 113 (1999).
8. Balașoiu M., Anita E. M., Bica I., Erhan R., Osipov V., Orelovich O. L., Kuklin A. I., **Savu S.**, Savu D. – SANS of interacting magnetic micro-sized Fe particles in a Stomaflex crème polymer matrix – Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, 2008, în curs de publicare
9. Balașoiu M., Crau M. L., Kuklin A. I., Plestil J., Haramus V., Islamov A., Erhan R., Anita E. M., Lozovan M., Tripadus V., Petrescu C., Savu D., **Savu S.**, Bica I. – Microstructure of magnetite doped elastomers investigated by SAXS and SANS – Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, 2008, în curs de publicare
10. Bica I. - Instalație experimentală producere particule nanoscopice, ISIM Timișoara, 1996
11. Bica I. – Teza de doctorat, Universitatea din Timișoara, 1991.
12. Bica I. – The influence of the magnetic field on the electrical magnetoresistance of magnetorheological suspensions – Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2006
13. Bica I. – Formation of Iron Microparticles in the Argon Plasma Jet – Journal of Industrial and Engineering Chemistry 13 2 299, 2007
14. Bica I. – Magnetorheological suspensions based on mineral oil, iron and graphite micro-particles – Journal of Magnetism and Magnetic Materials, pag. 283, 2004

15. Bica I. - The influence of the magnetic field on the electrical magnetoresistance of magnetorheological suspensions - Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 299 412, 2006
16. Bica I. - Smart Fluids (in Romanian), "Mirton Press", Timisoara, 2007
17. Bica I. - Electroconductive magnetorheological suspensions - Smart Materials and Structures, 15 N147, 2006
18. Bica I. - Formation of Iron Microparticles in the Argon Plasma Jet - Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2007
19. Birdeanu V., **Savu S.** - Stadiul actual și tendințe în dezvoltarea procedurii de sudare hibrid laser-arc, Conferința Internațională ASR Brașov, 2006
20. Bossis G., Lacis S., Mennier A., Volkova O. - Magnetorheological Fluids - Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 252 224, 2002
21. Brauer J. - Magnetic actuators and sensors, Ed. Wiley Interscience, 2006
22. CDP Programme of EPSRC, UK - Duncan P. - A fibre-optic-based sensor for optimization and evaluation of the laser percussion drilling process - IOP Measurement Science and Technology, 1997
23. Choi B.C., Pujada B.R., Hong Y.K., Park M.H., Han H., Gee S.H., Donohoe G.W. - Micromagnetic domain structures and magnetization switching mechanism in submicrometer thin-film elements - IEEE Transaction on Magnetics 41 10 3441 (2005).
24. Choi H. J., Kim W., Cho M. S., Kim C. A., Jhon M. S. - Characteristics of a yield stress scaling function for electrorheological fluids - International Journal of Modern Physics B, Vol. 16, Nos. 17-18, 2636-2642, 2002
25. Chow G. Edelstein M., A.S. - Nanostructured Materials, 1, 107-111, 1992
26. David S., s.a. - Yb Fibre laser/MAG hybrid processing for welding of pipelines - IIW Doc. No. IV - 880 - 05, The 58th Annual Assembly and International Conference, July 2005, Prague
27. Davis, W. O., Pisano A. P. - On the Vibrations of a MEMS Gyroscope - International Conference on Modeling and Simulation of MEMS, pp. 557-562, 1998, Santa Clara, CA, Apr 1998
28. Dehlinger A., LeBerre M., Larrey V., Givord D., Benevent E., Vincent D., Chatelon J. - Développement de circulateurs à base de couches minces d'oxyde magnétique (BaFe₁₂O₁₉) pour applications HF, Matériaux, 13-17 novembre 2006, Dijon - www.materiaux2006.net, pg. 212
29. Denney P., Fallara P., Brown L., Carney J., Woods G. - Hybrid Laser Weld Development for Shipbuilding Applications, September 25-27, 2002, Boston, MA
30. Dilthey U., Brandenburg A., Reich F. - Investigation of the Strength and Quality of Aluminium Laser-MIG-Hybrid Welded Joints, IIW-Doc. IV-882-05, The 58th Annual Assembly and International Conference, July 2005, Prague
31. Dima I., Muntean I. - Materiale și dispozitive semiconductoare, Editura didactică și pedagogică, București, 1980.
32. Fahrner W.R. - Nanotechnology and Nanoelectronics, Ed. Springer 2005
33. Farson D, Hyun M., Choi C. - Hybrid Laser + GMAW Process for Fatigue-Resistant Welding - Session 6: Laser Welding & Processing 1, 86th Annual Convention Professional Program Listing, Dallas Convention Center, Room C147, 2005
34. Fertman V.E. - Magnitniie Jidkosti, Viseisaia skola, Minsk, 1988

35. Fields of research/welding – courtesy Lehman IIW Quebec, 2006
36. F. Bossis G. – Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspension Singapore: World Scientific, 2002
37. Gleiter N. – Nanostructured Materials, 1, pag. 1-19, 1992
38. Gosh S., Sood A., Kumar N. – Carbon Nanotube Flow Sensors, www.sciencemag.org
39. Graf T., Stauer H. – LaserHybrid process at Volkswagen, IIW-Doc. XII-1730-02, www3.fronius.com/worldwide/usa/products/paper_laserhybrid_process_at_volkswagen_gb.pdf
40. Guskos N., Typek J., Maryniak M., Narkiewicz U., Arabczyk W. and Kucharewicz I. – Temperature dependence of FMR spectrum of Fe₃C magnetic agglomerates, Second Conference on Microelectronics, Microsystems and Nanotechnology, Journal of Physics: Conference Series 10, pag. 151-154, 2005
41. Halsey T., Toor W. – Structure of electrorheological fluids – Physical review Letter 65 2820, 1990
42. Hassane H., Chatelon J., Delhinger A., LeBerre M., Rouiller T., Bayard B., Rousseau J. – Elaboration et caractérisations de couches minces magnétiques: BaM et YIG, Matériaux, Dijon – www.materiaux2006.net, pag. 204, 13-17 noiembrie 2006
43. Heinonen J. – Preliminary Study of modelling Dynamic Properties of Magnetorheological Fluid Damper – VTT Working Papers 45 ESPOO, 2006
44. Hideaki M., Yoshiki O. – Sensor for damage or fracture detection of structural materials – Japan Fine Ceramics Center, www7.nationalacademies.org/gdest/GDEST_Japan_Abstracts.pdf
45. http://www.nanomarkets.net/products/prod_detail.cfm?prod=8&id=200, Nanosensors: A Market Opportunity Analysis
46. Hu B., G. den Ouden – Laser induced stabilization of the welding arc – Science and Technology of Welding and Joining, vol. 10, no. 1, 2005
47. Huang, J., Zhang J. Q., Yang, Y., Wei, Y. Q. – Analysis and design of a cylindrical magneto-rheological fluid brake – Journal of Materials Processing and Technology, 129, pag. 559-562, 2002
48. Ivanova N, Onischuk A, Vosel S., Purtov P., Vasenin N., Anufrienko V., Ikorski V. – Reversible Modification of Magnetic Properties of Fe₃C Nanoparticles by Chemisorption of CO, Applied Magnetic Resonance, 33, pag. 285- 291, 2008
49. Jahn A., Winderlich B., Zwick A., Imhoff R., Brenner B., Dresden und S. Trümper, Herne – Laser hybrid welding of fatigue loaded structural components made of the quenched and tempered HSLA steel S1100QL, IIW Doc. No. IV-886-05, The 58th Annual Assembly and International Conference, july 2005, Prague
50. Jasna U., Hoffman J., Seyffart P. – Nd:YAG-laser – gas metal arc – hybrid welding: a chance for the use of the advantages of laser technology and flexible automation in shipbuilding and steel construction – RWIA'2002 – 2002 International Conference on Robotic Welding, Intelligence and Automation; Shanghai, December 9-12, 2002
51. Jolly M., Bender J., Carlson D. – Properties and applications of commercial magnetorheological fluids, www.lord.com
52. Jones T. - Electromechanics of Particles, Cambridge University Press, 1995

53. Journal reference: Nature, vol 415, pag. 599
<http://www.newscientist.com/article/dn1893-nanothermometer-takes-molecular-temperatures.html>
54. Kallage P – Mechanical Properties of Laser MAG Hybrid Welded High Strength Steels – The 61th Annual Assembly and International Conference, July 2008, Graz
55. Kannengeisser T., Lorenz S., Herold H., Posch G. – Aspects of positional laser-GMA-hybrid welding using high alloyed tubular cored wire electrodes – The 61th Annual Assembly and International Conference, July 2008, Graz
56. Katayama Y. Naito S., M. Mizutani – Porosity Preventive Conditions and Mechanisms in Hybrid Welding with YAG laser and TIG/MIG Arc – IIW Doc. No. XII-1852-05, The 58th Annual Assembly and International Conference, July 2005, Prague
57. Kawai Y., Iwami H., Baba N., Ogawa Y. – Penetration and metal transfer in YAG – MAG, hybrid welding of thick mild steel – IIW Doc. No. XII-1849-05, The 58th Annual Assembly and International Conference, July 2005, Prague
58. Kordonsky W. – Elements and Devices Based on Magnetorheological Effect – Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 4, No. 1, 65-69, 1993
59. Kim J., Bae H., Seung H. – A Laser Vision Sensor System for Tracking the I-Butt Weld Joints – ICGST International Conference on Automatic Control and System Engineering, 2005
60. Kinney P., Farson D. - Optimization Of An Laser+GMAW Hybrid Welding Process – International Exposition and Annual Convention Welding Show, Chicago, 2004
61. Koch C.C, Cho Y.S. – Nanostructured Materials, 1, pag. 207-212, 2002
62. Kordonsky W. - Magnetorheological effect as a base of new devices and technologies – Journal of Magnetism and Magnetic Materials 122 1-3 395, 1993
63. Kristensen J. – Recent trends in laser based welding of structural steels as well as properties of hybrid YAG-Laser/MAG welds – Industrial Laser Solutions, http://www.industrial-lasers.com/display_article/278188/39/ARCHI/none/Feat/Welding-of-structural-steels
64. Lahti K. – State of Industrial Laser Hybrid Applications and Research in Sweden, IIW Doc. No. IV-891-05, The 58th Annual Assembly and International Conference, July 2005, Prague
65. Laitinen R., Kujala P., Remes H., Nielsen S. – CO2-Laser MAG Weldability of laser cutting. Laser RAEX steels, hull structural steel. Grade and high strength formable steel. Optim RAEX 700 MC
66. Law M., Kind H., Kim F., Messer B., Yang P. – Understanding the Nitrogen Dioxide Sensing Mechanism of Tin Dioxide Nanoribbons – <http://accelrys.com/references/case-studies/tin-dioxide-nanoribbons.html>
67. LED; Laser semiconductors - http://www.mtmi.vu.lt/pfk/funkc_dariniai/diod/led.htm
68. Lee B., Kim K., Park H., Shin S. – An integrated pressure sensor with high performance – MSM 98_Technical Proceedings of the 1998 International Conference on Modeling and Simulation of Microsystems, pag. 575 – 579, 1998
69. Lee D. Y., Merely N. M. – SPIE Smart Structures and Materials Conference, vol. 3989, Newport Beach, CA, pag. 244-252, 2000

70. Lim S.T., Hyun Y.H., Choi H.J., Jhon M.S. – Rheological Properties of Biodegradable Aliphatic Polyester/Montmorillonite Nanocomposites, *Polymer Preprints* 42(1), 640-1, 2001
71. Liu L., Jifeng W., Gang S. – Hybrid laser-TIG welding, laser beam welding and gas tungsten arc welding of AZ31B magnesium alloy – [Materials Science and Engineering A](#), vol. 381, 1-2, pag. 129-133, 2004
72. Louis Th. – Nanotechnology basic calculations for engineers and scientists, Ed. Wiley Interscience, 2006
73. Mahr T., Rehberg I. – Nonlinear dynamics of a single ferrofluid-peak in an oscillating magnetic field – *Physica D* 111, pag. 335-346, 1998
74. Mangra M. – Orientation and Tendencies in Manufacturing Industry of the Permanent Ceramic Magnets Using PM Technologies, *Material Science Forum*, Vol 426-432 pag. 4379-4384, 2003
75. Margida A., Weiss K., Carlson J. – Magnetorheological materials based on iron alloy particles – *Int. J. Mod. Phys B* 10 3335, pag. 23-24, 1996
76. Masahiro U. – *Nanostructured Materials*, 1, pag. 101-106, 1992
77. Masanory O. – Infrared and Ultrasonic Sensors Using Ferroelectric Thin Films – *Transducers, Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems*, 12th International Conference, pag. 226 - 229 vol.1, 2003
78. Melle S, Rubio M., Fuller G. – Time Scaling Regimes in Aggregation of Magnetic Dipolar Particles: Scattering Dichroism Result – *Physical Review Letter* 87, 115501, 2001
79. Melle S., Doctoral Thesis, pp. 17-30, Universidad de Madrid, Madrid (2002).
80. Mihailovic ș.a. – MoxSyIz Nanowires: A user friendly new Nano-Material – <http://www.rug.nl/zernike/news/seminars/20060929MihailovicDragan>
81. Moriaki O., Yukio S., Akihide Y., Masanori O. – Development of Laser-arc Hybrid Welding – *NKK Technical Review* No.86, 2002, http://www.jfe-steel.co.jp/archives/en/nkk_giho/86/pdf/86_02.pdf
82. Múller R. – Structuri MOEMS utilizate în domeniul comunicațiilor și al senzorilor – Sesiune de informare pentru Programul National de Cercetare-Dezvoltare si Inovare în Domeniul Securitatii si Apararii, 2004
83. Muramaya N., Shin W. – Thermoelectric Gas Sensors – www7.nationalacademies.org/gdest/GDEST_Japan_Abstracts.pdf
84. Murday J., Celotta R, Pui D. – Investigative Tools: Experimental methods and probes – <http://clinton3.nara.gov/WH/EOP/OSTP/NSTC/html/iwgn/IWGN.Research.Directions/chapter03.pdf>
85. Muscutariu, I., Bica, I. – Defecte structurale in cristale, Tipografia Universității din Timișoara, 1995.
86. Naito Y., Miztani M., ș.a. – Observation of keyhole behavior and melt flows during the laser-arc hybrid welding – *Proc. ICALEO 2003*, LIA, Jacksonville, FL, Section A - Welding, 2003
87. Nakatani I., Furubayashi T., Takanashi T., Hanaoka H. – Preparation and Magnetic Properties of Colloidal Ferromagnetic Metals – *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 65, pag. 261-264, 1987
88. Nakatani J., Furubayashi T. – Iron-nitride magnetic fluids prepared by plasma CVD technique and their magnetic properties – *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 85, pag. 11-13, 1990
89. Nanotechnology Research Directions: IWGN Workshop Report Vision for

