

CONTRIBUȚII LA DEZVOLTAREA UNOR METODE VIBROACUSTICE PENTRU DETERMINAREA UNOR CARACTERISTICI MECANICE ALE STRUCTURILOR SUDATE DIN TABLE SUBȚIRI

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

Ing. Tiberiu Adrian Medgyesi

Conducător științific: Prof.univ.dr.ing. Liviu Bereteu
Referenți științifici: Prof.univ.dr. ing. Ioan Bica
Prof.univ.dr.ing. Gheorghe Drăgănescu
Conf.univ.dr.ing. Tiberiu Vesselenyi

Ziua susținerii tezei: 25.07.2014

Seriile Teze de doctorat ale UPT sunt:

- | | |
|---------------------------------------------|--------------------------------------------|
| 1. Automatică | 9. Inginerie Mecanică |
| 2. Chimie | 10. Știința Calculatoarelor |
| 3. Energetică | 11. Știința și Ingineria Materialelor |
| 4. Ingineria Chimică | 12. Ingineria sistemelor |
| 5. Inginerie Civilă | 13. Inginerie energetică |
| 6. Inginerie Electrică | 14. Calculatoare și tehnologia informației |
| 7. Inginerie Electronică și Telecomunicații | 15. Ingineria materialelor |
| 8. Inginerie Industrială | 16. Inginerie și Management |

Universitatea *Politehnica* 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, 2014

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* 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

Prezentul studiu, realizat în vederea susținerii tezei de doctorat în inginerie mecanică, reprezintă rezultatul cercetărilor și preocupărilor mele în domeniul mecanicii experimentale, cu aplicații directe în domeniul industrial, cu orientare în mod special spre structurile îmbinate din table subțiri. Prin urmare, lucrarea reprezintă o abordare interdisciplinară legată de o problemă, mereu actuală, privind cunoașterea caracteristicilor mecanice ale unor noi structuri sau ale unor noi materiale. Ea reprezintă, totodată, încununarea unei activități desfășurate pe parcursul a trei ani și jumătate în cadrul activității doctorale, finanțată parțial din grantul strategic POSDRU/CPP107/DMI1.5/S/77265 (2010).

Tematica abordată în teză este reprezentată de determinarea caracteristicilor mecanice legate de proprietățile elastice ale materialelor, în special ale oțelurilor îmbinate prin sudare, lipire sau acoperiri metalice. Toate aceste caracteristici sunt cunoscute sub denumirea generică de moduli de elasticitate. Abordarea acestei tematici este una relativ nouă și foarte actuală în cercetările din întreaga lume, bazându-se pe analiza semnalelor de vibrații, semnale ale căror frecvențe depind de aceste caracteristici. Un alt aspect care s-a avut în vedere, atât datorită metodelor prin care s-au realizat unele probe (acoperire metalică), dar mai ales datorită posibilităților oferite de analiza semnalelor de vibrații, a fost cel de determinare a caracteristicilor mecanice ale unor materiale noi, folosite în acoperirea prin metalizare a unor suprafețe.

Pentru părerile sale critice și constructive pe care mi le-a oferit în toți acești ani, pentru sfaturile și îndrumările pe care mi le-a dat, pentru faptul că a acceptat și a condus științific cercetarea doctorală, mulțumirile mele se îndreaptă în primul rând către conducătorul științific al acestei teze, domnul Prof.univ.dr.ing. Liviu Bereteu. De asemenea doresc să adresez mulțumiri domnului profesor Drăgănescu Gheorghe pentru ideile utile pe care mi le-a împărtășit și care m-au ajutat în finalizarea acestei teze, precum și domnișoarei dr.ing. Popescu Mihaela, respectiv domnului dr.ing. Burcă Mircea pentru sprijinul oferit în realizarea probelor.

Mulțumiri se cuvin tuturor profesorilor care au avut un rol esențial în formarea mea, în primul rând ca om, și apoi ca cercetător, în special celor din fosta Catedră de Mecanică și Vibrații din cadrul Departamentului de Mecanică și Rezistența Materialelor și colectivelor Laboratoarelor de Sudură din cadrul Departamentului de Ingineria Materialelor și Fabricației.

În încheiere, dar nu în ultimul rând, doresc să mulțumesc familiei și colegilor pentru sprijin și înțelegere, care în mod indirect m-au ajutat la finalizarea acestei teze.

Timișoara, 25.07.2014

ing. Tiberiu Adrian Medgyesi

MEDGYESI, TIBERIU ADRIAN

Contribuții la dezvoltarea unor metode vibroacustice pentru determinarea unor caracteristici mecanice ale structurilor sudate din table subțiri

Teze de doctorat ale UPT, Seria 9, Nr.154 , Editura Politehnica, 2014, 198 pagini, 107 figuri, 57 tabele.

ISSN:1842-4937

ISBN:978-606-554-855-8

Cuvinte cheie: îmbinări table subțiri, caracteristici mecanice, teste de vibrații

Rezumat:

Teza de doctorat urmărește dezvoltarea unor metode nedistructive, din categoria metodelor vibroacustice, pentru determinarea caracteristicilor de material legate de comportarea elastică a structurilor metalice și în mod special a celor realizate din table subțiri. Pe parcursul lucrării s-au făcut dezvoltări teoretice, investigații numerice și măsurători experimentale, având ca scop determinarea modurilor de elasticitate ai structurilor din table subțiri, obținute prin sudare, sudobrazare, lipire sau acoperiri de suprafețe. Prin moduli de elasticitate se înțelege: modulul de elasticitate longitudinal(modulul lui Young), modulul de elasticitate transversal și coeficientul lui Poisson. Cunoașterea modulului de elasticitate longitudinal și a modulului de elasticitate transversal este necesară în calculul de dimensionare a unei structuri mecanice, pe de o parte, iar pe de altă parte, cele două caracteristici mecanice constituie mărimi de bază ce caracterizează comportarea dinamică a structurii. De fapt, chiar această comportare dinamică, prin răspunsul pe care îl dă o structură, la o excitație impulsivă, este utilizată ca metodă pentru determinarea caracteristicilor amintite. Semnalele de vibrații sunt înregistrate prin intermediul unui microfon condensator și/sau prin intermediul unui vibrometru laser de tip Ometron. Metoda propusă permite determinarea acestor caracteristici mecanice din analiza unui singur semnal. O altă metodă propusă permite determinarea caracteristicilor mecanice ale unui material de acoperire.

CUPRINS

LISTA DE FIGURI	7
LISTA DE TABELE	11
1 INTRODUCERE.....	20
1.1 Materiale și proprietăți ale acestora.....	20
1.2 Aspecte generale asupra structurii tezei	23
1.3 Actualitatea temei.....	25
1.4 Obiectivele propuse în prezentul studiu	26
2. METODE ȘI PROCEDEE PENTRU ACOPERIREA ȘI ÎMBINAREA TABLELOR SUBȚIRI..	29
2.1 Procedee de acoperire a tablelor subțiri	29
2.1.1 Procedeele de acoperire prin imersare în metal topit.....	30
2.1.4 Procedeele de acoperire prin galvanizare.....	32
2.1.9 Procedeele de acoperire prin metalizare	36
2.2 Procedee de lipire a tablelor subțiri	38
2.3 Procedee de sudare utilizate la îmbinarea tablelor subțiri	39
2.3.1 Sudarea manuală cu electrozi înveliți	40
2.3.2 Sudarea în mediu de gaz protector cu electrod fuzibil, MIG/MAG	40
2.3.5 Sudarea în mediu de gaz protector cu electrod nefuzibil, WIG/TIG ..	46
2.3.6 Sudarea electrică prin presiune în linie	48
2.3.7 Sudarea CMT a tablelor subțiri	50
2.3.8 Sudobrazarea tablelor subțiri	55
3 ELEMENTE DE TEORIA ELASTICITĂȚII ȘI TEORIA VIBRAȚIILOR MEDIILOR	
CONTINUE	59
3.1 Caracteristici mecanice la încercări monoaxiale.....	60
3.1.1 Încercarea la tracțiune monoaxială	61
3.1.2 Încercarea la forfecare	63
3.2 Elemente de vibrații mecanice	64
3.2.2 Vibrațiile de încovoiere ale unei bare	69
3.2.2.1 Deducerea ecuației vibrațiilor de încovoiere	69
3.2.2.2 Vibrațiile libere de încovoiere ale unei bare.....	71
4 ELEMENTE DE ANALIZA SEMNALELOR.....	75
4.1 Tipuri de semnale	75
4.1.1 Semnale continue în timp continuu	76
4.1.2 Semnale continue în timp discret.....	77
4.1.3 Semnale discrete în timp continuu	77
4.1.4 Semnale discrete în timp discret.....	78
4.2 Metode de analiză a semnalelor	79
4.2.1 Analiza spectrală a semnalelor periodice.....	79
4.2.2 Analiza spectrală a semnalele neperiodice	84
4.2.3 Analiza spectrală a semnalele discrete.....	86
4.2.4 Metoda seriilor Prony	88
4.2.5 Efectul Doppler	90
5 ACHIZIȚIA SEMNALELOR.....	93
5.1 Generalități despre achiziția de semnale	93
5.2 Tipuri de traductori	94
6 REALIZAREA PROBELOR ȘI ANALIZA NUMERICĂ A COMPORTĂRII DINAMICE....	105
6.1 Realizarea probelor	106
6.1.1 Realizarea probelor din tablă decapată din oțel S 235 JR	106
6.1.2 Realizarea probelor din oțel inoxidabil	107