- Nanotechnology R&D in the Next Decade., White House report, 1999
90. Nechifor A, Andronescu E., Radu G., Nechifor G. – Particule magnetice nanocompozite – Nanoparticule magnetice compozite, Romanian Biological Sciences, Vol. III, No.1-2, pag. 57-77, 2005
 91. Nechifor A., Andronescu E. – Particule magnetice nanocompozite. Nanoparticule magnetice suport ca ferofluid, Romanian Biological Sciences, Vol.III, No 1-2, pag. 13- 24, 2005
 92. Nishida T., Law M. – Integrated Smart Nanosensors for Space Biotechnology Applications, NASA research briefing, 2002, www.ncsu.edu/kenan/ncsi/Docs/Presentations/Nishida%20and%20Law.ppt
 93. NVE Corporation – NVE GMR Sensor Catalog – www.nve.com
 94. Oda M., Fuchita E., Tsumeizumi M., Kashu S., Hayashi C. – Nanostructured Materials, 1, pag. 203-206, 1992
 95. Ohashi N., Saito N, Sakaguchi I., Sekiguchi D., Haneda H. – Controlling of structures and properties of oxide thin films and interfaces – www7.nationalacademies.org/gdest/GDEST_Japan_Abstracts.pdf
 96. Okada O. – Development of CO Selective Gas Sensor – www7.nationalacademies.org/gdest/GDEST_Japan_Abstracts.pdf
 97. Oprea Fl., Taldi D., Ivanescu Al., Constantin I., Roman B. – Teoria proceselor metalurgice, Editura didactică și pedagogică, Bucuresti, 1984
 98. Popescu N., Opran M. : Laseri. Aplicații, Editura Militară, București, 1979.
 99. Remes H, Kujahala P. – Experimental and Theoretical Investigation of Fatigue Characteristics of Laser Hybrid Welded Joints – The 9th Symposium on Practical Design of Ships and other Floating Structures, Luebeck-Travemuende, Germany, 2004.
 100. Reutzel E., Kelly S., Martukanitz R., Bugarewicz M., Michaleris P. – Laser-GMA Hybrid Welding: Process Monitoring and Thermal Modeling, www.cnst.us/documents/Presentations/GMA_Paper_0505.pdf
 101. Sanders N., Etemadi K., Pfender E. – Studies of the anode region of a high intensity argon arc – Journal of Applied Physics, 53 (6), pag. 4136-4145, 1982
 102. Savu D., **Savu S.** – Flow rate nanosensor for shielding gas welding systems, The 1st South-East European Welding Congress, 24-26 May 2006, Timisoara, Romania
 103. **Savu S.**, Bica I., Savu D., Catana G., Bucșe I. – Cavitation iron microparticles and nanoparticles generation by plasma procedures, International Conference EPMA 2007, Toulouse, France
 104. **Savu S.**, Birdeanu V., Dehelean D., Savu D. – Development of a nanostructured sensor for the laser-arc welding process, IIW - The 60th Annual Assembly and International Conference, 01-08 July 2007, Dubrovnik&Cavtat, Croatia
 105. **Savu S.**, Dehelean D., Birdeanu V., Savu D. – Embedded nanostructured sensor for hybrid laser -TIG welding – The 61th Annual Assembly and International Conference IIW, July 2008, Graz
 106. **Savu S.**, Savu D. – New sensors in welding technologies – Conferinta Internationala „Tehnologii inovative pentru imbinarea materialelor avansate”, ISIM Timisoara, 2007
 107. Sellmyer D., Skomski R. – Advanced magnetic nanostructures, Ed. Springer, 2006
 108. Sensors Daily – www.sensormag.com

109. Shing T. – Robust design of silicon piezoresistive pressure sensors – MSM 98 Technical Proceedings of the 1998 International Conference on Modeling and Simulation of Microsystems, pag. 597 – 601, 1998
110. Shinn B., Farson D., Denney P. – Control of the weld bead shape with the hybrid welding process – IIW Doc. No. IV-879-05, The 58th Annual Assembly and International Conference, July 2005, Prague
111. Shuho T., Takashi I., Masao W., Takashi A. – Laser-Arc Hybrid Welding System for Various 3D Welding - Development of Coaxial Laser Hybrid Applications and Research in Sweden, IIW Doc. No. IV-891-05, The 58th Annual Assembly and International Conference, July 2005, Prague
112. Shull R. D., Bennet L.N. – Nanostructured Materials, 1, pag. 83-88, 1992
113. Shulman Z., Kordonsky V. – The Magnetorehological Effect – Nauka I Tekhnika, pag.184, Minsk, 1982
114. Shulman Z., Kordonsky V., Zaltsgendler E., Prokhorov I., Khusid B., Demchuk S. – [Structure, physical properties and dynamics of magnetorheological suspensions](#) – International Journal of Multiphase Flow, 12, 6, 935, 1986
115. Simion Z. – Notite de curs de chimie fizica – ed. a II-a, Tipografia Universităţii din Timisoara, 1995.
116. Sirkin V.G. – Himiia I tehnologiiia karbonilnih materialov – Izdatelstvo Himiia, Moskva, 1972.
117. Siwecki T., Stemne D., Hakansson K. – Laser hybrid welding of T-sections in 20 mm EHSsteel with different filler materials – The 61th Annual Assembly and International Conference IIW, July 2008, Graz
118. Srivastava D. – Computational Nanotechnology with Carbon Nanotubes and Fullerenes – Computing in Science and Engineering, Invited Article for a thematic issue on Nanotechnology, July-Aug, 2001
119. Stauffer H., Rührnöbl M. – LaserHybrid Welding and LaserBrazing: State of the Art in Technology and Practice by the Examples of the Audi A8 and VW-Phaeton – www.fronius.com/cps/rde/xbcr/SID-0AFF0106-989C1B73/fronius_international/ST-12_laserhybrid_laserloeten_gb.pdf
120. Sundaram M., Chalmers S. A., Gossard A. C. – New quantum structures – Science, 254, 1326-1335, 1991
121. Surajit K., Swaminathan R., Rosario A., Zhong L., Hesketh P. – Tin oxide nanosensor fabrication using AC dielectrophoretic manipulation of nanobelts – www.nanoscience.gatech.edu/zlwang/paper/2005/05_EA_1.pdf
122. Tamaki J. – Design of Nano Electrode for Dilute Pollutant Gas Sensors – www7.nationalacademies.org/gdest/GDEST_Japan_Abstracts.pdf
123. Technische Universität Carolo Wilhelmina zu Braunschweig – AMR Sensors – http://www.emg.tu-braunschweig.de/forsch/mag_sens/ms_amr_en.htm
124. Thomy C., Seefeld T., Vollertsen F. – Laser GMA welding with various laser systems – IIW Doc. No. XII-1843-05, The 58th Annual Assembly and International Conference, July 2005, Prague
125. Travis D., Dearden G., Watkins K., Reutzler E., Martukanitz R., Tressler J. – Sensing for monitoring of the laser-GMAW hybrid welding process – 23th International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics, San Francisco California, paper no. 206, Laser Institute of America, Publication No. 597, Vol. 97., 2004
126. Tusek J., Guban M. – Hybrid welding with arc and laser beam – Science and Technology of welding and Joining, vol. 5, 1999
127. Uchihara M., Fukui K. – Laser-Arc Hybrid Welding of Automotive High Strength Steel Sheets – IIW Doc. No. XII-1854-05, The 58th Annual Assembly and

- International Conference, July 2005, Prague
128. Ursu I., Mihailescu I., Prokhorov, A.M. : Interacțiunea radiației laser cu substanțele, Editura Academiei R. S. R., Bucuresti, 1986.
 129. Vekas L. – Nanofluidice magnetice, nanocompozite magnetizabile și aplicații – o nișă de colaborare și integrare tehnologică, www.romnet.net/ro/strategie/doc/Strategie_Rezumat%20extins.doc
 130. Vijaykrishnan N. – Nanosensor Arrays: Integrating Nano-Scale Sensors and VLSI Processing Circuitry – 18th International Conference on VLSI Design held jointly with 4th International Conference on Embedded Systems Design (VLSID'05), pag. 241-246, 2005
 131. Viota J, Vicente J., Durán J., Delgado A. – Stabilization of magnetorheological suspensions by polyacrylic acid polymers – Journal of Colloid and Interface Science 284 527, 2005
 132. Walz C., Seefeld T., Sepold G. – Hybrid welding of supermartensitic stainless steel – Stainless Steel World Conference, The Hague, The Netherlands, pag. 64-69, 2001
 133. Walz C., Seefeld T., Sepold G. – Process Stability and Design of Seam Geometry during Hybrid Welding – [www.bias.de/Abteilungen/SOT/Publikationen/Buecher/Process Stability and Design.pdf](http://www.bias.de/Abteilungen/SOT/Publikationen/Buecher/Process_Stability_and_Design.pdf)
 134. Wang X., Liebhaber A. – Complementary change in cis determinants and trans factors in the evolution of an mRNP stability complex – The EMBO Journal, 15(18), pag. 5040–5051, 1996
 135. Weldingh J., Kristensen J. - Hybrid YAG-LASER/MAG Welding, Quality and Stability – Industrial Laser Solutions, 1996, http://www.industrial-lasers.com/display_article/278188/39/ARCHI/none/Feat/Welding-of-structural-steels
 136. Westervelt E., Schmiedeler J., Washington. G. – Proceedings of ASME International Mechanical Engineering Congress and RD&D Expo, Anaheim, CA (2004).
 137. Wise K.D, Majafi, K. – Microfabrication Techniques for Integrated Sensors and Microsystems Science, 254, 1335-1341, 1991
 138. Worden K., Bullough W., Haywood J. – Smart technologies – World Scientific, Hong Kong, 2003
 139. Wu W., Zhao B., Wu Q, Chen L., Hu K. – The strengthening effect of guar gum on the yield stress of magnetorheological fluid – Smart Materials and Structures, 15 N94, 2006
 140. Yanagida H. - Materials Design for Advanced Sensing, University of Tokio, http://www7.nationalacademies.org/gdest/GDEST_Japan_Abstracts.pdf
 141. Yoshiaki A. : Plasmon, Electron and Laser Beam Technology, American Society for Metals, Carnes Publication Services Inc., Ohio, 1986.
 142. Yoshizawa A.: Brevet de invenție, nr. 8403850 (Franta), 1984.
 143. Ypsilanti P., Denney P., Harwig D., Brown L. – Hybrid Laser Weld Development for Shipbuilding Applications – Project No.: S0978 Navy MANTECH Shipbuilding Initiative, 2001
 144. Zhou J., Tsai H., Wang P., Menassa R., Marin S. – Modeling of Hybrid Laser-MIG Keyhole Welding Process – Proceedings of International Conference "Laser Technologies in Welding and Materials Processing", Katsiveli, Crimea, Ukraine, 2003

Anexe

ANEXA 1 Nano- și micropulberi de fier

Echipament:

- Pentru nanopulberile de fier: microscop Olympus BX51M, în câmp întunecat, mărire: 1000x.
- Pentru microparticulele de fier: stereo-microscop Olympus, în câmp luminos, mărire: 32x

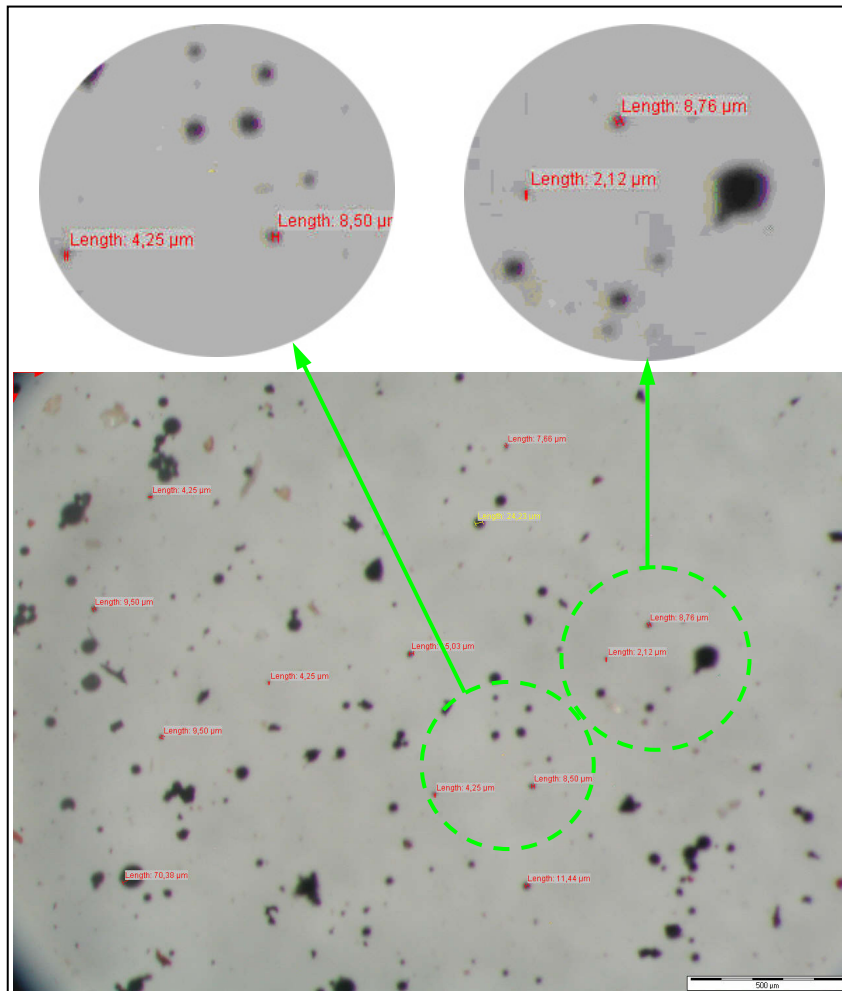


Fig. A 1.1 Microparticule obținute în jet de plasmă

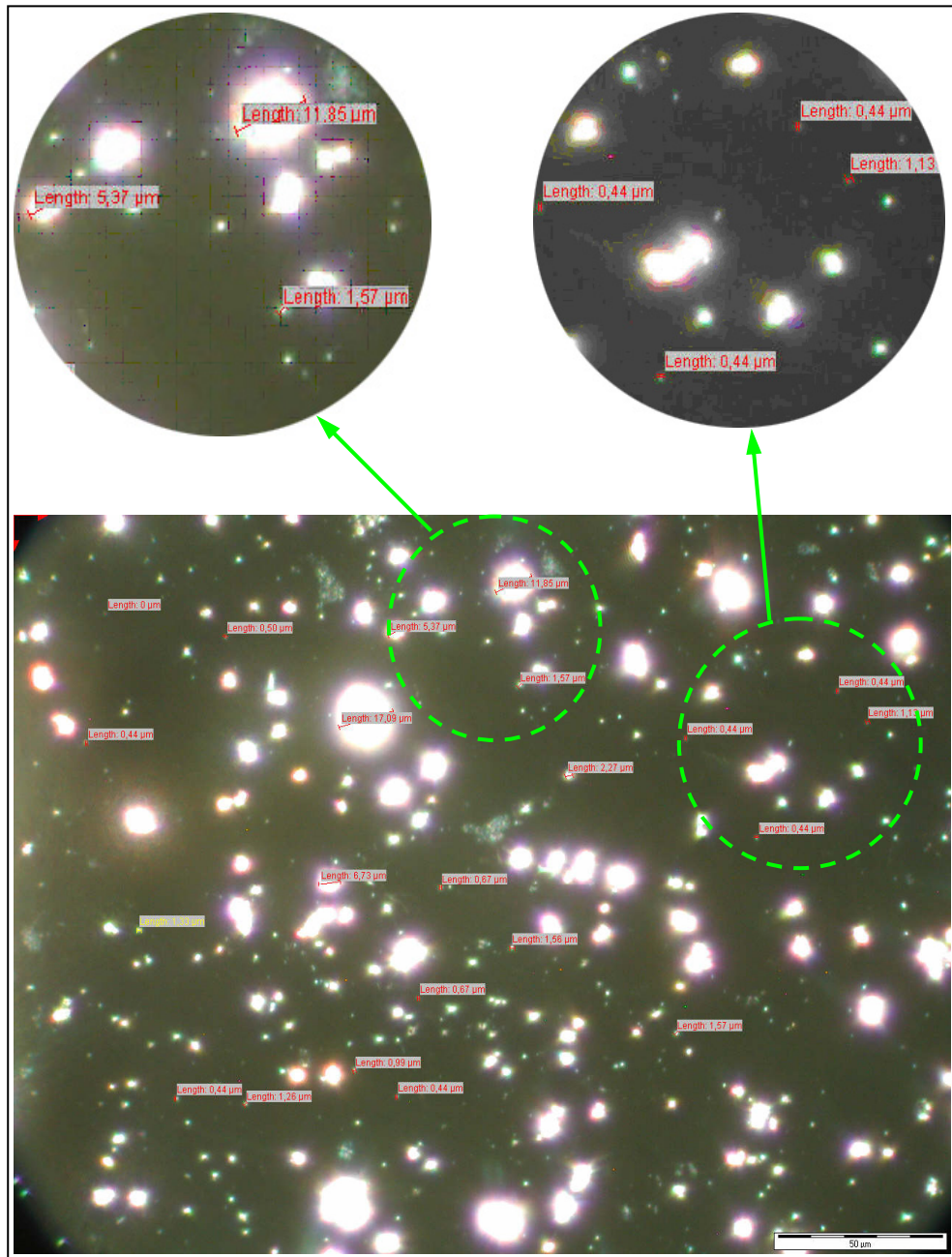


Fig. A 1.2 Nano- și microparticule obținute în jet de plasmă

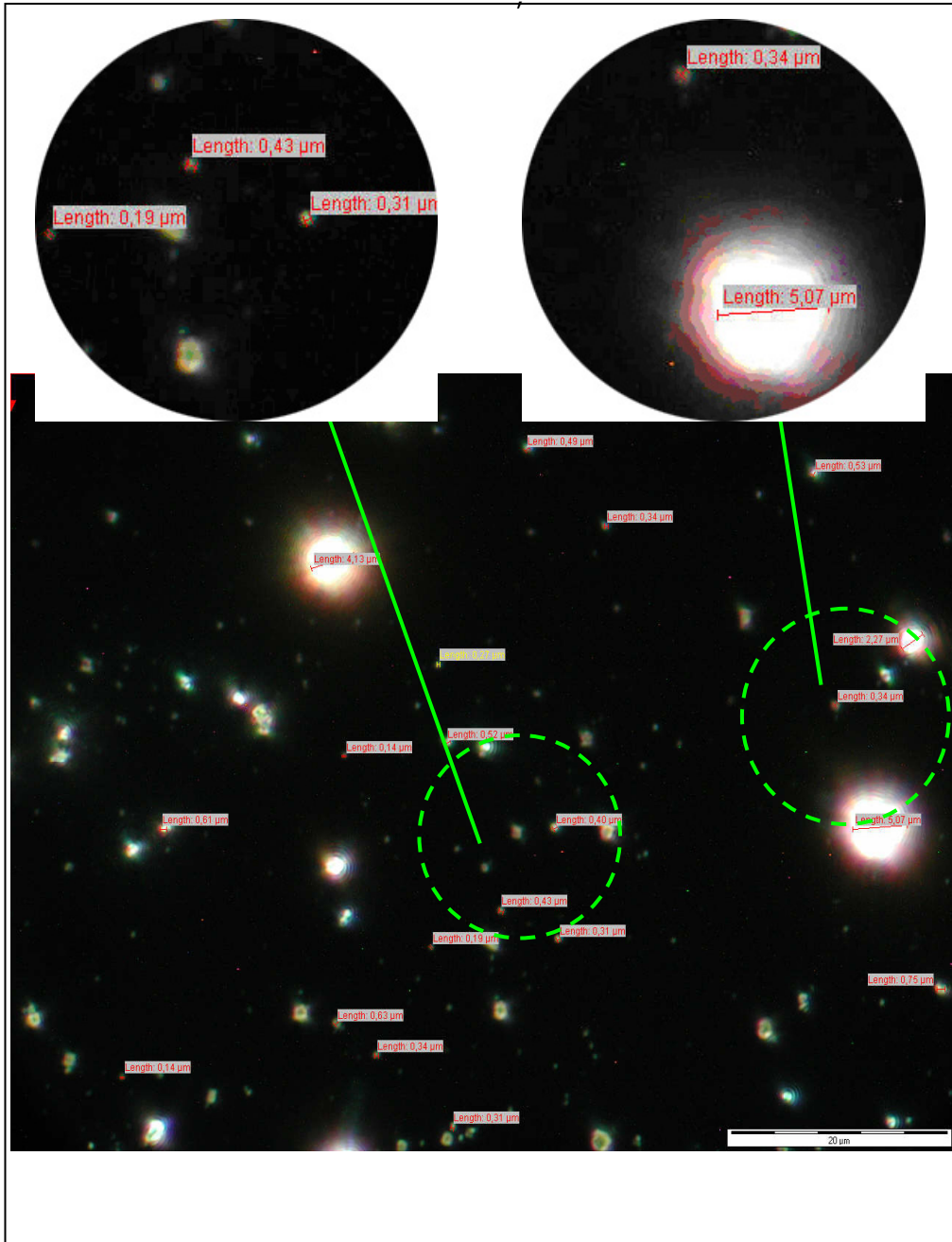


Fig. A 1.3 Nano- și microparticule obținute în jet de plasmă

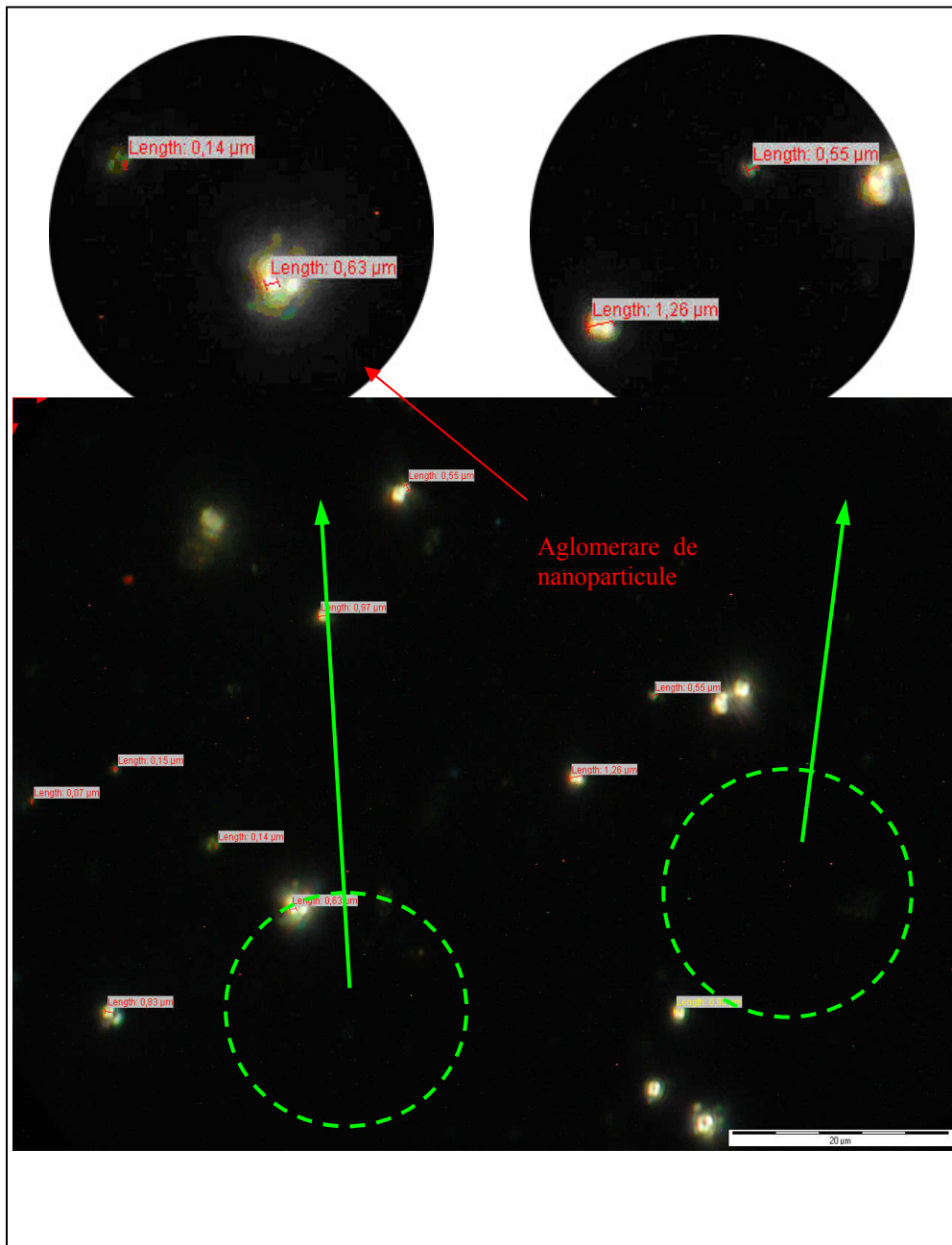


Fig. A 1.4 Nanoparticule obținute în jet de plasmă

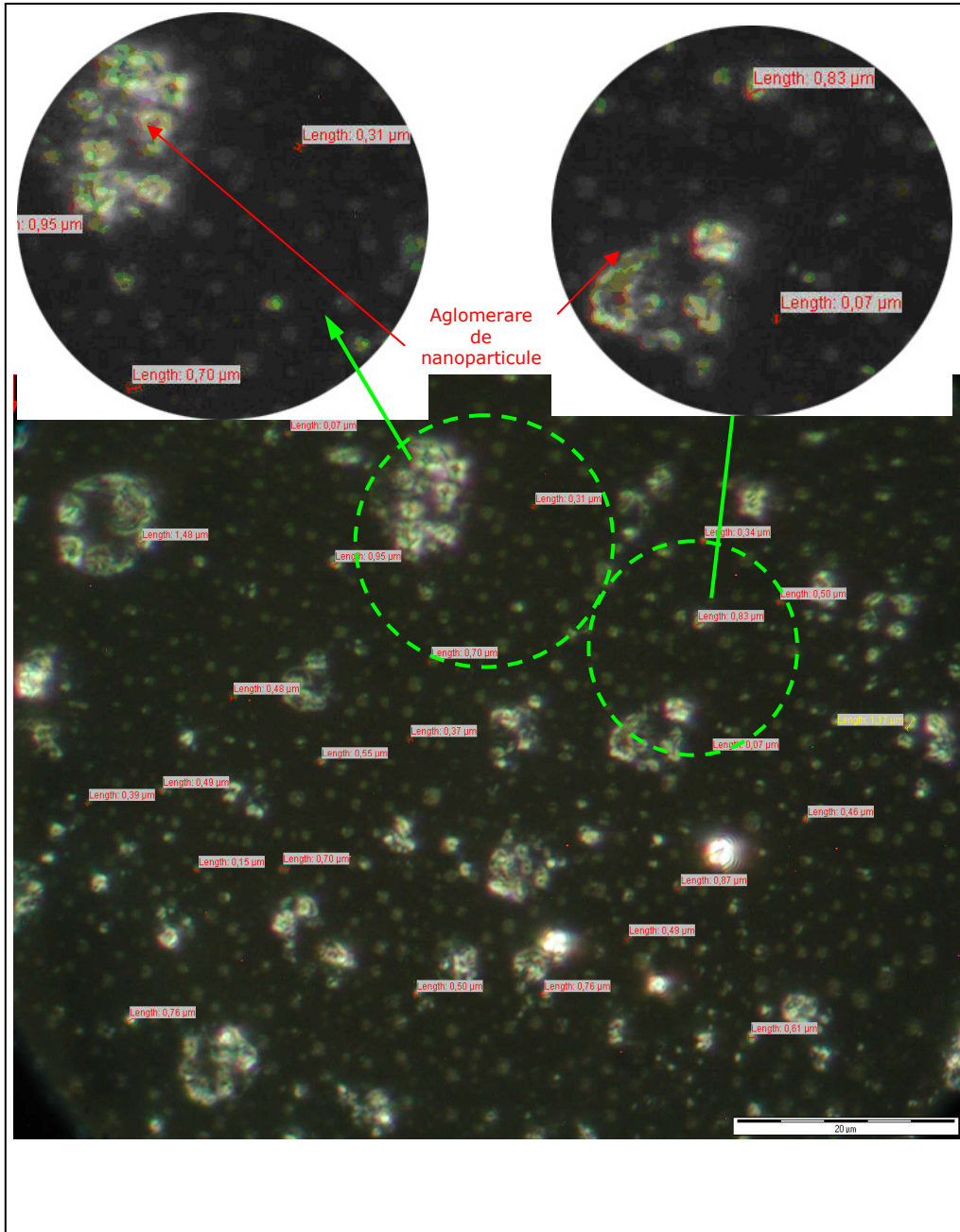
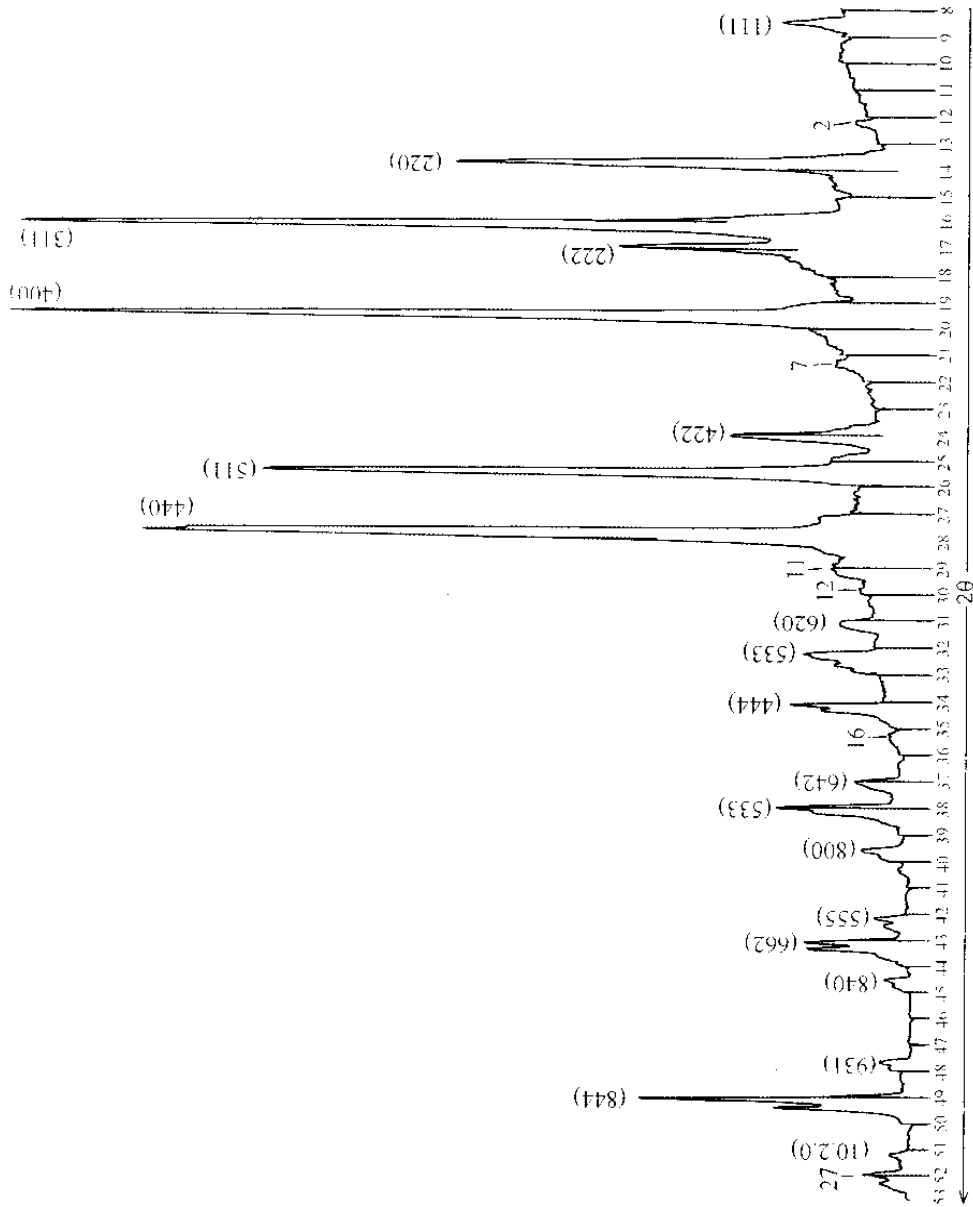