6 Cuprins

6.1.3	Realizarea probelor din aluminiu.....	108
6.1.4	Realizarea probelor din tablă zincată.....	108
6.2	Modelarea cu Elemente Finite și Analiza Modală.....	108
6.2.1	Descrierea modelului numeric. Analiza cu Elemente Finite.	109
6.3	Rezultate numerice ale modelării cu elemente finite și analizei modale.....	112
6.3.3	Rezultatele AM pentru tablele din oțel inoxidabil EN X5 CrNi 18-10	117
6.3.4	Rezultatele AM pentru tablele din aluminiu laminat la rece.....	119
6.3.6.	Discuții și concluzii preliminare.....	123
7	TEHNICI EXPERIMENTALE ȘI REZULTATE EXPERIMENTALE.....	125
7.1	Investigarea vibroacustică a structurilor mecanice.....	125
7.2	Rezultate experimentale obținute prin măsurători vibroacustice.....	127
7.2.1	Determinarea caracteristicilor mecanice ale tablelor din oțel de uz general S 235 JR sudate transversal. Rezultate obținute.....	127
7.2.2	Determinarea caracteristicilor mecanice ale tablelor din oțel inoxidabil EN X5 Cr Ni 18-10, sudate transversal. Rezultate obținute.....	129
7.2.3	Determinarea caracteristicilor mecanice ale tablelor din aluminiu laminat, sudate transversal. Rezultate obținute.....	131
7.2.4	Modificarea caracteristicilor mecanice ale tablelor din oțel de uz general S 235 JR, prin zincare.....	132
7.2.5.	Determinarea caracteristicilor mecanice ale stratului de oxid de Zn folosit la acoperirea tablelor din oțel de uz general.....	133
7.3	Stand experimental pentru măsurători cu vibrometrul laser.....	134
7.4	Rezultate experimentale obținute prin măsurători cu vibrometrul laser.....	137
7.4.1	Determinarea caracteristicilor mecanice ale tablelor din oțel S 235 JR, sudate transversal. Rezultate obținute.....	137
7.4.4	Determinarea caracteristicilor mecanice ale tablelor din oțel inoxidabil sudate transversal. Rezultate obținute.....	138
7.4.5	Determinarea caracteristicilor mecanice ale tablelor aluminiu îmbinate prin sudare. Rezultate obținute.....	139
8	DISEMINAREA REZULTATELOR, CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII.....	142
8.1	Diseminarea rezultatelor analizei numerice.....	142
8.2	Diseminarea rezultatelor investigațiilor experimentale.....	142
8.3	Concluzii finale.....	151
8.4	Principalele contribuții personale.....	153
	BIBLIOGRAFIE.....	156
ANEXA 1	.....	163
ANEXA 2	.....	167
ANEXA 3	.....	168
ANEXA 4	.....	172
ANEXA 5	.....	173
ANEXA 6	.....	175
ANEXA 7	.....	178
ANEXA 8	.....	179
ANEXA 9	.....	180
ANEXA 10	.....	182
ANEXA 11	.....	184
ANEXA 12	.....	187
ANEXA 13	.....	188
ANEXA 14	.....	192

LISTA DE FIGURI

Figură	Denumire figură	Pag.
2.1	Tipuri de rosturi utilizate la sudarea tablelor subțiri cu electrozi înveliți	40
a	sudură cap la cap în I	40
b	sudură cap la cap pe suport de oțel	40
c	sudură în colț	40
d	sudură în colț prin suprapunere	40
2.2	Schema de principiu a procedurii de sudare MIG/MAG	41
2.3	Zona de lucru a arcului electric la procedurii MIG/MAG	42
2.4	Tipuri de rosturi utilizate la sudarea tablelor subțiri în mediu de gaz protector cu electrod fuzibil, MIG/MAG	43
a	sudură cap la cap în I	43
b	sudură în colț	43
c	sudură în colț pe muchie	43
d	sudură în colț prin suprapunere	43
e	sudură în colț în T	43
f	sudură frontal	43
2.5	Schema unei surse de c.c. cu reglare în trepte pentru sudarea MIG/MAG	44
2.6	Sudarea MIG/MAG în impulsuri	45
a	principiul procedurii de sudare în curent continuu pulsator	45
b	parametrii curentului pulsator	45
2.7	Procesul de sudare WIG/TIG în mediu de gaz protector	46
2.8	Tipuri de rosturi la sudarea WIG a tablelor subțiri	47
a	sudură cap la cap în I fără rost	47
b	sudură cap la cap în I cu rost	47
2.9	Sudarea prin presiune în linie a tablelor subțiri	49
2.10	Principiul procesului de sudare CMT și fazele unui ciclu	51
2.11	Variația tensiunii și curentului în procesul de sudare CMT	52
2.12	Sistem robotizat de sudare prin procedurii CMT	53
2.13	Polaritatea electrodului la trecerea prin perioada de scurt-circuit	53
2.14	Graficele variației de curent, tensiune și vitezei sârmei electrod în procedurii de sudare CMT-Avansat	54
3.1	Diagrama de încercare la tracțiune	61
3.2	Curba caracteristică pentru materiale electrotehnice	63
3.3	Solicitarea de forfecare	64
3.4	Modelul fizic al vibrațiilor de răsucire ale unei bare	65
3.5	Modelul fizic al vibrațiilor de încovoiere ale unei bare	70
4.1	Exemplu de semnal continuu în timp continuu	76
4.2	Exemplu de semnal continuu în timp discret	77
4.3	Exemplu de semnal discret în timp continuu	78
4.4	Exemplu de semnal discret în timp discret	78
4.5	Spectrul de amplitudine și spectrul de fază pentru un semnal armonic	81

8 Lista de figuri

4.6	Spectrul amplitudinilor	81
4.7	Spectrul fazelor	81
4.8	Spectrul de amplitudine al unui semnal $x(t)$ prin SFC	83
4.9	Spectrul de amplitudine al aceluiași semnal $x(t)$ prin SFA	83
4.10	Semnal periodic obținut din semnal neperiodic	85
4.11	Exemplificarea fenomenului Doppler	91
5.1	Schema generală a unui sistem de măsurare, achiziție și prelucrare de date	94
5.2	Elemente constructive ale unui traductor electro-tensometric rezistiv, TER, cu fir rezistiv	96
5.3	Punte completă Wheatstone	98
5.4	Exemplu de traductori inductivi de deplasare	99
5.5	Circuitul echivalent al unui traductor piezoelectric	100
5.6	Schema de funcționare a microfonului cu condensator	102
5.7	Exemplu de curbă de răspuns în frecvență	103
6.1	Sudarea probelor din S 235 JR	106
a	pregătirea probei	106
b	proba realizată	106
6.2	Sudarea probelor din oțel inoxidabil	107
a	pregătirea probei	107
b	proba realizată	107
6.3	Ansamblul de plăci sudate transversal	109
a	modelul fizic	109
b	modelul numeric	109
7.1	Stand experimental pentru măsurători vibroacustice ale structurilor mecanice suspendate elastic	126
7.2	Stand experimental pentru măsurători vibroacustice ale unor probe încastrate la un capăt	126
7.3	Semnalul înregistrat de la proba nr.4 din oțel S 235 JR	127
7.4	Spectrul Fourier a semnalului obținut de la proba din oțel S 235 JR	128
7.5	Spectrul Fourier a semnalului de la proba din oțel INOX de 1.2mm	130
7.6	Semnalul înregistrat de la proba 1 din aluminiu	131
7.7	Spectrul Fourier a semnalului de la proba din aluminiu 1.5mm	132
7.8	Probă din S 235 JR după acoperire prin pulverizare metalică	133
7.9	Stand experimental pentru măsurători cu vibrometrul laser ale probelor suspendate elastic	134
7.10	Stand experimental pentru măsurători cu vibrometrul laser ale probelor încastrate	135
7.11	Velocimetrul Doppler Laser	136
7.12	Spectrul Fourier a semnalului de la proba din oțel S235 JR, 1mm	138
7.13	Spectrul Fourier a semnalului de la proba din oțel INOX de 0,8mm	139
7.14	Semnalul înregistrat de la proba din aluminiu, 3mm, laser	140
7.15	Spectrul Fourier a semnalului de la proba din aluminiu 1,5mm	141
8.1	Modulul de elasticitate E pentru primele 5 moduri de încovoiere	144

8.2	Abaterile valorilor experimentale ale modulului de elasticitate E pentru proba 1 din oțel S 235 JR	144
8.3	Modulul de elasticitate E pentru primele 4 moduri de încovoiere	145
8.4	Abaterile valorilor experimentale ale modulului de elasticitate E pentru proba 4 din oțel S235 JR	145
8.5	Modulul de elasticitate E pentru primele 4 moduri de încovoiere	146
8.6	Abaterile valorilor experimentale ale modulului de elasticitate E pentru oțel inoxidabil EN-X5CrNi 18-20 cu grosimea de 0.8 mm	146
8.7	Modulul de elasticitate E pentru primele 4 moduri de încovoiere	147
8.8	Abaterile valorilor experimentale ale modulului de elasticitate E pentru proba din aluminiu de 1,5 mm grosime	147
8.9	Modulul de elasticitate G pentru primele 4 moduri de torsiune	148
8.10	Abaterile valorilor experimentale ale modulului de elasticitate G pentru proba 1, S 235 JR de 0,8 mm grosime	148
8.11	Modulul de elasticitate G pentru primele 4 moduri de torsiune, inox	149
8.12	Abaterile valorilor experimentale ale modulului de elasticitate G pentru proba 1, inox, EN-X5CrNi 18-10 de 0,8 mm grosime	149
8.13	Modulul de elasticitate G pentru primele 4 moduri de torsiune, aluminiu	150
8.14	Abaterile valorilor experimentale ale modulului de elasticitate G pentru proba 1, aluminiu de 1,5 mm grosime	150
A 5.1	Spectrul Fourier, proba oțel S235JR, 0,8 mm grosime	173
A 5.2	Spectrul Fourier, oțel S235JR	173
A 5.3	Spectrul Fourier pentru proba oțel S 235 JR, 1,5 mm	174
A 6.1	Spectrul Fourier pentru proba inox, 0,8 mm	175
A 6.2	Spectrul Fourier pentru proba inox, 1,2 mm	175
A 6.3	Spectrul Fourier pentru proba inox, 1 mm	176
A 6.4	Spectrul Fourier pentru proba inox, 2 mm	176
A 6.5	Spectrul Fourier pentru proba inox, 3 mm	177
A7.1	Spectrul Fourier pentru proba de aluminiu de 3 mm	178
A7.2	Spectrul Fourier pentru proba de aluminiu de 3 mm	178
A10.1	Spectrul Fourier pentru proba din oțel S235JR de 0,8mm	182
A10.2	Spectrul Fourier pentru proba din S235JR de 1 mm	182
A10.3	Spectrul Fourier pentru proba din S235JR de 1,5 mm	183
A10.4	Spectrul Fourier pentru proba din S235JR de 1,5 mm	183
A11.1	Spectrul Fourier pentru proba din INOX de 0,8 mm	184
A11.2	Spectrul Fourier pentru proba din INOX de 1 mm	184
A11.3	Spectrul Fourier pentru proba din INOX de 1,2 mm	185
A11.4	Spectrul Fourier pentru proba din INOX de 2 mm	185
A11.5	Spectrul Fourier pentru proba din INOX de 1,2 mm	186
A12.1	Spectrul Fourier pentru proba din aluminiu 3 mm	187
A12.2	Spectrul Fourier pentru proba din aluminiu de 3 mm	187
A13.1	Modulul de elasticitate E pentru primele 5 moduri de încovoiere, pentru proba 2, oțel S 235 JR 1 mm grosime	188
A13.2	Abaterile valorilor experimentale ale modulului de elasticitate E pentru proba 2, oțel S 235 JR 1 mm grosime	188