Fig. A 1.5 Nanoparticule obținute în jet de plasmă

ANEXA 2
Analiza Röntgen a particulelor elaborate în jet de plasmă,
cu colectare fără controlarea mediului



ANEXA 3

Curbele de magnetizare a pulberilor elaborate în jet de plasmă

Cantitate analizată: 178 mg,
Echipament: magnetometru YSM-880 (tip Physica)

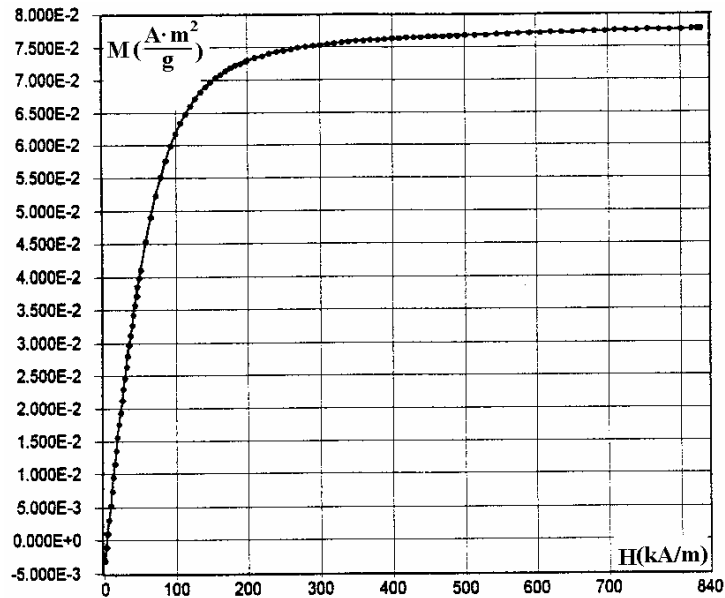


Fig. A 3.1 Curba de magnetizare a nano- microparticulelor cavitate de fier

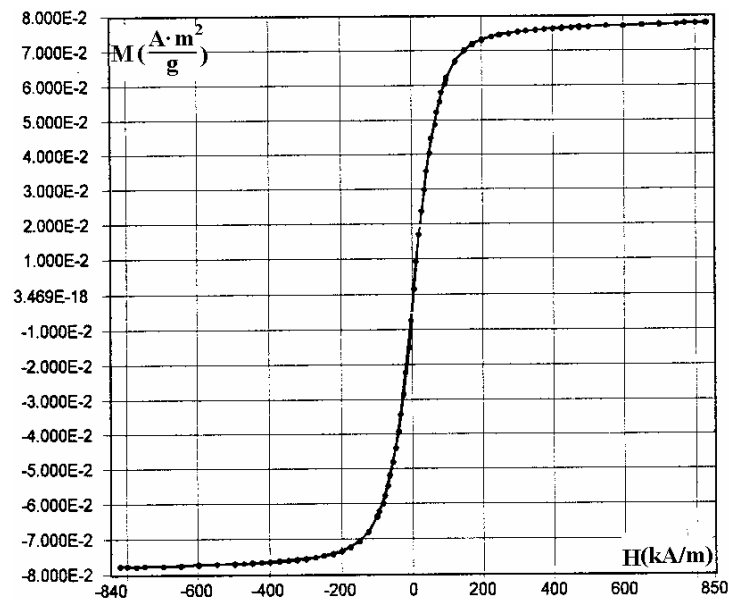
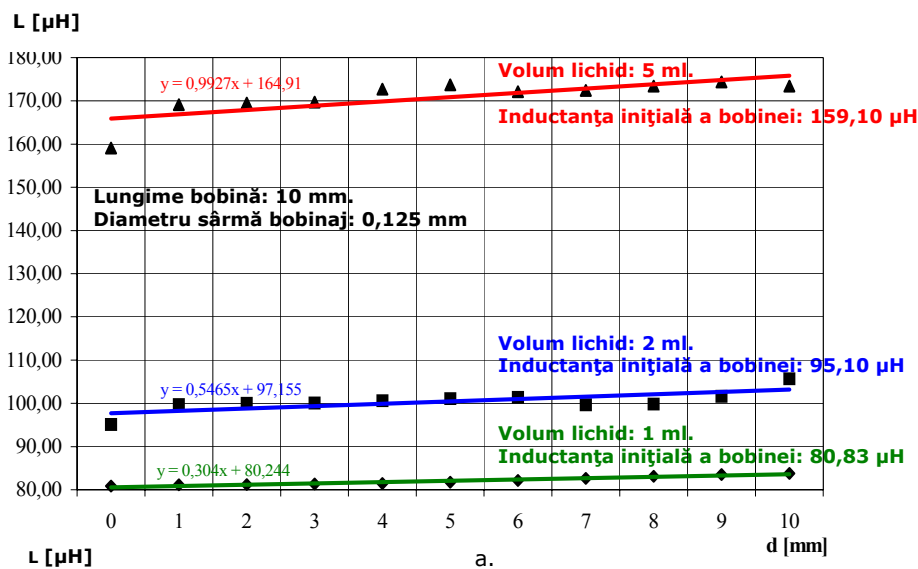


Fig. A 3.2 Curba de magnetizare a nano- microparticulelor cavitate de fier

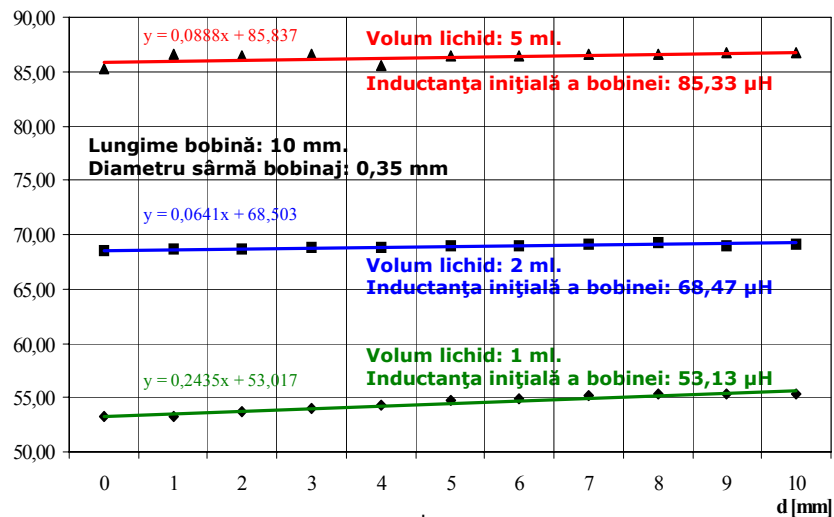
ANEXA 4

Comportarea lichidului magnetic LM-SF32 ca miez magnetic într-o bobină

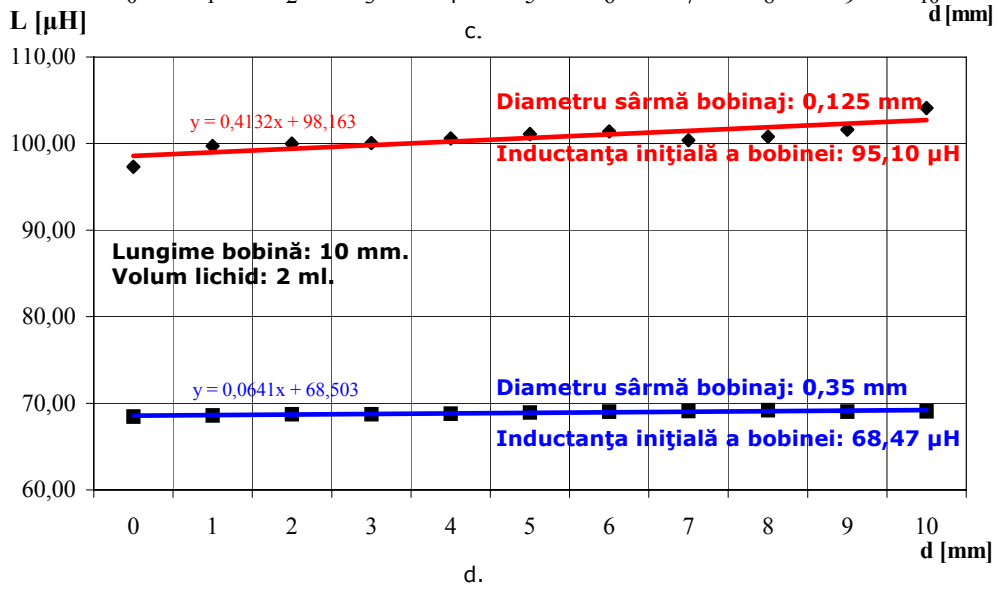
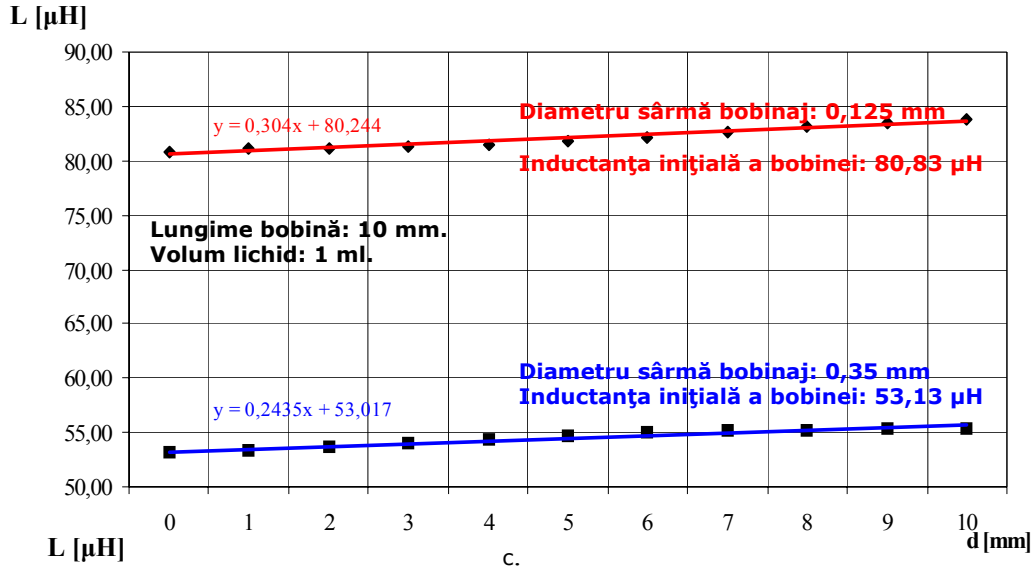
Lichid magnetic: LM-SF32
 Instrument de măsură: Signametrics SM 2064 PCI DMM
 Bobinaj: Sârmă cupru emailată, diametre: 0,125 mm și 0,35 mm
 Bobină: Solenoid lung fără miez
 Introducere lichid magnetic: 0 la 10 mm cu pas de 1 mm, indiferent de volumul ocupat (1, 2, 5 ml)

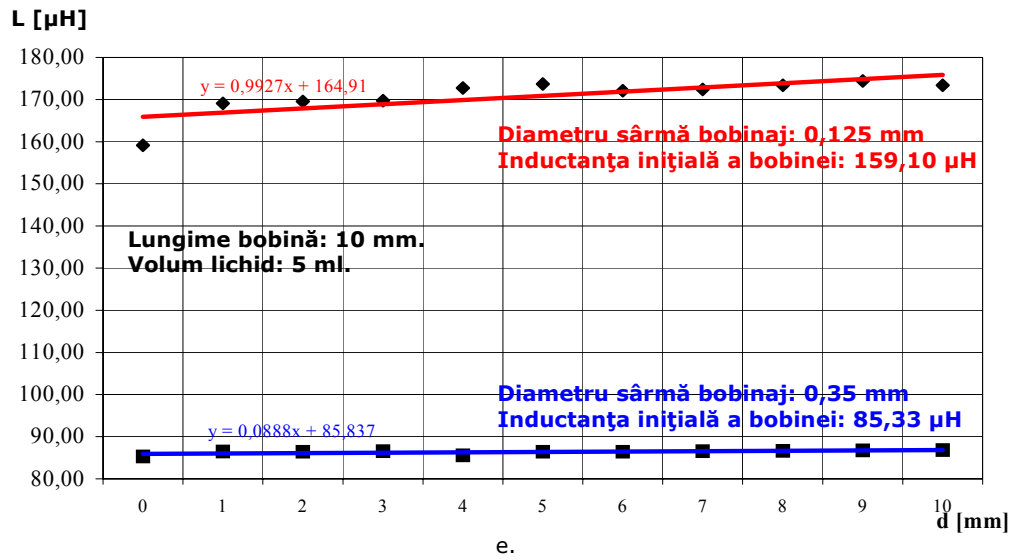


a.



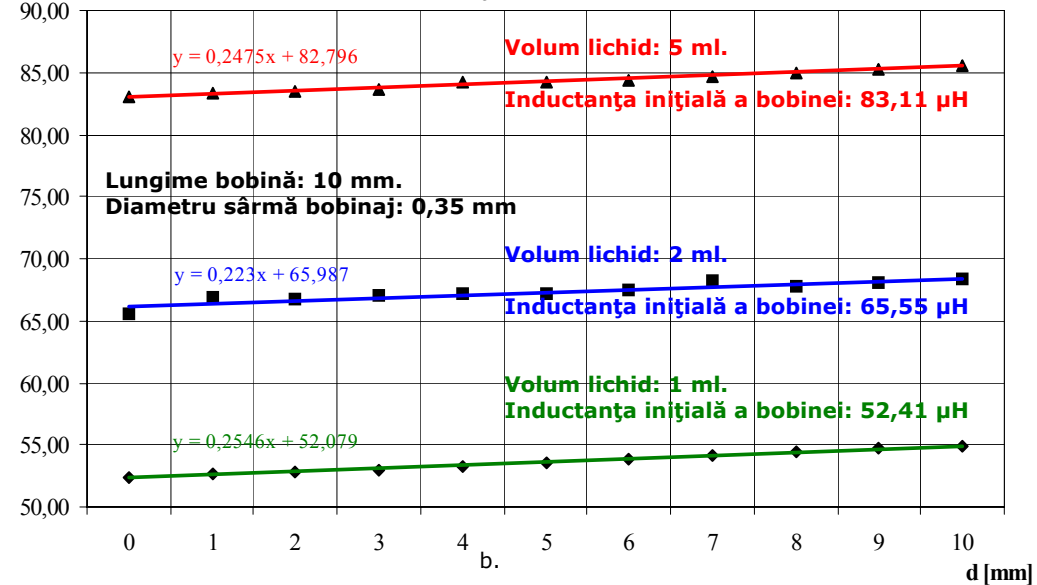
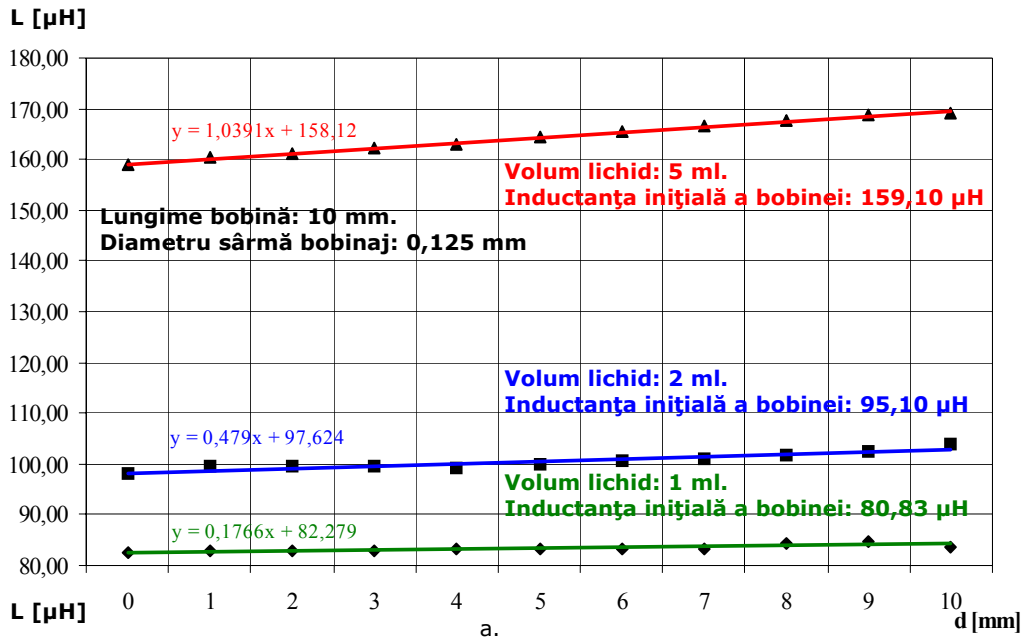
b.

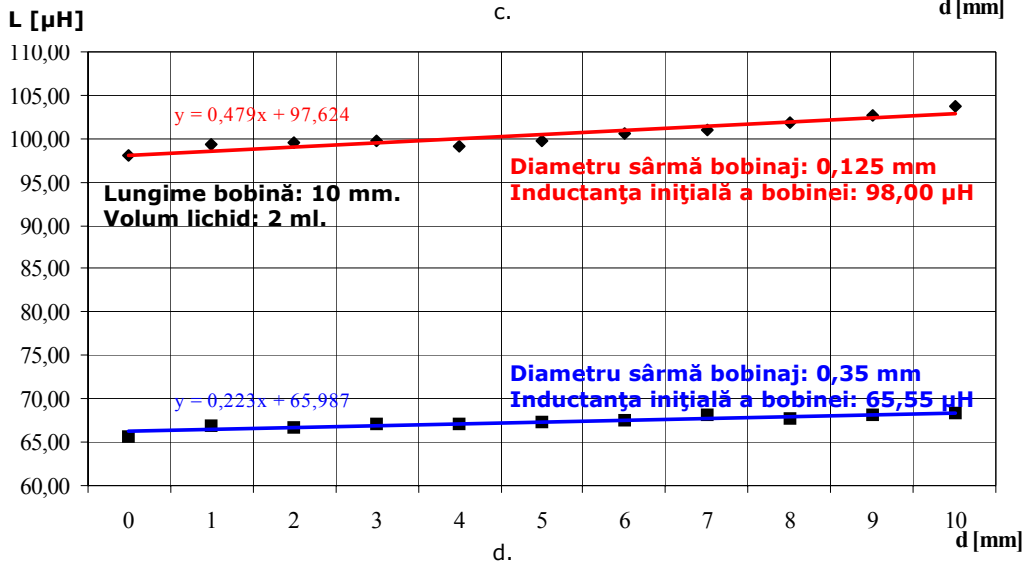
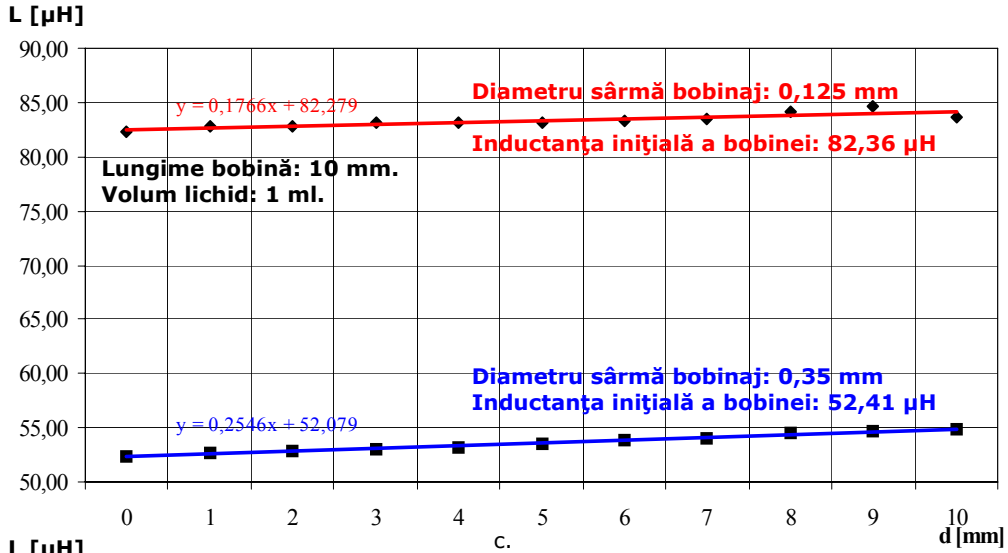


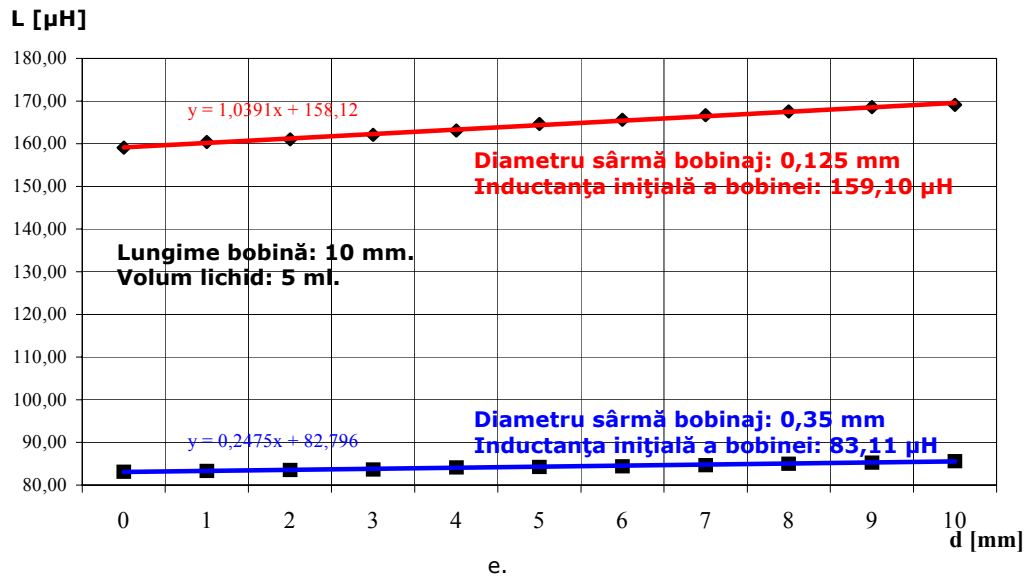


Comportarea lichidului magnetic LM-PP2 ca miez magnetic într-o bobină

Lichid magnetic: **LM-PP2**
 Instrument de măsură: **Signametrics SM 2064 PCI DMM**
 Bobinaj: **Sârmă cupru emailată, diametre: 0,125 mm și 0,35 mm**
 Bobină: **Solenoid lung fără miez**
 Introducere lichid magnetic: **0 la 10 mm cu pas de 1 mm, indiferent de volumul ocupat (1, 2, 5 ml)**



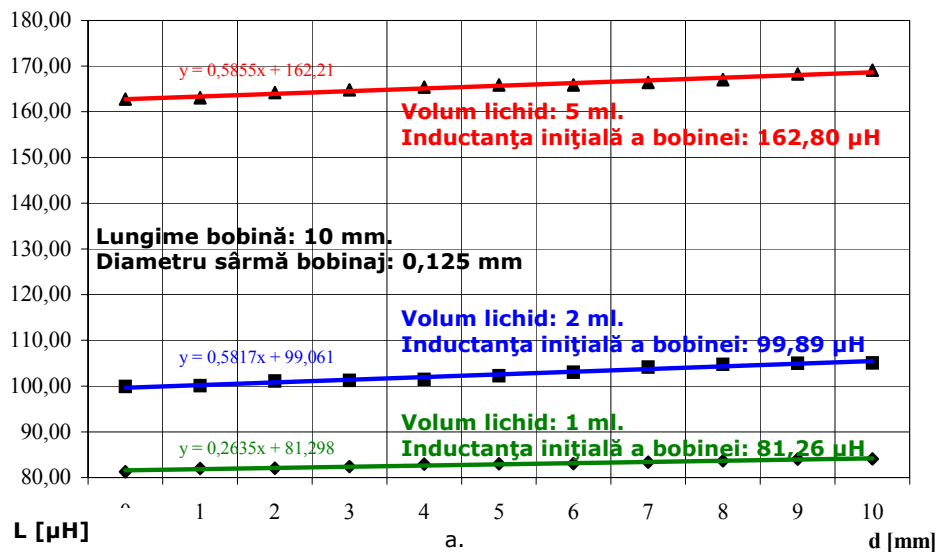




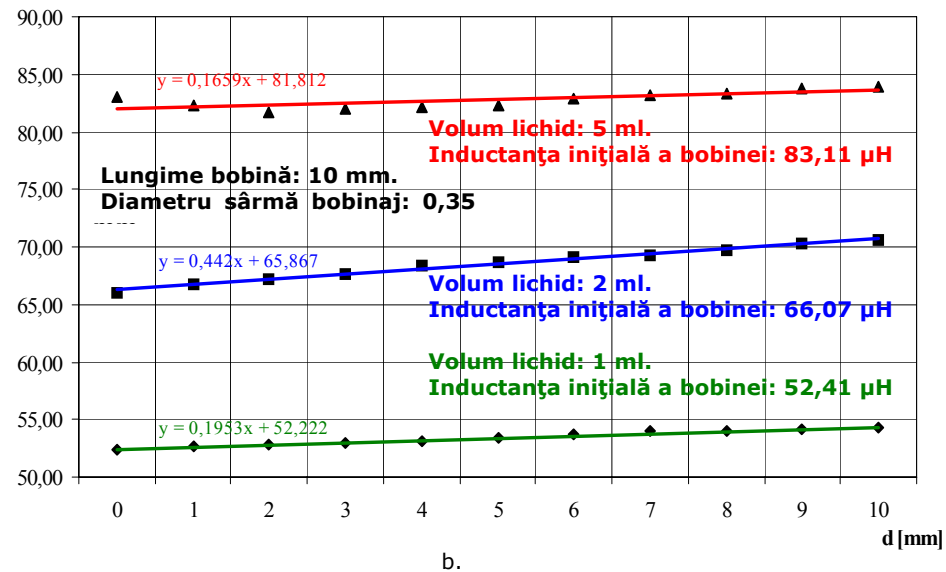
Comportarea lichidului magnetic LM-9 ca miez magnetic într-o bobină

Lichid magnetic: **LM-9**
 Instrument de măsură: **Signametrics SM 2064 PCI DMM**
 Bobinaj: **Sârmă cupru emailată, diametre: 0,125 mm și 0,35 mm**
 Bobină: **Solenoid lung fără miez**
 Introducere lichid magnetic: **0 la 10 mm cu pas de 1 mm, indiferent de volumul ocupat (1, 2, 5 ml)**

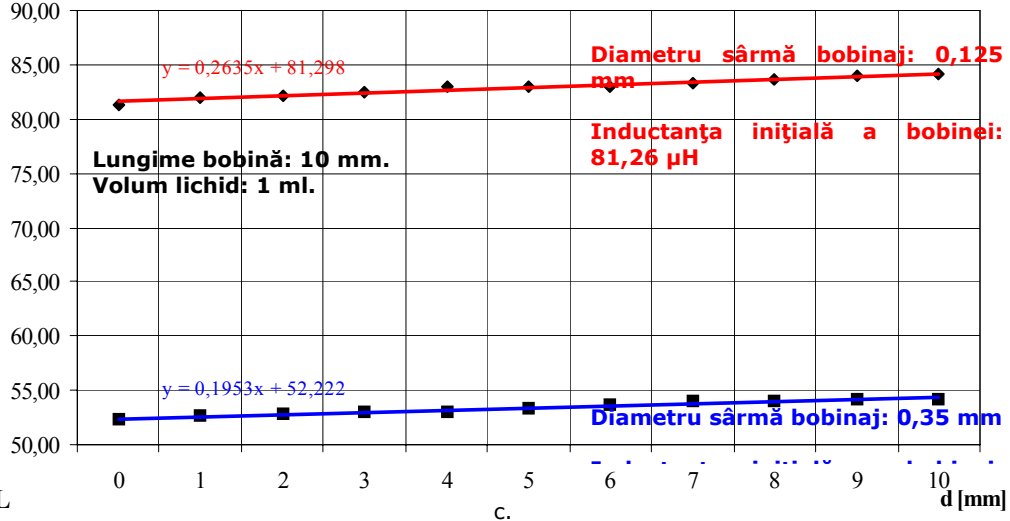
L [μ H]



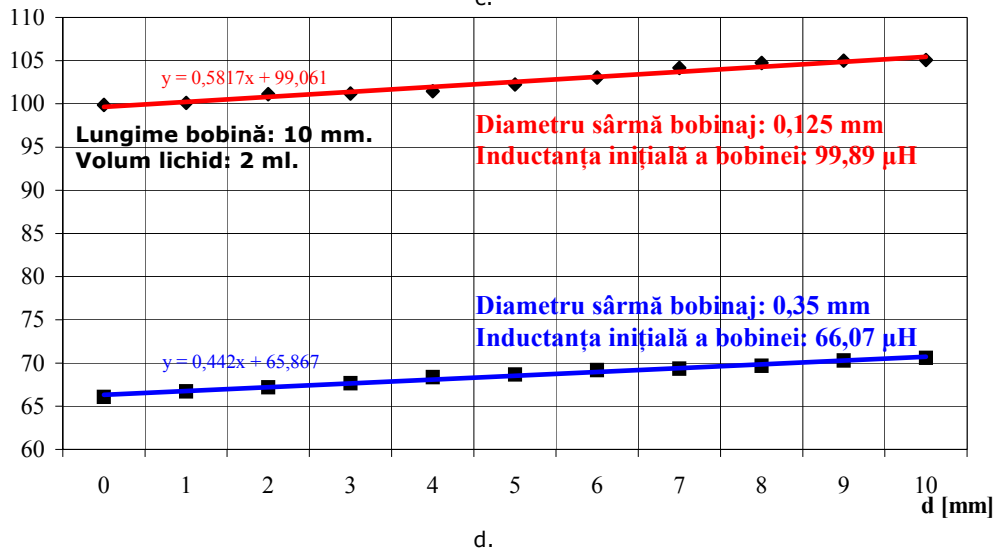
L [μ H]