10 Lista de figuri

A13.3	Modulul de elasticitate E pentru primele 4 moduri de încovoiere, pentru proba 2, din oțel inoxidabil EN-X5CrNi 18-10 de 1 mm grosime	189
A13.4	Abaterile valorilor experimentale ale modulului de elasticitate E pentru proba 2, din oțel inoxidabil EN-X5CrNi 18-10 de 1 mm grosime	189
A13.5	Modulul de elasticitate E pentru primele 4 moduri de încovoiere, pentru proba 4, din oțel inoxidabil EN-X5CrNi 18-10 de 2 mm grosime	190
A13.6	Abaterile valorilor experimentale ale modulului de elasticitate E pentru proba 4, din oțel inoxidabil EN-X5CrNi 18-10 de 2 mm grosime	190
A13.7	Modulul de elasticitate E pentru primele 4 moduri de încovoiere, pentru proba 2, din aluminiu 3 mm grosime	191
A13.8	Abaterile valorilor experimentale ale modulului de elasticitate E pentru proba 2, din aluminiu 3 mm grosime	191
A14.1	Modulul de elasticitate G pentru primele 4 moduri de încovoiere, pentru proba 2, oțel S 235 JR 1 mm grosime	192
A14.2	Abaterile valorilor experimentale ale modulului de elasticitate G pentru proba 2, oțel S 235 JR 1 mm grosime	192
A14.3	Modulul de elasticitate G pentru primele 4 moduri de încovoiere	193
A14.4	Abaterile valorilor experimentale ale modulului de elasticitate G pentru proba 4, oțel S 235 JR de 2,5 mm grosime	193
A14.5	Modulul de elasticitate G pentru primele 4 moduri de încovoiere ,proba 2, inox, EN-X5CrNi 18-10 de 1 mm grosime	194
A14.6	Abaterile valorilor experimentale ale modulului de elasticitate G pentru proba 2, inox, EN-X5CrNi 18-10 de 1 mm grosime	194
A14.7	Modulul de elasticitate G pentru primele 4 moduri de încovoiere pentru proba 5, inox, EN-X5CrNi 18-10 de 3 mm grosime	195
A14.8	Abaterile valorilor experimentale ale modulului de elasticitate G pentru proba 5, inox, EN-X5CrNi 18-10 de 3 mm grosime	195
A14.9	Modulul de elasticitate G pentru primele 4 moduri de încovoiere	196
A14.10	Abaterile valorilor experimentale ale modulului de elasticitate G pentru proba 2, din aluminiu, 3 mm grosime	196

LISTA DE TABELE

Tabel	Denumire	Pag.
2.1	Indicele de adâncime pentru coroziune a straturilor depuse prin imersare în metal topit	30
2.2	Proprietăți modificate prin acoperiri cu straturi galvanice	33
2.3	Parametrii procesului de zincare electrolitică	33
2.4	Parametrii procesului de cromare electrolitică	34
2.5	Principalii parametri ai procesului de cuprare electrolitică	35
2.6	Parametrii principali ai procesului de nichelare electrolitică	36
2.7	Aderența stratului depus prin metalizare	37
2.8	Aliaje de lipit și compozițiile acestora	39
2.9	Curentul de sudare și tensiunea arcului în funcție de diametrul sârmei de electrod la sudarea MAG	43
2.10	Domeniile de variație ale parametrilor curentului continuu pulsatoriu	46
2.11	Parametrii de sudare pentru sudarea tablelor subțiri prin procedeul WIG/TIG	48
2.12	Parametrii de sudare recomandați pentru sudarea în linie a tablelor subțiri din oțeluri nealiat și slab aliate	50
2.13	Comparație între lipire, brazare și sudare	57
3.1	Condițiile de frontieră și pulsațiile proprii pentru cele mai frecvente legături	67
3.2	Ecuțiile caracteristice și primele cinci rădăcini ale acestora pentru cele mai frecvente legături ale unei bare	72
6.1	Parametrii de sudare WIG pentru sudarea tablelor subțiri din oțel S 235 JR	107
6.2	Parametrii de sudare WIG pentru sudarea tablelor subțiri din oțel INOX	107
6.3	Parametrii de sudare WIG utilizați pentru sudarea tablelor de aluminiu	108
6.4	Dimensiunile probelor din oțel de uz general S 235 JR analizate prin programul ANSYS	112
6.5	Primele 9 moduri naturale și frecvențele corespunzătoare pentru proba din oțel de uz general S 235 JR având grosimea de 0,8 mm	113
6.6	Primele 20 de moduri naturale și frecvențele corespunzătoare pentru proba din oțel de uz general S 235 JR având grosimea de 2,5 mm	114
6.7	Dimensiunile probelor din oțel inoxidabil EN X5 CrNi 18-10 analizate prin programul ANSYS	117
6.8	Primele 20 de moduri naturale și frecvențele corespunzătoare pentru proba din oțel inoxidabil EN X5 CrNi 18-10, având grosimea de 0.8 mm	117
6.9	Dimensiunile probelor din aluminiu laminat analizate prin programul ANSYS	120
6.10	Primele 14 moduri naturale și frecvențele corespunzătoare	120

12 Lista de tabele

6.11	pentru proba din tablă de aluminiu laminat de grosime 1,5 mm Dimensiunile probelor din oțel S 235 JR, acoperite prin zincare sau cu pulberi metalice, analizate prin programul ANSYS	121
6.12	Primele 3 moduri naturale și frecvențele corespunzătoare pentru proba 1 din Tabelul 6.11, înainte de zincare	122
6.13	Primele 3 moduri naturale și frecvențele corespunzătoare pentru proba 1 din Tabelul 6.11, după zincare	122
6.14	Primele 3 moduri naturale și frecvențele corespunzătoare pentru proba 2 din Tabelul 6.11, înainte de pulverizare metalică	122
6.15	Primele 3 moduri naturale și frecvențele corespunzătoare pentru proba 1 din Tabelul 6.11, după pulverizare metalică	123
7.1	Rezultatele experimentale ale determinării modulului de elasticitate longitudinal pentru table sudate din oțel S 235 JR	129
7.2	Rezultatele experimentale ale determinării modulului de elasticitate transversal pentru table sudate din oțel S 235 JR	129
7.3	Rezultatele experimentale ale determinării modulului de elasticitate longitudinal pentru table sudate din oțel inoxidabil	130
7.4	Rezultatele experimentale ale determinării modulului de elasticitate transversal pentru table sudate din oțel inoxidabil	130
7.5	Rezultatele experimentale ale determinării modulului de elasticitate longitudinal pentru table sudate din aluminiu	131
7.6	Rezultatele experimentale ale determinării modulului de elasticitate transversal pentru table sudate din aluminiu	132
7.7	Rezultatele experimentale ale determinării modulului de elasticitate longitudinal pentru table sudate din oțel S 235 JR	137
7.8	Rezultatele experimentale ale determinării modulului de elasticitate transversal pentru table sudate din oțel S 235 JR	138
7.9	Rezultatele experimentale ale determinării modulului de elasticitate longitudinal pentru table sudate din oțel inoxidabil	138
7.10	Rezultatele experimentale ale determinării modulului de elasticitate transversal pentru table sudate din oțel inoxidabil	139
7.11	Rezultatele experimentale ale determinării modulului de elasticitate longitudinal pentru table sudate din aluminiu	140
7.12	Rezultatele experimentale ale determinării modulului de elasticitate transversal pentru table sudate din aluminiu	141
8.1	Valorile coeficientului lui Poisson pentru probe din oțel S 235 JR	151
8.2	Valorile coeficientului lui Poisson pentru probe din oțel INOX	151
8.3	Valorile coeficientului lui Poisson pentru probe din aluminiu	151
A 2.1	Primele moduri proprii pentru proba 2 din oțel S235 JR	167
A 2.2	Primele moduri proprii pentru proba 3 din oțel S 235 JR	167
A 3.1	Primele moduri proprii pentru proba 2 din oțel INOX	168
A 3.2	Primele moduri proprii pentru proba 3 din oțel INOX	168
A 3.3	Primele moduri proprii pentru proba 4 din oțel INOX	169
A 3.4	Primele moduri proprii pentru proba 5 din oțel INOX	171
A4.1	Rezultate ale analizei modale pentru tablă din aluminiu laminat h=3 mm (154.5x75x3)	172

A4.2	Rezultate ale analizei modale pentru tablă din aluminiu laminat h=3 mm (155.5x75x3)	172
A8.1	Rezultatele analizei unui semnal. Probă înainte de zincare, metoda seriilor Prony	179
A8.2	Rezultatele analizei unui semnal. Probă după de zincare, metoda seriilor Prony	178
A9.1	Rezultate ale prelucrării semnalului dat de o probă oțel S 235 JR nemetalizată, aplicând metoda seriilor Prony	180
A9.2	Rezultate ale prelucrării semnalului dat de o probă oțel S 235 JR metalizată, aplicând metoda seriilor Prony	181

Listă de abrevieri și notații

- m – cantitatea de metal depusă la catod prin galvanizare [g];
- K – echivalentul electrochimic al metalului care se depune [g/Ah];
- I – intensitatea curentului [A];
- t – timpul în care are loc depunerea [h];
- η – randamentul depunerii electrolitice;
- s – grosimea tablelor [mm];
- d_e – diametrul electrozilor [mm];
- n_t – numărul de treceri;
- I_s – curentul de sudare [A];
- U_a – tensiunea arcului [V];
- d_s – diametrul sârmei electrod [mm];
- d_{ws} – diametrul electrodului de wolfram [mm];
- V_e – viteza electrodului [mm/s];
- V_s – viteza de sudare [m/h];
- V_a – viteza de avans a sârmei electrod [m/min];
- D_g – debitul gazului de protecție [l/min];
- D – diametrul duzei [mm];
- I_p – intensitatea curentului de puls [A];
- I_b – intensitatea curentului de bază [A];
- I_{tr} – intensitatea curentului de tranziție [A];
- t_b – timpul de bază [ms];
- t_p – timpul de puls [ms];
- f_p – frecvența pulsurilor [Hz];

- F – forța de presare [kN];
- E – modulul de elasticitate longitudinal (Young) [N/m²];
- G – modulul de elasticitate transversal (de forfecare) [N/m²];
- ν – coeficientul lui Poisson [N/m²];
- L_0 – lungimea inițială a epruvetei între două repere [m];
- L – lungimea epruvetei între două repere [m];
- ΔL – alungirea epruvetei [m];
- A_0 – aria secțiunii transversale [m²];
- σ – tensiunea la întindere sau tensiunea normală [N/m²];
- ε – alungirea specifică [mm/mm], [%];
- σ_c – tensiunea de curgere aparentă [N/m²];
- σ_r – rezistența la tracțiune (rezistența la rupere) [N/m²];
- R_c – rezistența la curgere [N/m²];
- R_m – rezistența la rupere [N/m²];
- $\sigma_{0,2}$ – tensiunea de curgere convențională [N/m²];
- $R_{p0,2}$ – rezistența de curgere convențională [N/m²];
- E_t – modulul de elasticitate tangent [N/m²];
- E_s – modulul de elasticitate secant [N/m²];
- τ – tensiunea de forfecare [N/m²];
- F_t – forța tangențială de forfecare [N];
- Δx – deformare de alunecare [m];
- γ – deformația de forfecare [rad];
- θ – unghiul de forfecare [rad];
- $\theta(x, t)$ unghiul de răsucire sau de rotație al secțiunii unei bare supuse la vibrații de torsiune sau de încovoiere [rad];
- x – distanța față de capăt a secțiunii considerate [m];
- Δx – lungimea unui element de bară [m];
- $M(x, t)$ – cuplul forțelor interioare [Nm];

16 Listă de abrevieri și notații

$m(x, t)$ – momentul distribuit al forțelor exterioare [Nm/m];

$m(x, \dot{\theta}, t)$ – momentul distribuit al forțelor de frecare [Nm/m];

I_o – momentul de inerție polar al secțiunii barei (geometric) [m⁴];

J_o – momentul de inerție axial (momentul de inerție mecanic) pe unitatea de lungime a barei [kgm²/m];

$\varphi(x)$ – unghiul inițial de răsucire [rad];

$\psi(x)$ – viteza de răsucire inițială [rad/s];

$\theta_r(x)$ – funcții proprii [rad];

r – ordinul modului propriu de vibrație;

λ_r – valori proprii;

p_r – pulsațiile modurilor proprii [rad/s];

f_r – frecvențele modurilor proprii [Hz];

c – constantă egală cu viteza de propagare a oscilațiilor [m/s];

ρ – densitatea materialului [kg/m³];

T – forța tăietoare [N];

$\beta(x, t)$ – unghiul de alunecare al unei secțiuni transversale [rad]

$q(x, t)$ – forța distribuită pe unitatea de lungime [N/m]

k – coeficient care ține cont de efectul forțelor tăietoare în vibrațiile de flexiune;

$V(x)$ – funcții proprii

\mathcal{R} – mulțimea numerelor reale;

\mathbb{N} – mulțimea numerelor naturale;

SFT – Seria Fourier Trigonometrică;

SFA – Seria Fourier Armonică;

SFC – Seria Fourier Complexă;

S_n, C_n – coeficienții SFT;

A_n, B_n – coeficienții SFA;

φ_n, ψ_n – defazajele în dezvoltarea în SFA;

$A_n(\omega), A_n(f)$ – spectrul amplitudinilor în SFA;

$\varphi_n(\omega)$ – spectrul defazajelor în SFA;

A_{nc} – coeficienții SFC;

$A_{nc}(\omega), A_{nc}(f)$ – spectrul amplitudinilor în SFC;

$x(t)$ – semnalul de analizat;

T – perioada semnalului [s];

TF – Transformata Fourier;

$X(\omega)=F\{x(t)\}$ – Transformata Fourier TF;

TFI – Transformata Fourier Inversă;

$F^{-1}\{X(\omega)\}$ – TFI;

$\text{Re}X(\omega)$ - partea reală a TF;

$\text{Im}X(\omega)$ – partea imaginară a TF;

t_k – momente discrete de eșantionare [s];

TFD – Transformata Fourier Discretă;

$TFDI$ – Transformata Fourier Discretă Inversă;

TFR – Transformata Fourier Rapidă;

σ_r – factor de amortizare [s^{-1}];

λ_0 – lungimea de undă a luminii lase;

f_0 – frecvența undei lase;

T_0 – perioada undei laser;

v_R – viteza de deplasare a receptorului;

v_S – viteza de deplasare a sursei

TER– Traductor Electrotensometric Rezistiv ;

ρ_0 – rezistivitatea electrică a materialului, [Ωm];

R – rezistența electrică, [Ω];

C_B – constanta de material Bridgman[–];

ε – lungirea specifică a materialului mărcii tensometrice[–];

k' – este coeficientul de sensibilitate al materialului mărcii tensiometrice[–];

18 Listă de abrevieri și notații

R_1, R_2, R_3, R_4 – rezistențele electrice ale celor 4 TER-uri care compun o punte completă Wheatstone, [Ω];

U_i – tensiunea inițială aplicată punții Wheatstone, [V];

U_{iesire} – tensiunea măsurată la ieșire din puntea Wheatstone, [V];

R_i – rezistența electrică internă a voltmetrului care măsoară tensiunea electrică de ieșire a punții Wheatstone, [Ω];

L_m – inductanța magnetică a unei bobine, [H];

n_b – este numărul de înfășurări din bobină, [-];

G_f – este factorul de formă geometrică, [m/înfășurări];

μ_m – este permeabilitatea magnetică a mediului, [H /m];

q_A – sarcina electrică indusă între fețele condensatorului, [C];

k – constanta piezoelectrică a materialului, [C/N];

C_A – capacitatea condensatorului, [F];

ϵ_r – este constanta dielectrică a mediului, [-];

ϵ_0 – este constanta dielectrică a stratului izolator dintre cele două plăci ale condensatorului, [-];

$K_{TRADUCTOR}$ – sensibilitatea traductorului piezoelectric, [V/m];

τ_A -- constanta de timp, [s];

E_m – sensibilitatea microfonului acustic, [V/Pa];

U_b – tensiunea la borne, [V];

P_{ac} – presiunea acustică, [Pa];

E_{ref} – sensibilitatea de referință, [mV/ μ bar];

MAM– Metoda Analizei Modale;

MEF– Metoda Elementelor Finite;

FRF– Funcția de Răspuns în Frecvență;

MAC– Modal Assurance Criterion (criteriul de suprapunere a modurilor proprii);

APDL– ANSYS Parametric Design Language (Limbaj de programare parametrică utilizat de către programul cu elemente finite ANSYS);

VDL– Velocimetru Doppler Laser;

k_L – constanta VDL

L– Lungimea probei;

b– lățimea probei;

H– grosimea probei;

S 235 JR.- oțel de uz general;

EN X5 Cr Ni 18-10 – oțel inoxidabil;

1 INTRODUCERE

1.1 Materiale și proprietăți ale acestora

Materialele sunt, probabil, atât de adânc înrădăcinate în cultura noastră încât majoritatea dintre noi nici nu ne dăm seama de faptul că fiecare segment al vieții noastre de zi cu zi este influențat într-un grad sau altul de materiale. Trăim spiritual într-o lume materială.

Din punct de vedere istoric, dezvoltarea și progresul societăților au fost legate strâns de capacitatea membrilor de a produce și de a manipula materiale pentru a-și satisface nevoile lor. Materialele sunt atât de importante în dezvoltarea umanității, încât civilizațiile timpurii au fost denumite după nivelul lor de dezvoltare materială (epoca de piatră, epoca bronzului, epoca fierului). Aceasta demonstrează faptul că primele ființe umane au avut acces la un număr foarte limitat de materiale, cele care apar în mod natural: piatră, lemn, argilă etc. Cu timpul, ei au descoperit tehnici de obținere a unor materiale care au proprietăți superioare celor naturale și au produs diferite metale sau materiale noi. Mai mult, s-a descoperit că proprietățile unor materiale pot fi modificate prin combinarea lor, în diferite proporții, cu alte materiale sau prin tratamente termice.

Utilizarea materialelor a început să devină un proces de selecție care a implicat luarea unei decizii privind folosirea unui număr limitat de materiale, decizie luată pe baza caracteristicilor acestora. Cunoașterea caracteristicilor materialelor necesită înțelegerea relațiilor dintre elementele structurale ale acestora și proprietățile lor. În ultimul secol a avut loc o explozie în crearea de noi materiale, unele cu caracteristici specializate care să satisfacă nevoile dezvoltării industriale.

În cele mai multe referințe cu privire la clasificarea materialelor [1 - 5] sau la selecția acestora, în proiectarea și fabricația mașinilor [6 - 11], acestea sunt privite, din punctul de vedere al inginerului mecanic, ca materiale solide și sunt clasificate în patru grupe: metale, materiale ceramice, polimeri și materiale compozite. Această clasificare are la bază structura chimică a acestora, deși materialele compozite sunt combinații de două sau mai multe materiale din primele trei grupe.