L



L



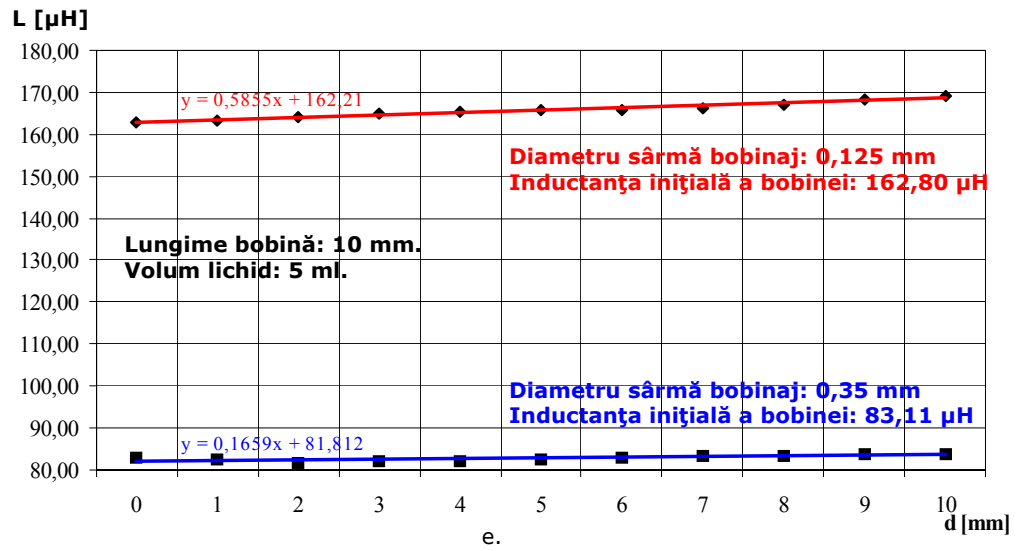
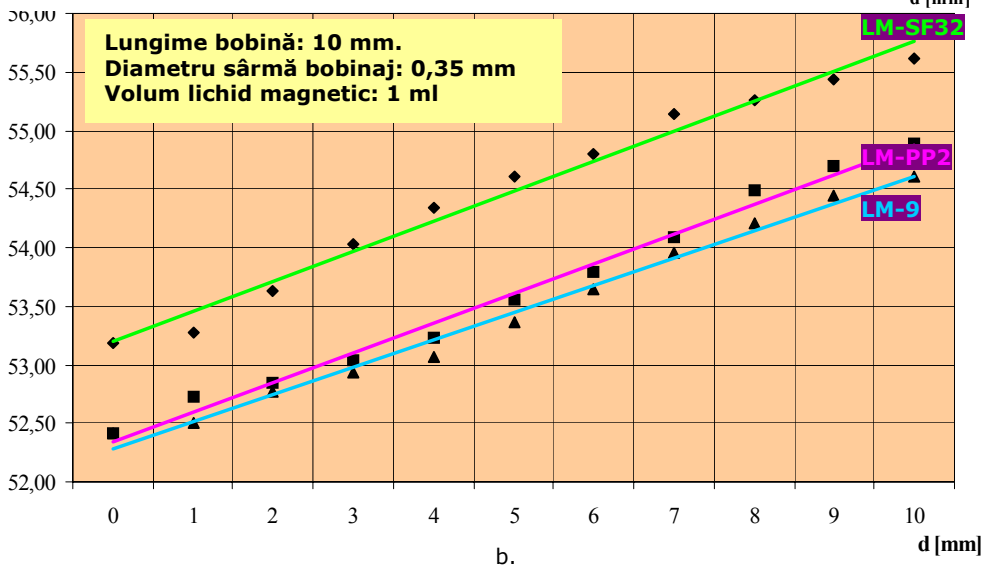
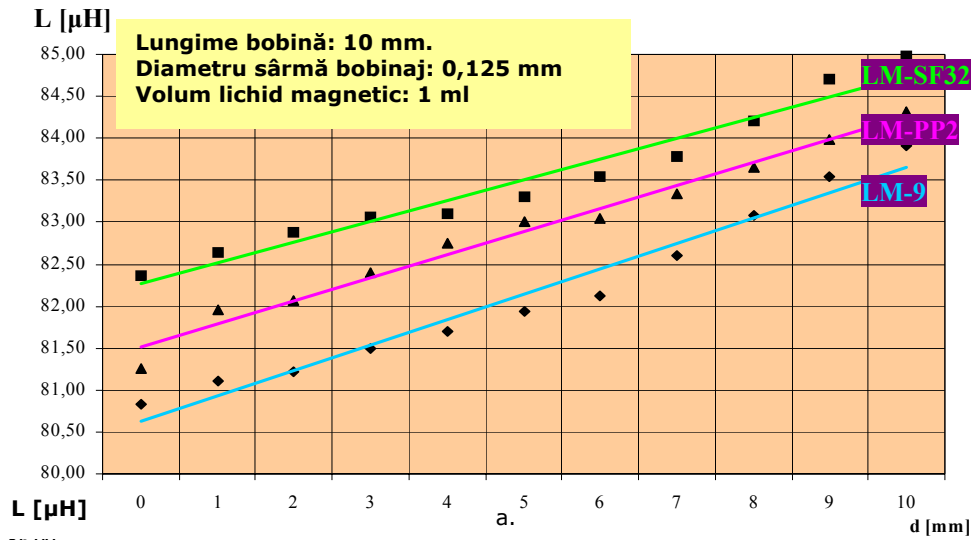


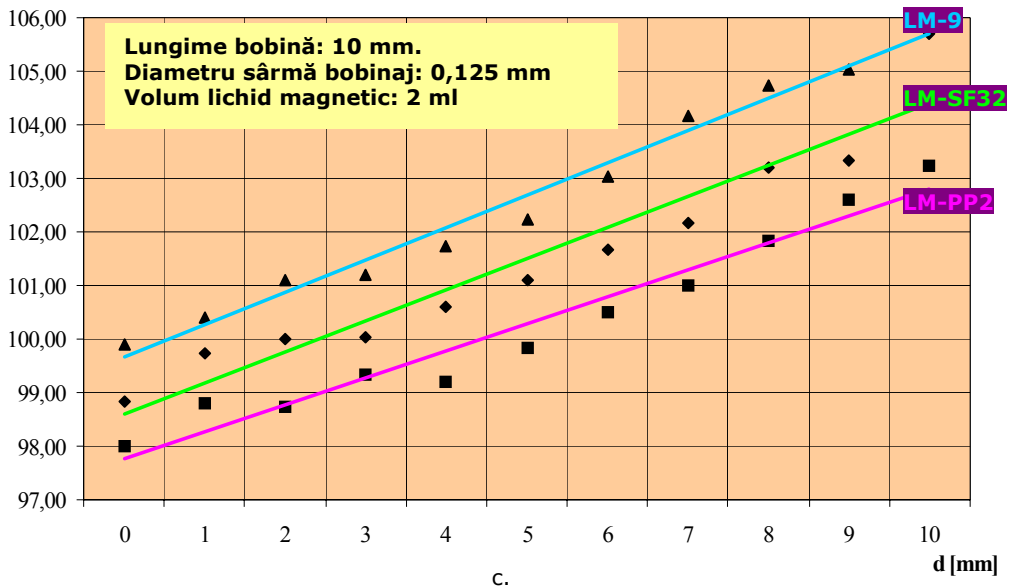
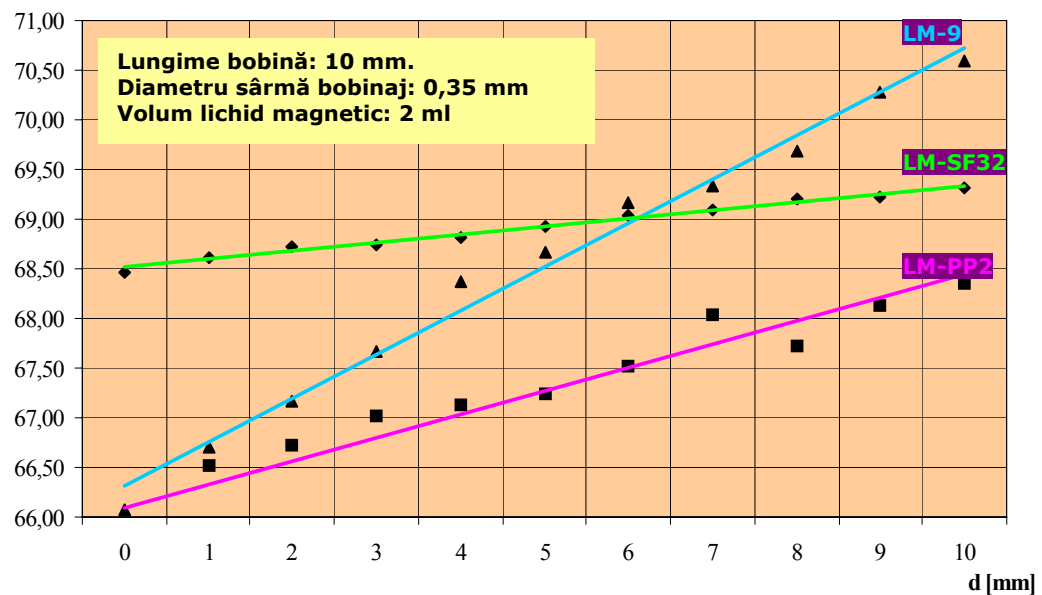
Fig. A 4.1 Variația inductanței bobinei la creșterea lungimii miezului de lichid magnetic

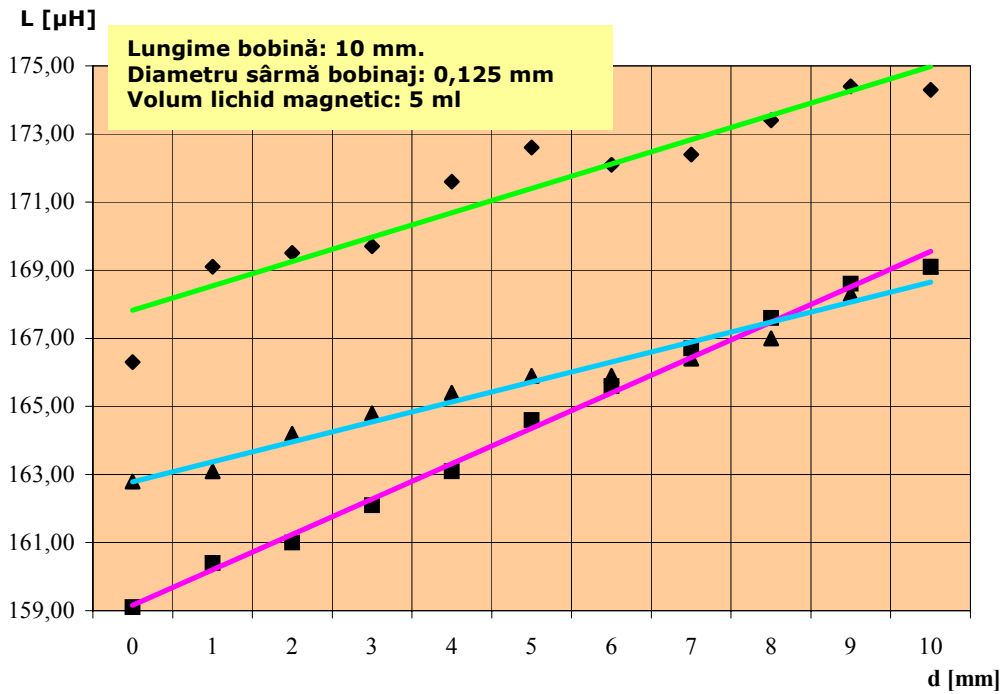
ANEXA 5

Analiza comparativă a influenței fluidelor inteligente magnetice LM-SF32, LM-PP2 și LM-9 asupra inductanței bobinei

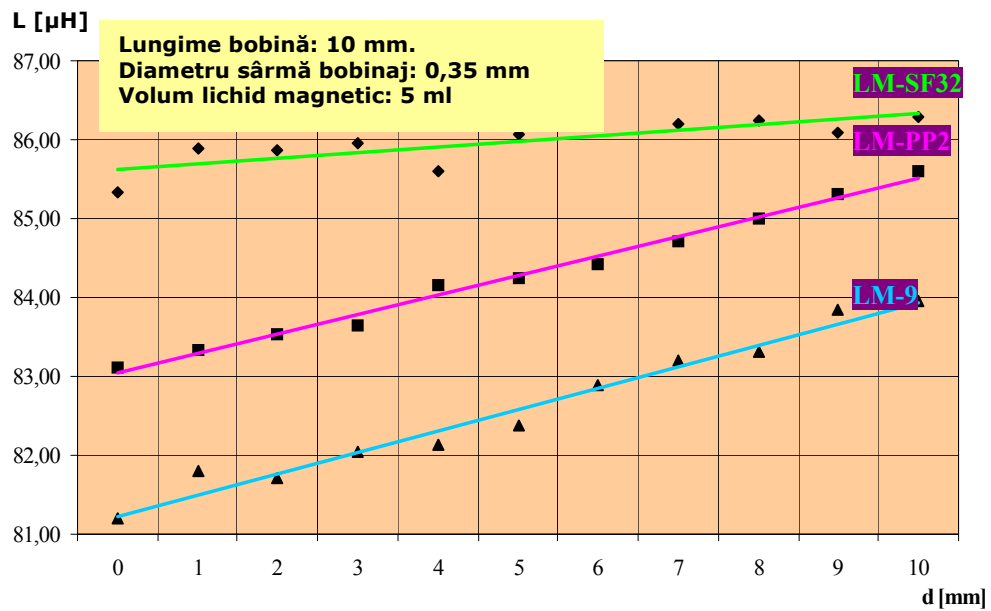
Lichide magnetice: **LM-SF32, LM-PP2, LM-9**
 Instrument de măsură: **Signametrics SM 2064 PCI DMM**
 Bobinaj: **Sârmă cupru emailată, diametre: 0,125 mm și 0,35 mm**
 Bobină: **Solenoid lung fără miez**
 Introducere lichid magnetic: **0 la 10 mm cu pas de 1 mm, indiferent de volumul ocupat (1, 2, 5 ml)**



L [μH]L [μH]



e.



f.