Metalele sunt cele mai numeroase elemente în tabelul lui Mendeleev. Prin combinarea a două sau mai multor elemente chimice, dintre care cel puțin unul trebuie să fie metal, se obțin aliaje metalice. Atomii din metale și din aliaje ale acestora sunt dispuși într-un mod foarte ordonat și, în comparație cu materialele ceramice și polimerii, sunt materiale dense.

Ceramicile sunt materiale anorganice rezultate din compunerea unor metale cu elemente nemetalice. Acestea se găsesc cel mai frecvent sub forma de oxizi, nitruți, carburi etc., iar cele mai cunoscute ceramice conțin oxidul de aluminiu (sau alumina, Al_2O_3), dioxidul de siliciu (SiO_2), carbura de siliciu (SiC) și nitrura de siliciu (Si_3N_4). Cele mai cunoscute materiale ceramice sunt cele tradiționale compuse din materiale argiloase cum sunt: porțelanul, cimentul sau sticla.

Polimerii conțin mai multe elemente chimice și/sau radicali care sunt legate împreună pentru a forma un solid. Aici sunt incluse materialele plastice și din cauciuc. Cei mai mulți polimeri sunt compuși organici în care elementele de bază sunt carbonul și hidrogenul la care se adaugă și alte elemente nemetalice oxigenul,

azotul și siliciul. Structura moleculară a polimerilor este foarte mare, fiind o structură înălțuită al cărei schelet are la bază atomi de carbon. Polimerii cei mai cunoscuți sunt polietilena (PE), nylonul, policlorura de vinil (PVC), policarbonatul (PC), polistirenul (PS), și cauciucul siliconic.

Un material **compozit** este constituit din două sau mai multe materiale individuale, care provin din categoriile discutate mai sus: metale, ceramice și polimeri. Materialele compozite sunt caracterizate printr-o combinație de proprietăți pe care nu le afișează oricare dintre materialele componente de unul singur, și, de asemenea, ele includ cele mai bune caracteristici ale fiecărui material component. Există un număr mare de tipuri de compozite, care sunt reprezentate în proporții variabile din elementele de bază : metale, ceramice și polimeri. Chiar și unele materiale care apar în mod natural sunt, de asemenea, considerate a fi compozite, de exemplu: lemnul și osul. Cu toate acestea, cele mai multe dintre materialele compozite folosite în aplicații industriale sunt sintetice. Unul dintre cele mai cunoscute compozite este fibra de sticlă, în care fibrele de sticlă de mici dimensiuni sunt încorporate într-un material polimeric, de obicei un material din poliester sau epoxidic. Un alt material compozit foarte cunoscut este fibra de carbon, material rezultat prin încorporarea fibrelor de carbon într-un polimer.

O definiție generală pentru **proprietățile materialelor** ar putea să fie formulată sub forma: proprietățile materialelor sunt mărimi sau cantități care caracterizează comportamentul sau altfel spus răspunsul acestora la diferiți stimuli externi. Unele dintre mărimile care definesc proprietățile materialelor și mărimile care caracterizează stimuli (sau excitațiile) externi sunt date printr-o legătură de dependență exprimată întotdeauna printr-o relație matematică, iar această relație, mai mult sau mai puțin complicată, pune în evidență o mărime specifică fiecărui material, numită constantă de material sau caracteristică de material.

Proprietățile materialelor sunt clasificate în mai multe grupe, după natura stimulilor externi care le pun în evidență. Cea mai generală și mai cuprinzătoare clasificare a acestor proprietăți este următoarea :

- **Proprietăți fizice**
 - Densitatea
 - Porozitatea
- **Proprietăți chimice**
 - Oxidarea
 - Coroziunea
- **Proprietăți mecanice**
 - Elasticitatea
 - Rezistența (la întindere, compresiune, torsiune).
 - Rigiditatea
 - Duritatea
 - Oboseala
 - Plasticitatea
 - Fragilitatea
 - Ductibilitatea
 - Maleabilitatea
- **Proprietăți termice**
 - Căldura specifică
 - Conductivitatea termică
 - Coeficient de dilatare
 - Punct de topire

- **Proprietăți electrice și magnetice**
 - Conductivitatea electrică
 - Permitivitatea electrică
 - Permeabilitatea magnetică
- **Proprietăți acustice și optice**
 - Viteza de transmisie
 - Reflexia
 - Refracția

Desigur, multe dintre mărimile ce caracterizează proprietățile materialelor, enumerate mai sus, sunt în relații de interdependență de alte mărimi. Altfel spus, nu toate aceste mărimi sunt independente. În plus, se poate constata că proprietățile mecanice sunt cele mai numeroase. Aceasta se explică prin faptul că aplicațiile cele mai vechi, cele mai numeroase, dar și cele mai mari (gigantice) ale materialelor au fost și sunt în domeniul construcțiilor unor structuri mecanice. Prin urmare, acestea sunt principalele proprietăți ale materialelor urmărite de un inginer mecanic, iar dintre toate aceste proprietăți, în prezenta lucrare, se vor prezenta doar câteva, cele care intervin în calculul de dimensionare a structurilor, dar mai ales în comportarea dinamică a acestora, când, supuse unor forțe variabile în timp pot să ajungă în domeniul unor deformații care să pună în pericol însăși integritatea lor.

Proprietățile mecanice ale materialelor pot fi definite ca fiind acele mărimi care caracterizează comportamentul acestora ca răspuns la forțe externe sau aplicate, atât static cât și în regim dinamic. Principalele proprietăți mecanice se definesc, după cum urmează:

- **Elasticitatea** este definită ca fiind proprietatea unui material de a reveni la forma inițială după deformare și în lipsa forțelor care au produs acea deformare;
- **Rezistența** reprezintă proprietatea unui material de a rezista la deformare sub acțiunea unui sistem de forțe exterioare care să-l supună la solicitări de întindere, compresiune sau torsiune. Corespunzător acestor tipuri de solicitări se pot defini rezistența la întindere, rezistența la compresiune și rezistența la torsiune. Rezistența maximă este dată de forța maximă care poate fi aplicată. Rezistența la rupere este valoarea maximă a forței la care poate rezista materialul înainte de rupere;
- **Rigiditatea** reprezintă capacitatea unui material de a se opune deformării ca răspuns la o forță aplicată;
- **Duritatea** reprezintă capacitatea unui material de a rezista la o solicitare de uzură sau de zgâriere;
- **Oboseala** este proprietatea unor materiale care, supuse unor suprasolicitări, de obicei ciclice, le permite acestora să reziste fără a suferi fracturi;
- **Plasticitatea** este proprietatea unui material de a putea fi deformat permanent fără a se rupe;
- **Fragilitatea** este proprietatea unui material de a fi rupt ușor în urma unui impact. Se spune că materialul este casant;
- **Ductibilitatea** este proprietatea care permite unui material să se întindă, îndoie sau răsuci fără fisuri sau rupere. Aceste materiale pot fi trase sau întinse în fire subțiri;
- **Maleabilitatea** este proprietatea care permite unui material să se deformeze sub acțiunea unor forțe de compresiune fără a dezvolta defecte. Un material maleabil poate fi prelucrat cu ciocanul, forjat,

presat sau laminat în foi subțiri la o temperatură inferioară a celeia de topire.

Pentru determinarea proprietăților mecanice ale diferitelor materiale sunt realizate probe speciale, sub forma unor epruvete, care sunt supuse unor teste. Testele pot fi distructive sau nedistructive.

Testele distructive au ca efect modificarea dimensiunilor probei sau distrugere integrității fizice și structurale ale acesteia. Cele mai cunoscute teste de tracțiune, compresiune, forfecare, duritate etc. sunt teste distructive.

Testele nedistructive nu afectează integritatea structurală a probei; în general aceste teste nu afectează specimenul în nici un fel. Cele mai cunoscute metode de testare nedistructivă sunt: metoda particulelor magnetice, metode radiografice, metode cu ultrasunete, metoda curenților turbionari, metode cu microunde, metode cu raze infraroșii și metode vibro-acustice [12 - 17].

1.2 Aspecte generale asupra structurii tezei

La baza elaborării lucrării de doctorat stă un studiu care urmărește dezvoltarea unor metode nedistructive, din categoria metodelor vibroacustice, pentru determinarea caracteristicilor de material legate de comportarea elastică a structurilor metalice și în mod special a celor realizate din table subțiri. Pe parcursul lucrării se vor face dezvoltări teoretice, investigații numerice și măsurători experimentale, având ca scop determinarea modulilor de elasticitate ai structurilor din tablelor subțiri obținute prin sudare, sudobrazare, lipire sau acoperiri de suprafețe. În cele ce urmează, prin moduli de elasticitate, abordată ca o noțiune generală, se vor înțelege: modulul de elasticitate longitudinal, notat cu E (modulul lui Young), modulul de elasticitate transversal, notat cu G (modulul de forfecare), coeficientul lui Poisson, notat cu ν (coeficientul de contracție) și modulul de elasticitate bulk, notat cu K . De asemenea se va da o metodă pentru determinarea modulului de elasticitate dinamic E^* . Metodele vibroacustice propuse se pot utiliza, de asemenea, și pentru punerea în evidență a unor defecte de sudare sau lipire.

Lucrarea este structurată în opt capitole, bibliografie și anexe, care cuprind abordări teoretice, numerice și experimentale pentru fundamentarea unor metode de determinare a modulilor de elasticitate pe baza analizei semnalelor de vibrații. Se urmărește, de asemenea, identificarea unor parametri constitutivi, sensibili la prezența defectelor în structuri mecanice. Teza cuprinde o sinteză bibliografică cuprinzătoare, de dată recentă, privind atât metode de determinare a constantelor de material legate de comportarea elastică, cât și punerea în evidență a unor defecte prezente în structuri mecanice sudate sau lipite.

În **Capitolul 1**, un capitol introductiv, se face o clasificare generală a materialelor solide cu aplicabilitate în tehnică și o clasificare a proprietăților acestora, insistându-se în special asupra proprietăților mecanice, avându-se în vedere că majorității acestor proprietăți le corespund niște mărimi caracteristice, iar determinarea pe cale experimentală a unora dintre acestea constituie obiectivul general al acestei lucrări. Se prezintă, pe baza unui amplu studiu bibliografic, actualitatea temei, cu referiri la obiectivul general sau la obiectivele specifice. Într-un paragraf special este prezentat obiectivul general al tezei, obiectiv circumscris dezvoltării unor metode moderne pentru determinarea modulilor de elasticitate a unor îmbinări metalice prin metode nedistructive bazate pe teste de vibrații. Tot în acest paragraf sunt prezentate și obiectivele specifice ce decurg din realizarea trinomului ce stă la baza unei cercetări științifice: 1.) formularea teoretică și

obținerea de rezultate analitice; 2.) modelarea numerică și analiza rezultatelor numerice; 3.) cercetarea experimentală și analiza rezultatelor experimentale.

În **Capitolul 2** sunt prezentate principalele metode și procedee pentru realizarea unor îmbinări nedemontabile ale structurilor din table subțiri: acoperirea, lipirea și sudarea. Îmbinarea metalelor de grosimi cuprinse între 0,5 mm și 3 mm, similare sau disimilare, a atins o dezvoltare extraordinară odată cu explozia construcțiilor de automobile și dezvoltările industriilor din domeniile: electrotehnic, energetic și alimentar. Din aceste motive, tehnologiilor de îmbinare amintite mai sus, și procedeele clasice sau foarte actuale prin care se pot realiza acestea, li s-a acordat o atenție deosebită. Aceste metode și procedee vor fi utilizate și în procesul de elaborare a probelor, în vederea realizării cercetărilor experimentale.

În **Capitolul 3** sunt prezentate câteva elemente de teoria elasticității și despre vibrațiile mediilor continue de tip bară. Scopul prezentării acestor două probleme, împreună, într-un capitol separat, s-a făcut pentru a pune în evidență modul în care sunt definite principiile caracteristicii mecanice: modulul de elasticitate Young, modulul de elasticitate transversal (de forfecare) și coeficientul lui Poisson și, apoi, a arăta modul în care aceste caracteristici intervin în comportarea dinamică a structurilor, în determinarea frecvențelor proprii (sau de rezonanță). Prin urmare, punând problema inversă: cunoscând aceste frecvențe proprii se pot determina acele caracteristici mecanice. Totul se rezumă la a pune la punct metode de măsurare (determinare) a frecvențelor proprii ale structurii analizate.

Capitolul 4 cuprinde elemente fundamentale din teoria semnalelor. Deoarece, pentru determinarea caracteristicilor mecanice s-a urmărit dezvoltarea unor tehnici noi bazate pe teste de vibrații, în acest capitol s-au dat principalele metode de analiză a semnalelor, analiză care are drept scop determinarea frecvențelor proprii ale structurii. Ori, tocmai aceste frecvențe sunt conținute în semnalele de vibrații. Sunt descrise semnalele continue sau discrete, în timp continuu sau discret. Capitolul conține considerații teoretice asupra semnalelor periodice sau neperiodice, arătându-se, treptat, de ce se trece de la analiza prin serii Fourier, la analiza bazată pe Transformata Fourier Discretă (TFD), respectiv Transformata Fourier Rapidă (TFR). Într-un paragraf distinct este descrisă o metoda de analiză a semnalelor a cărei aplicabilitate a putut fi pusă în practică numai odată cu dezvoltarea puterii de calcul: metoda seriilor Prony. De asemenea, în alt paragraf, se prezintă efectul Doppler și modul în care acesta este implementat în funcționarea unui interferometru cu laser.

Capitolul 5, cuprinde o descriere a modului în care se poate face achiziția și prelucrarea semnalelor de vibrații. Vibrațiile mecanice nu sunt, la urma urmei, decât niște mișcări mecanice care au loc, față de un reper, de un număr foarte mare de ori. Aceste mișcări mecanice sunt transformate în semnale, de obicei analogice. Semnale analogice, deși poartă toate informațiile, nu pot fi prelucrate sub această formă, iar informațiile nu pot fi extrase. Din acest motiv, odată cu creșterea puterii de calcul a computerelor, odată cu dezvoltarea unor algoritmi implementați în programe de calcul, semnalele analogice au putut fi discretizate și digitalizate la frecvențe de eșantionare foarte ridicate. Transformarea mișcării mecanice într-un semnal analogic, de obicei o tensiune electrică, se face printr-un element fundamental în sistemul de măsură, și anume senzorul. Sunt prezentate mai multe tipuri de senzori folosiți în măsurătorile de vibrații, dar în această lucrare sunt utilizați primul rând microfonul și interferometrul cu laser.

În **Capitolul 6** sunt prezentate materialele utilizate în realizarea probelor și descrierea succintă a metodelor și procedeele tehnologice folosite. S-au realizat probe sudate din oțel nealiat de uz general S 235 JR, conform SR.EN 10025/1994, care înlocuiește vechea denumire pentru OL 37 (STAS 500/2-80), probe sudate din

oțel inoxidabil, simbolizat alfanumeric EN-X5CrNi 18-10, sau numeric EN-14301, conform standardului european EN 10088-1, probe din aluminiu realizate prin sudobrazare, precum și probe acoperite prin pulverizare cu un oxid metalic sau probe din tablă acoperite cu Zn. O mare parte a acestui capitol i-a fost alocată analizei numerice a probelor realizate experimental, pe baza Metodei Elementelor Finite (MEF), metodă care prin implementare într-un pachet de programe ANSYS dă posibilitatea Analizei Modale (AM) a comportării dinamice. Această analiză modală dă posibilitatea obținerii nu numai a frecvențelor proprii, dar mai ales a formei modurilor proprii. Acest fapt duce la identificarea frecvențelor proprii, obținute pe cale experimentală, cu modurile proprii corespunzătoare (de flexiune sau de răsucire).

Capitolul 7 cuprinde descrierea standurilor experimentale concepute și realizate în vederea determinării caracteristicilor mecanice ale probelor obținute prin diferite tipuri de îmbinări. Sunt descrise cele două tipuri de măsurători realizate pentru investigările experimentale: măsurători vibroacustice prin intermediul unui microfon condensator, respectiv măsurătorile testelor de vibrații cu ajutorul unui Vibrometru Laser VQ-400-A. Semnalele înregistrate prin cele două tipuri de măsurători sunt prelucrate folosind ca metode de analiză metoda FFT și metoda seriilor Prony. Din spectrul de frecvență trebuie identificate tipul modurilor proprii de vibrație (de torsiune sau de flexiune), moduri care se identifică pe baza rezultatelor date de AM utilizând MEF. Având la dispoziție frecvențele de rezonanță se determină valorile experimentale ale modurilor de elasticitate.

În **Capitolul 8** este dedicat diseminării rezultatelor obținute în cadrul cercetării doctorale. Sunt prezentate principalele concluzii privind metodele experimentale de determinare, pe cale nedistructivă, a modurilor de elasticitate pentru metale aflate în diferite tipuri de îmbinări nedemontabile. Sunt date concluzii cu privire la sensibilitatea metodelor prezentate în monitorizarea apariției unor defecte în structurile formate din table sudate. Capitolul se încheie cu o enumerare succintă a principalelor contribuții personale și cu o prezentare a vastele posibilități de dezvoltare ale aplicațiilor furnizate prin analiza semnalelor de vibrații pentru determinarea unor caracteristici mecanice sau a unor defecte de material.

Această lucrare a fost suportată parțial de grantul strategic POSDRU/CPP107/DMI1.5/S/77265 (2010) *Spre cariere de cercetare prin studii doctorale* al Ministerului Muncii, Familiei, Protecției Sociale și Persoanelor vârstnice din România, co-finanțat de Fondul Social European – Investește în oameni

1.3 Actualitatea temei

În ultimii zece de ani a avut loc o dezvoltare spectaculoasă în domeniul creării de noi tehnologii și materiale avansate. Este suficient să amintim prioritățile care stau în fața cercetătorilor din întreaga lume privind obținerea de noi tipuri de materiale din următoarele categorii:

- Materiale compozite;
- Materiale inteligente;
- Biomateriale;
- Materiale din sinteza și procesare a pulberilor;
- Materiale avansate cu proprietăți optice, electrice, magnetice, termomecanice;
- Materiale nanostructurate, micro și nanostructuri.

Toate aceste materiale au caracteristici mecanice necunoscute, iar pentru unele tipuri dintre acestea, folosirea metodelor clasice de determinare a acestor caracteristici este inaplicabilă. Din aceste motive dezvoltarea unor metode noi, și în principal a unor metode nedistructive, este o preocupare importantă a cercetătorilor.

Utilizarea semnalelor de vibrații, fie sub forma unor semnale acustice preluate prin intermediul unui microfon, fie preluate prin intermediul luminii laser date de un interferometru laser, sunt metode moderne de măsurare și aplicabile chiar și pentru acele materiale la care metodele clasice nu dau rezultate.

În literatura de specialitate sunt prezentate mai multe metode utilizate pentru determinarea modului de elasticitate longitudinal (modulul lui Young), a modului de elasticitate de forfecare și a coeficientului lui Poisson.

Standardele americane ASTM [121-130] dau foarte multe metode de determinare a caracteristicilor mecanice: modulul de elasticitate longitudinal, modulul de elasticitate transversal și coeficientul lui Poisson. Toate aceste standarde se bazează pe pregătirea unor epruvete de mărimi standardizate, dar nicio metodă nu dă modul de recunoaștere, din multitudinea de frecvențe conținute într-un spectru al unui semnal obținut prin aplicare unor impulsuri probelor studiate, a frecvențelor corespunzătoare modurilor proprii de încovoiere sau de torsiune.

Metodele propuse în această lucrare se bazează pe modelarea probelor prin Metoda Elementului Finit (MEF) și analiza dinamică a acestora prin Metoda Analizei Modale (MAM) într-un modul conținut în softul dat de ANSYS.

În subcapitolul următor sunt prezentate obiectivele asumate ale prezentului studiu.