Fig. A 5.1 Variația inductanței bobinei la creșterea lungimii miezului de lichid magnetic

ANEXA 6

Aplicație informatică în Visual Basic 5.0 pentru interpretarea semnalului electric furnizat de senzorul de viteză



Fig A 6.1 Forma de conectare a utilizatorului la sistemul de monitorizare

```
Public LoginSucceeded As Boolean
```

```
Private Sub cmdCancel_Click()
```

```
    LoginSucceeded = False
```

```
End
```

```
End Sub
```

```
Private Sub cmdOK_Click()
```

```
    If Text1 = "xxx" And txtPassword <> "" Then
```

```
        LoginSucceeded = True
```

```
        Me.Hide
```

```
        Load frmStart
```

```
        frmStart.Visible = True
```

```
    Else
```

```
        MsgBox "Lipsa Utilizator sau Parola Gresita!", , "Conectare ..."
```

```
        Text1.SetFocus
```

```
        SendKeys "{Home}+{End}"
```

```
    End If
```

```
    txtPassword = ""
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Form_Load()
```

```
    Dim volum As String
```

```
    volum = Dir("c:\", vbVolume)
```

```
    If volum <> "ECS" Then End
```

```
End Sub
```

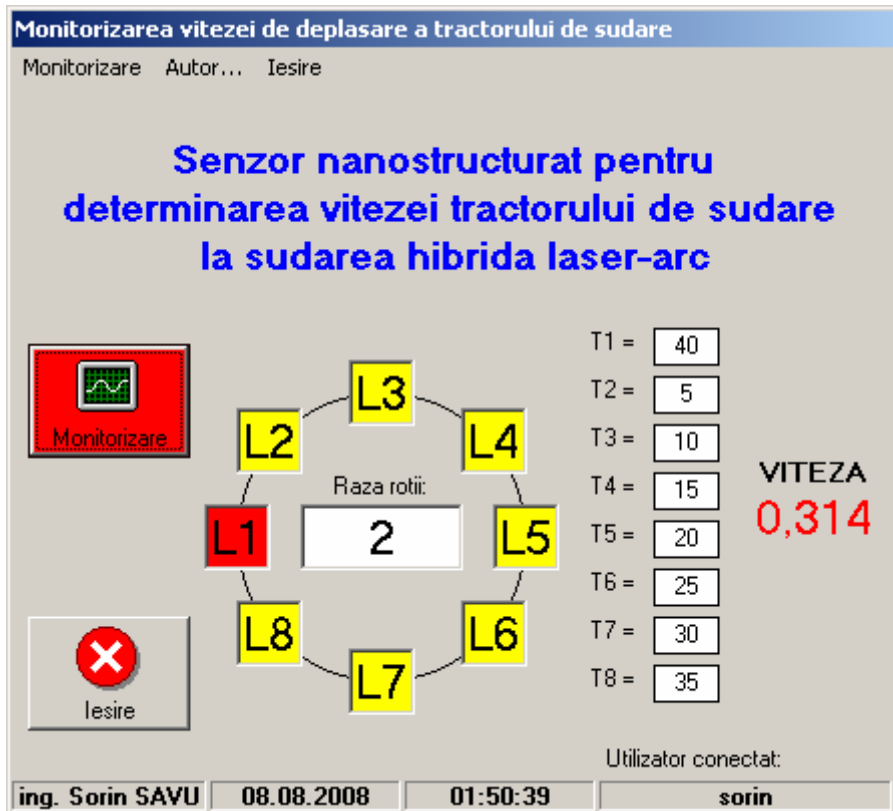



Fig. A 6.2 Forma de monitorizare și calcul a vitezei de deplasare

```

Private Sub autor_Click()
Load frmAbout
frmAbout.Visible = True
End Sub

Private Sub Command2_Click()
Text11 = 2 * 3.14 * Text1
Label3.BackColor = &HFF&
Command2.BackColor = &HFF&
Text2 = 0
    For i = 1 To 10000000
    Next i
Label3.BackColor = &HFFFF&
Label4.BackColor = &HFF&
Text3 = 5
Text10 = (Text11 / 8) / (Text3 - Text2)
    For i = 1 To 10000000
    Next i
Label4.BackColor = &HFFFF&
Label5.BackColor = &HFF&

```

```
Text4 = 10
Text10 = (Text11 / 8) / (Text4 - Text3)
    For i = 1 To 10000000
        Next i
Label5.BackColor = &HFFFF&
Label6.BackColor = &HFF&
Text5 = 15
Text10 = (Text11 / 8) / (Text5 - Text4)
    For i = 1 To 10000000
        Next i
Label6.BackColor = &HFFFF&
Label7.BackColor = &HFF&
Text6 = 20
Text10 = (Text11 / 8) / (Text6 - Text5)
    For i = 1 To 10000000
        Next i
Label7.BackColor = &HFFFF&
Label8.BackColor = &HFF&
Text7 = 25
Text10 = (Text11 / 8) / (Text7 - Text6)
    For i = 1 To 10000000
        Next i
Label8.BackColor = &HFFFF&
Label9.BackColor = &HFF&
Text8 = 30
Text10 = (Text11 / 8) / (Text8 - Text7)
    For i = 1 To 10000000
        Next i
Label9.BackColor = &HFFFF&
Label10.BackColor = &HFF&
Text9 = 35
Text10 = (Text11 / 8) / (Text9 - Text8)
    For i = 1 To 10000000
        Next i
Label10.BackColor = &HFFFF&
Label3.BackColor = &HFF&
Text2 = 40
Text10 = (Text11 / 8) / (Text2 - Text9)
End Sub

Private Sub Command4_Click()
End
End Sub

Private Sub Form_Load()
Timer1.Interval = 1000
StatusBar1.Panels.Item(4) = frmLogin.txtPassword.Text
Command2.Enabled = False
End Sub

Private Sub iesire_Click()
```

```
End
End Sub
```

```
Private Sub Text1_Change()
Command2.Enabled = True
End Sub
```

```
Private Sub Timer1_Timer()
StatusBar1.Panels.Item(2) = Date
StatusBar1.Panels.Item(3) = Time
End Sub
```



Fig. A 6.3 Forma de identificare a autorului aplicației

```
Private Declare Function RegQueryValueEx Lib "advapi32" Alias "RegQueryValueExA"
(ByVal hKey As Long, ByVal IpValueName As String, ByVal IpReserved As Long,
ByRef IpType As Long, ByVal IpData As String, ByRef IpcbData As Long) As Long
Private Declare Function RegCloseKey Lib "advapi32" (ByVal hKey As Long) As Long
Private Sub cmdSysInfo_Click()
End Sub
```

```
Private Sub cmdOK_Click()
Unload Me
```

```

End Sub

Private Sub Form_Load()
Me.Caption = "Autor: ing. Sorin SAVU"
    lblVersion.Caption = "Versiunea " & App.Major & "." & App.Minor & "." &
        App.Revision
End Sub

Public Sub StartSysInfo()
On Error GoTo SysInfoErr
Dim rc As Long
Dim SysInfoPath As String
    If GetKeyValue(HKEY_LOCAL_MACHINE, gREGKEYSYSINFO,
        gREGVALSYSINFO, SysInfoPath) Then
    ElseIf GetKeyValue(HKEY_LOCAL_MACHINE, gREGKEYSYSINFOLOC,
        gREGVALSYSINFOLOC, SysInfoPath) Then
    If (Dir(SysInfoPath & "\MSINFO32.EXE") <> "") Then
        SysInfoPath = SysInfoPath & "\MSINFO32.EXE"
    Else
        GoTo SysInfoErr
    End If
    Else
        GoTo SysInfoErr
    End If

Call Shell(SysInfoPath, vbNormalFocus)
Exit Sub
SysInfoErr:
    MsgBox "System Information Is Unavailable At This Time",
vbOKOnly
End Sub

Public Function GetKeyValue(KeyRoot As Long, KeyName As String, SubKeyRef As
String, ByRef KeyVal As String) As Boolean
    Dim i As Long
    Dim rc As Long
    Dim hKey As Long
    Dim hDepth As Long
    Dim KeyValType As Long
    Dim tmpVal As String
    Dim KeyValSize As Long

    rc = RegOpenKeyEx(KeyRoot, KeyName, 0, KEY_ALL_ACCESS,
hKey)
    If (rc <> ERROR_SUCCESS) Then GoTo GetKeyError
    tmpVal = String$(1024, 0)
    KeyValSize = 1024
    rc = RegQueryValueEx(hKey, SubKeyRef, 0, KeyValType, tmpVal,
KeyValSize)

    If (rc <> ERROR_SUCCESS) Then GoTo GetKeyError
    If (Asc(Mid(tmpVal, KeyValSize, 1)) = 0) Then

```

```
        tmpVal = Left(tmpVal, KeyValSize - 1)
    Else
        tmpVal = Left(tmpVal, KeyValSize)
    End If

Select Case KeyValType
    Case REG_SZ
        KeyVal = tmpVal
    Case REG_DWORD
        For i = Len(tmpVal) To 1 Step -1
            KeyVal = KeyVal + Hex(Asc(Mid(tmpVal, i, 1)))
        Next i
        KeyVal = Format("&h" + KeyVal)
End Select

GetKeyValue = True
rc = RegCloseKey(hKey)
Exit Function

GetKeyError: ' Cleanup After An Error Has Occured...
    KeyVal = ""
    GetKeyValue = False
    rc = RegCloseKey(hKey)
End Function
```

ANEXA 7

Aplicație informatică în LabView 8.5 pentru interpretarea semnalului electric furnizat de senzorul de înclinare

Aplicația LabView intitulată „Sistem integrat de monitorizare a poziției relative pentru ansamblul de sudare hibrid laser-WIG” are rolul de a comunica digital cu un dispozitiv de măsurare a inductanțelor și de a interpreta semnalul furnizat de acesta. Aplicația dispune de o interfață prietenoasă cu utilizatorul fiind ușor de utilizat. În figura A 7.1 se prezintă forma principală pentru monitorizarea semnalului emis de senzorii nanostructurați de înclinare.

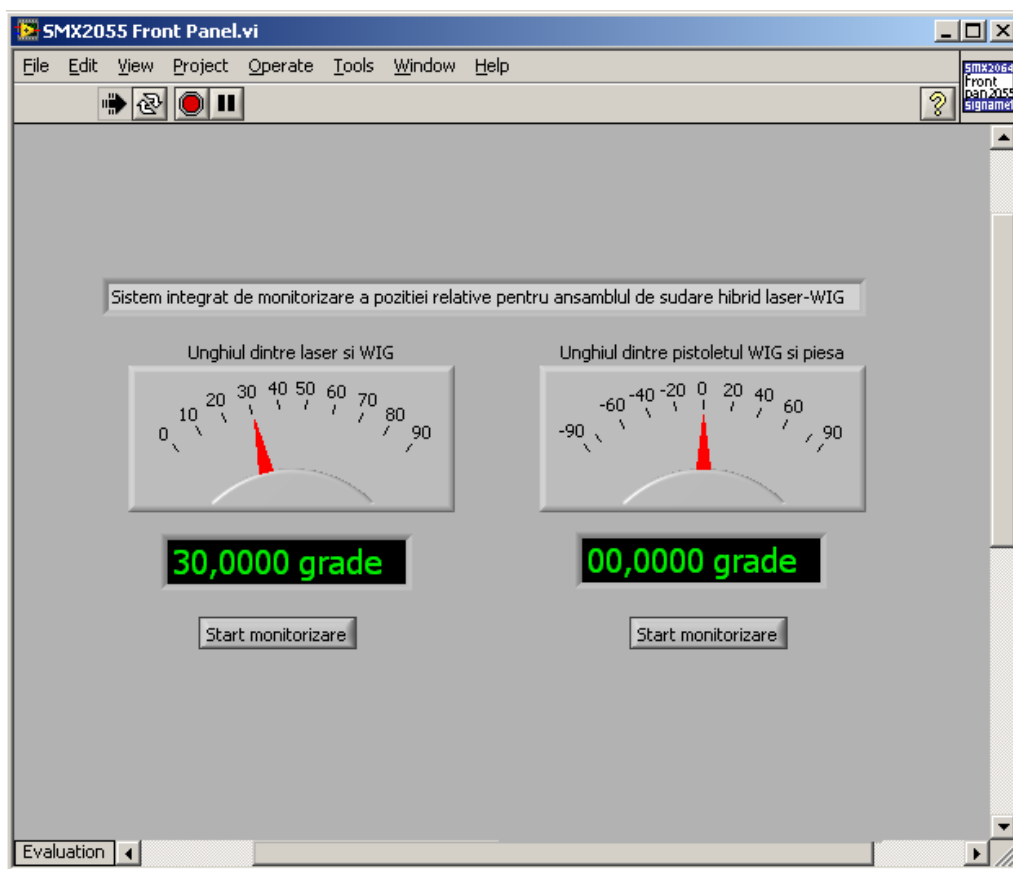


Fig. A 7.1 Forma principală de monitorizare a semnalului emis de inclinometru nanostructurat

Condițiile de realizare și ierarhia funcțiilor în cadrul procesului de monitorizare se realizează în mediul LabView și asigură o urmărire strictă a semnalelor electrice din placa de măsurare. Se prezintă în figura A 7.2 ierarhizarea procesului de monitorizare.

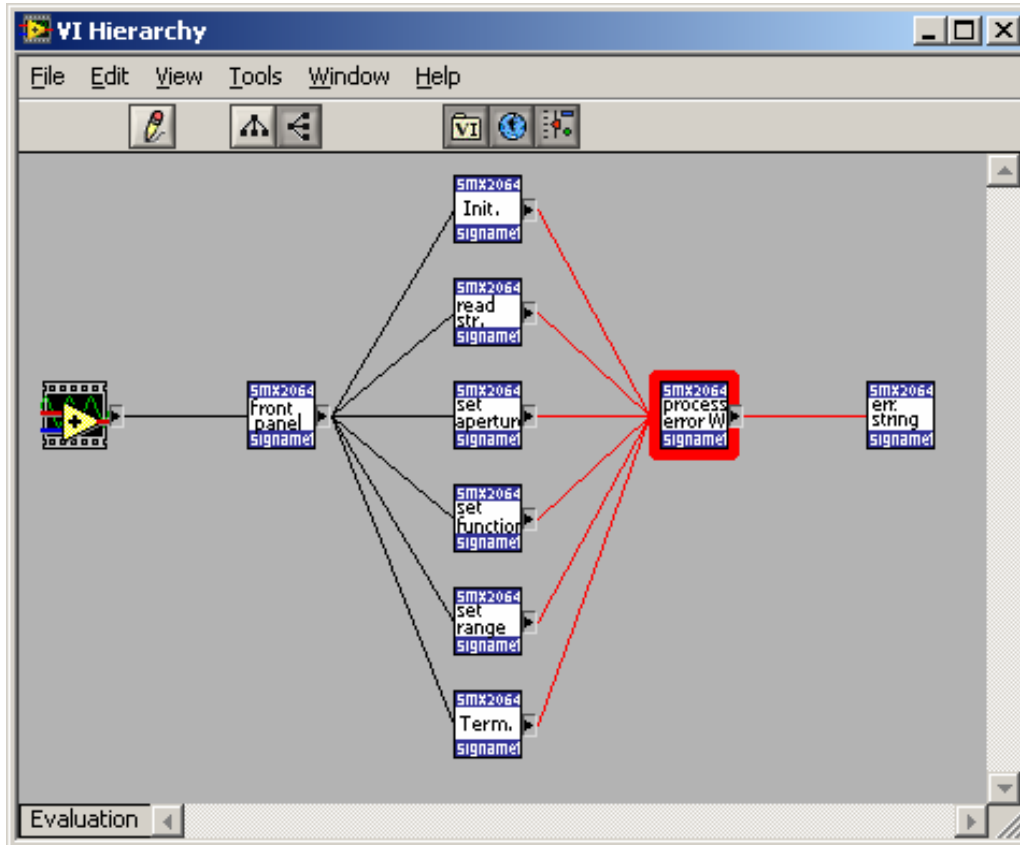
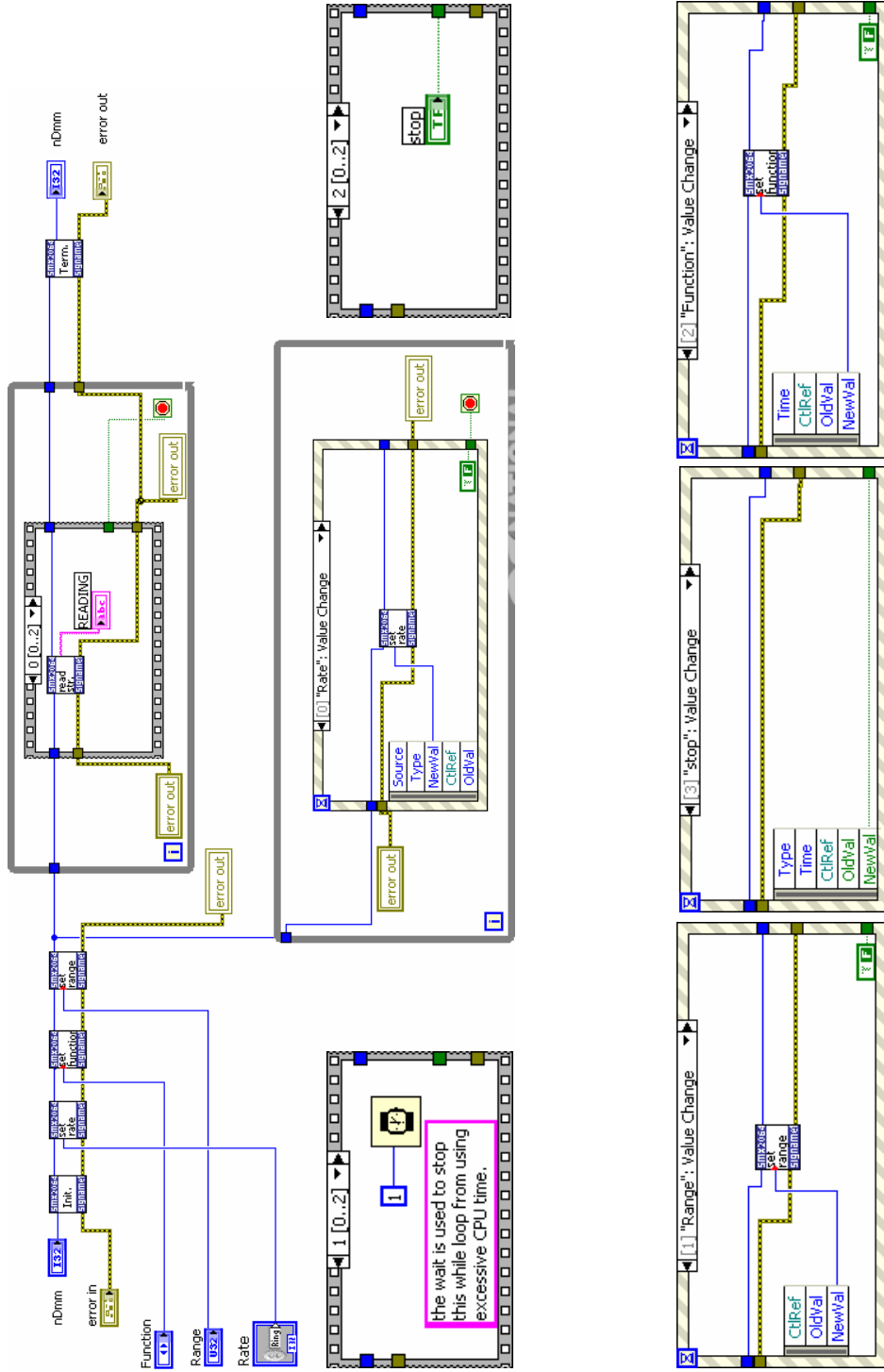