1.4 Obiectivele propuse în prezentul studiu

În cadrul acestui studiu se prezintă, pentru început, metodele și procedeele prin care se pot obține probele de investigare. Această abordare permite o modelare matematică a comportării dinamice a eșantioanelor obținute, o rezolvare analitică a ecuațiilor diferențiale care guvernează mișcarea mecanică. În urma acestei analize se poate concluziona faptul că frecvențele proprii de vibrații depind de caracteristicile elastice de material, adică de modulul de elasticitate longitudinal E și modulul de elasticitate transversal G . Primul, modul de elasticitate Young, intervine în vibrațiile longitudinale și de încovoiere, iar cel de-al doilea în vibrațiile de răsucire. Prin urmare, punând problema inversă, adică, cunoscând frecvențele proprii se pot determina cei doi moduli de elasticitate. În acest scop, studiul se va continua printr-o investigare numerică, bazată pe modelarea cu elemente finite a acelorași probe, investigare care va determina nu numai frecvențele proprii ci și forma modurilor proprii. Acest ultim aspect ne dă informații asupra tipurilor de vibrații (de răsucire sau de încovoiere) pe care le poate avea o anumită probă în oricare dintre modurile proprii analizate. În ceea ce privește cunoașterea frecvențelor proprii, acest fapt ne va da posibilitatea corelării frecvențelor proprii obținute pe baza modelării numerice, cu frecvențele proprii obținute pe baza analizei semnalelor de vibrații obținute experimental.

Pentru definitivarea acestei cercetări științifice inginerești s-au urmărit următoarele etape:

- realizarea de eșantioane a căror comportare dinamică să fie studiată printr-o modelare matematică și o soluționare analitică;
- realizarea unei investigații numerice, asupra probelor obținute, printr-o modelare numerică și determinarea unei soluții numerice;

- realizarea unei investigații experimentale bazate pe înregistrarea și prelucrarea semnalelor vibroacustice obținute de la aceleași probe, în urma aplicării unor impulsuri.

Realizarea acestui trinom al cercetării științifice (abordarea unei formulări teoretice și obținerea de rezultate analitice, modelarea numerică și analiza rezultatelor numerice, respectiv cercetarea experimentală și analiza rezultatelor experimentale) este viabilă și este ancorată în următoarele obiective specifice ale acestui studiu:

- O cercetare bibliografică riguroasă și actuală pentru identificarea și înțelegerea posibilităților oferite atât de noile metode de realizare a îmbinărilor metalice, cât și de noile metode de analiză a comportării dinamice a acestora. Întregul studiu se va concentra pe patru direcții principale:
 - Prima direcție este orientată spre analiza și sinteza lucrărilor dedicate unor metode și procedee clasice sau foarte recente pentru obținerea îmbinărilor nedemontabile din table subțiri;
 - A doua direcție este axată spre analiza comportării dinamice a tablelor subțiri îmbinate și punerea în evidență a caracteristicilor de material care influențează această comportare;
 - A treia direcție este dirijată spre problema investigațiilor privind analiza modală și determinarea parametrilor modali ai îmbinărilor mecanice din table subțiri, utilizând metoda elementului finit (MEF), metodă implementată în programul de analiză a comportării dinamice a structurilor mecanice ANSYS;
 - A patra direcție corespunde achiziției și prelucrării semnalelor. Această direcție cuprinde două părți: în prima parte sunt achiziționate și prelucrate semnale vibroacustice prin intermediul unui microfon condensator, iar în cea de-a doua parte sunt achiziționate și prelucrate semnale de vibrații cu ajutorul unui traductor de tip optic care stă la baza unui Laser Doppler. În ambele cazuri au fost utilizate cele mai actuale metode de analiză, implementate în programe speciale pentru analiza semnalelor.
- Dezvoltarea unor metode analitice care să justifice continuarea cercetărilor bazate pe analiza numerică și experimentală în vederea determinării unor caracteristici de material;
- Crearea unor scenarii de analiză numerică și realizarea unor investigații corespunzătoare pentru validarea identificării modurilor de vibrații (de încovoiere sau torsiune);
- Identificarea metodelor celor mai potrivite pentru realizarea standurilor experimentale și pentru realizarea unor investigații experimentale care să valideze metodele de determinare a caracteristicilor elastice;
- Realizarea de teste, pe standuri experimentale de studiu al vibrațiilor, ale unor structuri mecanice sudate din table subțiri;
- Realizarea de teste, pe standuri experimentale de studiu al vibrațiilor, ale unor structuri mecanice din table subțiri lipite;

- Realizarea de teste, pe standuri experimentale de studiu al vibrațiilor, ale unor structuri mecanice din table subțiri acoperite;
- Identificarea unor tipuri de defecte care pot fi produse în structurile mecanice analizate, atât prin simulare numerică, cât și în standul pentru studiul vibrațiilor;
- Validarea metodelor propuse pentru determinarea caracteristicilor elastice de material prin compararea rezultatelor obținute pe cale numerică și experimentală, dar și cu alte metode date în literatura de specialitate,
- Prezentarea contribuțiilor personale și a impactului pe care acest studiu îl poate avea asupra unor aplicații din industrie.

2. METODE ȘI PROCEDEE PENTRU ACOPERIREA ȘI ÎMBINAREA TABLELOR SUBȚIRI

Îmbinarea metalelor de grosimi cuprinse între 0,5 mm și 3 mm, similare sau disimilare, a atins o dezvoltare extraordinară odată cu explozia construcțiilor de automobile, aceste îmbinări fiind utilizate în realizarea caroseriilor și a radiatoarelor. Unele mărci de mașini au structura acoperișului realizată prin îmbinarea disimilară a unui aliaj de aluminiu pe caroseria din oțel nealiat. Un alt domeniu, cu o dezvoltare mare în ultimul timp, este cel energetic, iar îmbinări disimilare dintre un aliaj de aluminiu și cupru tehnic sunt găsite în construcția radiatoarelor de căldură. Îmbinări disimilare dintre cupru tehnic și un aliaj de aluminiu sunt folosite în componentele electronice. În industria electrotehnică, pentru transportul energiei electrice sub tensiune înaltă, se folosesc cabluri în care există îmbinări disimilare din cupru și oțel aliat. Industria petrolieră necesită materiale rezistente la coroziune și din acest motiv sunt folosite îmbinări disimilare dintre un aliaj de aluminiu și oțel inoxidabil. Îmbinări din materiale similare sau disimilare sub forma unor table subțiri se întâlnesc și în industria alimentară.

Se constată că există o multitudine de aplicații industriale ale tablelor de dimensiuni sub 3 mm, și prin urmare, cunoașterea caracteristicilor mecanice legate de comportarea structurilor în domeniul elastic, este necesară, nu numai pentru calculul de dimensionare, dar și pentru cunoașterea comportării acestora sub acțiunea unor solicitări variabile în timp.

În acest capitol se analizează principalele metode și procedee pentru realizarea unor îmbinări nedemontabile ale structurilor din table subțiri. Trebuie subliniat faptul că în vorbirea curentă cele două noțiuni, metodă și procedeu, se confundă de cele mai multe ori. Totuși o analiză semantică a acestora ne poate demonstra contrariul. Metoda ne arată drumul, calea spre a obține un deziderat (din limba greacă: metha = spre, către și odos=drum, cale), iar procedeul poate fi o secvență a metodei sau un mijloc, din multe altele posibile, prin care se urmărește să se ajungă la un anumit rezultat (din limba franceză: procédé=mijloc). Prin urmare, metodele de obținere ale acestor îmbinări din table subțiri ce urmează a fi prezentate sunt: acoperirea, lipirea și sudarea. Deși acoperirea nu este, în general, cunoscută sub denumirea de îmbinare nedemontabilă, datorită interesului prezentat pentru dezvoltarea metodei propuse în cadrul cercetării doctorale, ea va fi inclusă în această grupă de îmbinări. De asemenea, unui procedeu care îmbină două metode de îmbinare: sudarea și lipirea tare, cunoscut sub numele de sudobrazare, i se va acorda o atenție specială.

2.1 Procedee de acoperire a tablelor subțiri

Suprafețele metalice sunt supuse unor multitudini de metode de prelucrare. Aceste prelucrări au diferite scopuri: de la forma estetică a pieselor - prin culoarea dată suprafețelor -, la recondiționarea prin bușare, în cazul reparațiilor unor piese uzate. În alte situații se urmărește evitarea uzurii pieselor și atunci suprafețelor li se aplică tratamente de durificare sau se urmărește împiedicarea oxidării și corodării

acestora și suprafețele sunt acoperite cu metale sau cu vopsele rezistente în mediile care produc deteriorarea lor.

Una dintre cele mai frecvente metode pentru protecția suprafețelor este acoperirea metalică. Sunt cunoscute mai multe procedee prin care se realizează acest deziderat. Cele mai cunoscute procedee sunt:

- procedeul de acoperire prin imersare în metal topit;
- procedeul de acoperire prin galvanizare;
- procedeul de acoperire prin metalizare;
- procedeul de acoperire prin sudare prin topire;
- procedeul de acoperire prin difuzie termică;
- procedeul de acoperire prin vaporizare în vid.

2.1.1 Procedeul de acoperire prin imersare în metal topit

Procedeul de imersare în metal topit constă în scufundarea pieselor și subansamblelor în metalul cu care se dorește acoperirea, metal aflat în stare lichidă și care trebuie să aibă o temperatură cu 30 – 50 °C peste valoarea temperaturii de topire a acestuia. Piesa scufundată este menținută în baia de metal topit un timp suficient de mare pentru a se realiza legătura de aderență dintre metalul topit și materialul de bază al acesteia. Pentru a avea loc depunerea de metal topit pe piesa suport trebuie ca cele două metale să poată fi aliate. Prin acest procedeu se acoperă oțeluri carbon de uz general, table subțiri, benzi și țevi. Acoperirea se realizează pe baza legăturilor intermecanice care se stabilesc între atomii din metalul topit și atomii din piesa suport. Aceste legături se realizează prin difuzia atomilor din metalul topit în rețeaua materialului suport.