Fig. A 7.2 Ierarhizarea procesului de măsurare

Principiul de realizarea a măsurării inductanțelor bobinelor și ciclul parcurs de semnal de la placa de măsurare SMX 2064 PCI DMM până la afișarea informațiilor către utilizator se prezintă sub forma unei diagrame de reacție unde este analizat semnalul, erorile și se ia o decizie asupra valorii care se furnizează utilizatorului. Se prezintă în figura A 7.3 diagrama procesării semnalului în mediul LabView.



Anexa 8 Notații specifice în text

Nr. Crt.	Simbol	Denumire	Unitate de măsură	Relația
1	C	Capacitatea condensatorului	[F]	2.1
2	k	constanta de material a dielectricului din interiorul condensatorului	-	2.1
3	A	suprafața armăturilor	[mm ²]	2.1
4	d	distanța dintre armături	[mm]	2.1
5	ICM _{element_sesizor_activ}	intensitatea câmpului magnetic la elementul sesizor	[A/m]	2.2
6	CMA	valoarea câmpului magnetic aplicat	[A/m]	2.2
7	L _{CF}	lungimea concentratoarelor de flux	[mm]	2.2
8	d _{CF}	distanța dintre concentratoarele de flux	[mm]	2.2
9	E _{sudare_hibridă_WIG-YAG}	energia absorbită din rețea la sudarea hibridă laser-arc	[Wh]	3.1
10	E _{sudare_laser_Nd-YAG}	energia absorbită din rețea la sudarea cu laser Nd-YAG	[Wh]	3.1
11	E _{sudare_WIG}	energia absorbită din rețea la sudarea WIG	[Wh]	3.1
12	E _l	energia liniară la sudare	[Wh]	3.2
13	U _{arc}	tensiunea din coloana arcului electric	[V]	3.2
14	I _{sudare}	curentul de sudare	[A]	3.2
15	v _{sudare}	viteza de sudare	[mm/s]	3.2
16	t _{sed}	timpul de sedimentare a fazei solide	[s]	4.1
17	d	distanța	[nm]	4.1
18	g	accelerația gravitațională	[m/s ²]	4.1, 4.2
19	ξ	este coeficientul de frecare	-	4.1
20	a	raza medie a microparticulelor magnetizabile	[nm]	4.1
21	ρ _{lm}	densitatea matricei lichide	[kg/m ³]	4.1
22	ρ _s	densitatea microparticulelor	[kg/m ³]	4.1
23	c(h)	concentrația de particule la înălțimea h a coloanei de lichid	[mol/m ³]	4.2
24	c ₀	concentrația inițială de particule	[mol/m ³]	4.2
25	ρ ₀	densitatea inițială la înălțimea h a lichidului cu particule coloidale	[kg/m ³]	4.2, 4.3
26	ρ	densitatea finală la înălțimea h a lichidului cu particule coloidale	[kg/m ³]	4.2, 4.3

27	h	înălțimea lichidului cu particule coloidale	[mm]	4.2, 4.9
28	k	constanta lui Boltzman	[J/K]	4.2, 4.9
29	T	temperatura	[⁰ K]	4.2, 4.9, 4.12, 4.13
30	r	raza particulelor coloidale	[nm]	4.2, 4.6
31	v	viteza de sedimentare a particulelor	[□m/zi]	4.3, 4.6
32	η	vâscozitatea lichidului	[Ns/m ²]	4.3, 4.6, 4.7
33	r	raza particulelor	[nm]	4.3
34	δ	grosimea stratului stabilizant	[nm]	4.3
35	H	vectorul câmp magnetic	[A/m]	4.4
36	F	forța de translație	[N]	4.4
37	m	vectorul moment magnetic	[J/T]	4.4
38	F _c	forța de frecare	[N]	4.6
39	M	magnetizația particulei	[T]	4.7
40	d	diametrul particulei	[nm]	4.7
41	ρ _{im}	densitatea lichidului magnetic	[kg/m ³]	4.8
42	ρ ₀	densitatea fazei	[kg/m ³]	4.8
43	ρ _m	densitatea materialului magnetic	[kg/m ³]	4.8
44	ρ _{ta}	densitatea substanței tensioactive	[kg/m ³]	4.8
45	Φ ₀	concentrațiile în volum ale fazei lichide	-	4.8
46	Φ	concentrațiile în volum ale fazei solide	-	4.8
47	E _{str}	tensiune de străpungere	[V/m]	4.10
48	B	inducția magnetică	[T]	4.11, 4.56
49	c _p	căldura specifică	[J/kgK]	4.12, 4.14
50	c _{p0}	căldura specifică a bazei	[J/kgK]	4.12
51	Φ _{Fe(CO)₅}	fluxul carbonilului	-	4.15
52	Φ _{purtător}	fluxul purtător	-	4.15
53	p _{Fe(CO)₅}	presiunea carbonilului la temperatura camerei	[Pa]	4.15
54	p	presiunea din vas	[Pa]	4.15
55	ρ	densitatea plasmei	[kg/m ³]	4.16, 4.26, 4.41, 4.42
56	v	viteza plasmei	[m/s]	4.16
57	η	vâscozitatea plasmei	[Ns/m ²]	4.16, 4.38
58	p	presiunea gazocinetică a plasmei	[Pa]	4.16
59	v _r	viteza radială a jetului de plasmă	[m/s]	4.17, 4.20, 4.28
60	v _θ	viteza unghiulară a jetului de plasmă	[m/s]	4.18, 4.21
61	R	raza coloanei de plasmă	[mm]	4.30, 4.40
62	r	distanța față de axa coloanei de plasmă	[mm]	4.30

63	μ_0	permeabilitatea magnetică a vidului	[H/m]	4.30, 4.57
64	I	Intensitatea curentului electric	[A]	4.30
65	n	presiunea pe secțiunea transversală a coloanei de plasmă	[Pa]	4.30
66	F	forța pe secțiunea transversală a coloanei de plasmă	[N]	4.31
67	v	viteza axială a jetului de plasmă	[m/s]	4.32
68	r	distanța măsurată pe axa jetului de la punctul de generare a plasmei	[mm]	4.32
69	ρ_w	densitatea coloanei de apă	[kg/m ³]	4.33
70	h	denivelarea coloanei de apă	[m/s]	4.33
71	v_j	viteza jetului de plasmă	[m/s]	4.35, 4.42, 4.45
72	Q	puterea sursei transferată plasmei	[W]	4.37
73	C_p	căldura specifică a plasmei de argon	[J/kg·K]	4.37
74	P_r	numărul lui Prandtl	-	4.37, 4.38
75	χ	conductibilitatea termică a plasmei	J/s·m·K	4.38
76	T_0	temperatura calculată a jetului de plasmă	[K]	4.39
77	T	distribuția temperaturii pe secțiunea transversală a jetului de plasmă	[K]	4.40
78	T_m	temperatura inițială a argonului	[K]	4.40
79	σ	tensiunea superficială a topiturii de fier	[N/m]	4.41, 4.42, 4.45
80	d_p	diametrul picăturii	[m]	4.41
81	d_{max}	diametrul maxim picăturii	[mm]	4.42, 4.43
82	n_p	numărul de picături generate pe unitate de timp	[m/s]	4.43
83	ρ_m	densitatea metalului piesei	[kg/m ³]	4.43
84	ρ_p	densitatea metalului picăturii	[kg/m ³]	4.43
85	v_t	viteza cu care avansează piesa supusă topirii	[m/s]	4.43
86	η	vâscozitatea metalului picăturii	[Ns/m ²]	4.45
87	β	raportul dintre produsul vâscozității metalului picăturii și viteza cu care evoluează jetul de plasmă și tensiunea superficială a metalului picăturii	-	4.46
88				
89	T	temperatura vaporilor	[K]	4.47
90	$T_{metal\ lichid}$	temperatura metalului lichid	[K]	4.47
91	T_1	temperatura punctului de rouă	[K]	4.48
92	d_e	diametrul membranei	[mm]	4.48

93	Q_t	căldura necesară topirii sârmei și detașării picăturii	[W]	4.49
94	Q_J	căldura degajată prin efect Joule	[W]	4.49
95	Q_{pot}	căldura degajată datorită existenței diferenței de potențial electric	[W]	4.49
96	Q_{rad}	căldura transferată de la arcul de plasmă la sârmă, prin radiație	[W]	4.49
97	Q_{p-rad}	căldura pierdută prin radiație	[W]	4.49
98	Q_{p-pic}	căldura pierdută prin picăturile de metal lichid emise	[W]	4.49
99	H_t	entalpia totală necesară topirii sârmei și detașării picăturii	[J/mm ³]	4.50
100	U	potențialul constant de la capătul sârmei care produce încălzirea	[V]	4.50
101	H_J	entalpia produsă de încălzirea prin efect Joule	[J/mm ³]	4.50
102	j	densitatea de curent pe secțiunea sârmei	[A/mm ²]	4.50, 4.56
103	v_t	viteza de topire egală cu viteza de avans al sârmei	[mm/s]	4.50
104	Q_{rad}	căldura primită prin radiație de la arcul de plasmă	[J]	4.50
105	V_{rad}	volumul capătului sârmei încălzit prin radiație	[mm ³]	4.50
106	Q_{p-rad}	căldura pierdută prin radiație în atmosferă	[J]	4.50
107	Q_{p-pic}	căldura pierdută prin emiterea de picături de metal topit	[J]	4.50
108	V_{pic}	volumul picăturii emise	[mm ³]	4.50
109	R	rezistența electrică a sârmei supusă topirii	[Ω]	4.51, 4.53, 4.54, 4.55
110	I	curentul prin arcul de plasmă	[A]	4.51, 4.53, 4.54, 4.55
111	t	durata trecerii curentului prin sârma supusă topirii	[s]	4.51, 4.53, 4.54, 4.55
112	d_s	diametrul sârmei supusă topirii	[mm]	4.51, 4.53, 4.54, 4.55
113	$l_{cap-liber}$	lungimea porțiunii de sârmă cuprinsă între punctul de contact electric și capătul supus încălzirii	[mm]	4.51, 4.53, 4.54, 4.55
114	l_{rad}	lungimea porțiunii de sârmă încălzită prin radiație de la arcul de plasmă	[mm]	4.51, 4.53, 4.54, 4.55
115	F_{em}	forță electromagnetică	[N]	4.56
116	p	Presiune creată de forța	[N/mm ²]	4.57

		electromagnetică		
117	p_0	presiunea atmosferică	[N/mm ²]	4.57
118	γ	tensiunea superficială a fluidului	[N/mm]	4.57
119	R	raza conductorului fluid	[mm]	4.57
120	r	distanța de la axa de simetrie a cilindrului de fluid la un punct din secțiunea transversală a acestuia	[mm]	4.57

**Titluri recent publicate în colecția „TEZE DE DOCTORAT”
seria 8: Inginerie Industrială**

- 1. Liliana Daniela Moșteoru** – *Contribuții la îmbunătățirea performanțelor termice și la ecologizarea aparatelor de sterilizare a instrumentelor medicale*, ISBN 978-973-625-441-3, (2007);
 - 2. Mariana Ilie** – *Etude de l'interaction laser matière dans le cas des polymères semi-transparents: applications au soudage des polymères*, ISBN 978-973-625-449-9, (2007);
 - 3. Puiu Căneparu** – *Contribuții privind îmbunătățirea performanțelor echipamentelor mecanizate de tăiere termică*, ISBN 978-973-625-478-9, (2007);
 - 4. Marius Cătălin Grănescu** – *Aspecte privind strategii de dezvoltare specifice întreprinderilor mici și mijlocii în vederea alinierii la cerințele Uniunii Europene*, ISBN 978-973-625-486-4, (2007);
 - 5. Corina-Dana June** – *Optimizarea procesului de încărcare prin sudare în mediu de gaz protector cu rată mare de depunere – încărcarea prin sudare mag cu electrod bandă*, ISBN 978-973-625-501-4, (2007);
 - 6. Gheorghe Marcel Mocuța** – *Contribuții la reducerea intensității energetice în județul Bihor*, ISBN 978-973-625-517-5, (2007);
 - 7. Marius Iulian Tamas** – *Studiul măririi capacităților de producție ale mașinilor de prototipare rapidă prin prelevare de material*, ISBN 978-973-625-611-0, (2008);
 - 8. Cristian Cosma** – *Studii privind optimizarea tehnicii de Reverse Engineering la realizarea produselor injectate din materiale plastice*, ISBN 978-973-625-612-7, (2008).
 - 9. Cristian Dan Duran** – *Aspecte privind evaluarea riscului ca sursă a deciziei la nivelul firmei*, ISBN 978-973-625-554-0, (2008);
 - 10. Laurențiu Călin** – *Contribuții la optimizarea sistemelor tehnologice de uscare a produselor cerealiere*, ISBN 978-973-625-534-2, (2008).
-



EDITURA POLITEHNICA