Pentru a împiedica încălzirea piesei la temperaturi mari sau foarte mari, temperaturi care ar putea modifica compoziția chimică, dimensiunile structurii, starea de tensiune și proprietățile de rezistență mecanică, se folosesc numai metale care au temperatura de topire scăzută. Aceste metale, ordonate în funcție de frecvența de utilizare, sunt:

- zincul, cu temperatura de topire la 419 °C;
- aluminiul, cu temperatura de topire la 659 °C;
- staniu, cu temperatura de topire 232 °C;
- plumbul, cu temperatura de topire de 237 °C.

Cele mai mari cantități de metal folosite în acest procedeu de acoperire revin zincului, cu peste 1,4 milioane de tone anual.

În tabelul 2.1 se prezintă indicele de adâncime pentru coroziunea în diferite tipuri de atmosferă a celor patru metale folosite pentru acoperirile prin scufundare în metal topit.

Tabelul 2.1. Indicele de adâncime pentru coroziune a straturilor depuse prin imersare în metal topit [19].

Tipul atmosferei	Indicele de adâncime pentru metalul de acoperire [μm]			
	Zinc	Aluminiu	Staniu	Plumb
Rurală	1 - 4	<0,5	< 2	< 2
Urbană	1 - 6	0,1 - 1	2 - 8	< 2
Marină	1 - 7	0,5 - 1	1 - 3	< 2
Industrială	4 - 13	1 - 2	1 - 3	< 4

2.1.2. Acoperirea oțelurilor prin zincarea termică

Zincarea termică a pieselor din oțeluri obișnuite se face prin imersare lor în baia de zinc topit la temperatura de 455 - 460°C. Acest procedeu se aplică oțelurilor moi, la aliajele slabe din oțel, la fontă și la oțelul turnat. Zincarea termică respectă condițiile tehnice generale și de calitate impuse prin SR EN ISO 1461-2002. În urma reacției dintre zincul topit și fierul din oțel se formează aliaje care au o duritate chiar mai mare decât cea a oțelului imersat. Fiecare strat de aliaj Fe - Zn, care se formează, fuzionează cu următorul. Acest proces continuă până în momentul scoaterii piesei din baia de zincare și poate fi descris prin următoarele faze succesive:

- faza gama, γ , în care se formează primul strat, stratul de aderență cu oțelul, având o grosime foarte mică și proprietăți plastice;
- faza delta, δ , în care se constituie stratul de legătură pentru viitoarele straturi aderente, având o structură dură și fragilă;
- faza zeta, ζ , în care se formează un strat cu o structură colonară, dură și fragilă și din aceste motive este bine să fie cât mai subțire pentru a oferi proprietatea de ductibilitate;
- faza eta, η , în care se va forma un strat care are aceeași compoziție cu baia, adică zincul pur.

Grosimea straturilor depuse, în cele patru faze, precum și grosimea totală, depinde de următorii factori: calitatea oțelului, puritatea zincului, temperatura din baia de zincare, durata de imersie și extragere din baie. Grosimea totală a stratului depus prin zincare termică este cuprins între 70 - 150 μm . Oțelurile zincate prin acoperire termică sunt protejate de coroziunea de orice fel: în aer, în apă sau pământ. Pentru o zincare corectă se recomandă folosirea unui zinc cu o puritate de minimum 98,5 %, conform STAS 646-88.

Din cercetările experimentale s-a constatat că oțelurile zincate prin imersare, destinate structurilor sudate, și-au modificat, în mică măsură, unele proprietăți mecanice. Este vorba despre rezistența la rupere, rezistența la oboseală, limita de curgere etc. Problema care se pune în cadrul acestei lucrări se referă la aplicarea unei metode de analiză a semnalelor de vibrații pentru determinarea modulului lui Young, a modulului de elasticitate transversal și a coeficientului lui Poisson, pentru aceste tipuri de oțeluri acoperite cu zinc și stabilirea modulului în care acestea variază în funcție de grosimea stratului depus.

2.1.3 Acoperirea oțelurilor prin imersare în aluminiu, staniu, plumb și aliaje ale acestora

Aluminiul se depune în straturi subtiri de 10-20 μm și numai pe suprafețe plane. Oțelurile acoperite cu aluminiu prin imersie termică asigură construcțiilor metalice protecție anticorosivă în medii acide sau în industria chimică, unde se vehiculează gaze fierbinți sau aburi supraîncălziți până la 600 °C.

Staniul este un metal foarte frecvent utilizat pentru acoperirea oțelurilor folosite în industria alimentară. Grosimea stratului de staniu depus prin imersare este cuprins între 5 - 20 μm . Staniul fiind un metal deficitar, din punct de vedere economic, în comparație cu zincul, depunerea lui prin imersare se face în straturi foarte subtiri.

Plumbul este un metal foarte rezistent la acid sulfuric, dar depunerea sa pe oțeluri este deficitară din cauza tensiunii superficiale care nu-i permite aplicarea

directă. Din acest motiv plumbul se aplică după un strat de staniu. Grosimea stratului depus este 3 - 6 μm pe benzi și de 15 - 60 μm pe piese mai groase.

Aliajele cele mai folosite pentru acoperirea prin imersare a oțelurilor sunt galvalum care are compoziția 55%Al, 43,5%Zn și 1,5%Si, galfan cu compoziția 95%Zn și 5%Al. Acestea înlocuiesc zincul și au o comportare bună la coroziunea atmosferică. Stratul depus are o grosime între 14 - 17 μm . Un alt aliaj folosit pentru acoperirea prin imersare a oțelurilor este Alusi, un aliaj cu un conținut de 90%Al și 10%Si. Acesta oferă o rezistență bună la oxidare la temperaturi cuprinse în intervalul 650 - 800 $^{\circ}\text{C}$, dar și la coroziunea chimică.

2.1.4 Procedeele de acoperire prin galvanizare

Galvanizarea este un proces de depunere electrochimică a unor metale pe suprafața pieselor. Ea este utilizată atât în fabricație, în obținerea acoperii tablelor subțiri, cât mai ales în procesul de recondiționare a pieselor sau subansamblurilor. Avantajele acestui procedeu sunt elocvente: suprafețele acoperite prin galvanizare au duritate mai mare, rezistență la coroziune și uzură sporită, iar stratul depus pe cale electrochimică este uniform și precis controlat, evitându-se astfel adaosurile mari de prelucrare, în plus, nu se modifică proprietățile mecanice și structura materialului pieselor. Stratul depus prin galvanizare are proprietăți diferite de cele ale acoperirilor metalice realizate prin alte procedee (sudare și metalizare); ele sunt determinate de modul specific de cristalizare, de existența unor incluziuni de oxizi, de dimensiunile mult mai mici ale grăunților de cristal, toate conducând la sporirea substanțială a tenacității, rezistenței la uzură și, mai ales, a durității.

După natura metalului depus pe suprafața piesei, galvanizarea poartă numele de: zincare, cromare, nichelare, cuprare (arămire), oțelire (fierare), cositorire, plumbuire etc. Procedeele de acoperire metalică prin galvanizare are doi parametri de bază; durata procesului și intensitatea curentului, a căror reglare permite obținerea grosimii dorite a stratului depus. Pentru o bună aderare cu stratul de metal depus pe cale electrochimică, suprafața piesei suport trebuie pregătită corespunzător. Galvanizarea are și unele dezavantaje legate îndeosebi de durata mare a procesului de depunere, precum și de prețul de cost ridicat al utilajelor, instalațiilor și al materialelor.

Galvanizarea este un fenomen de electroliză, iar elementul galvanic este format dintr-o baie, ce conține o soluție electrochimică, soluție în care se află ionii metalici ai unor săruri dizolvate și care urmează să acopere suprafața piesei, și doi electrozi legați la o sursă de curent continuu. Catodul este electrozul legat la polul negativ, iar anodul, cel legat la polul pozitiv al sursei. În baie, dacă anodul este solubil, se disociază în ioni. Între cei doi electrozi ia naștere un curent electric care face ca ionii pozitivi să fie atrași de catod (anionii) pe care se depun, iar cei negativi sunt atrași de anod (cationii). La depunerile electrochimice, metalul cu care urmează a se face acoperirea se prezintă fie sub formă de săruri, fie de bare metalice și săruri. Sărurile se dizolvă în electrolit (apă, acid sulfuric etc.), iar piesa de acoperit se leagă la catod. La electroliza cu anod solubil, acesta este confecționat din metalul de acoperire și prin dizolvare își pierde ionii, care, în prezența câmpului electrostatic din electrolit, sunt atrași spre catod. Anozii pot fi solubili (când anionii intră în reacție cu anodul iar acesta se consumă) și insolubili.

Cantitatea de metal depusă la catod, pe piesa de acoperit, se calculează cu relația lui Faraday:

$$m = KIt\eta \quad (2.1)$$

în care: m este cantitatea de metal depusă, în grame; k este echivalentul electrochimic al metalului care se depune în g/Ah ; I este intensitatea curentului, în A; t este timpul cât durează depunerea, în h, iar η este randamentul depunerii electrolitice determinat experimental pentru fiecare electrolit și reprezintă raportul dintre cantitatea de metal depus real și cea teoretică posibilă.

Tabelul 2.2. Proprietăți modificate prin acoperiri cu straturi galvanice

Denumirea acoperirilor galvanice	Proprietățile modificate
Zincarea, cromarea	Rezistența la coroziune
Cromarea	Duritatea
Cromarea	Umectarea
Cuprarea, argintarea	Conductibilitatea electrică
Cuprarea	Conductivitatea termică
Nichelarea, argintarea	Micșorarea coeficientului de frecare
Argintarea, aurirea	Reflexivitatea
Zincarea	Capacitatea de lipire cu aliaje metalice

Spre deosebire de acoperirea prin imersare, în cazul procedurii de acoperire prin galvanizare, se pot realiza acoperiri metalice aliate sau acoperiri metalice formate dintr-o matrice metalică conținând adaosuri sub formă de particule fin dispersate într-o combinație de material incompatibile de a forma un aliaj [20]. Galvanizarea este procedeul cel mai frecvent utilizat pentru acoperirea anticorozivă a metalelor. Stratul galvanic asigură și modificarea unor proprietăți ale piesei suport. În tabelul 2.2. se prezintă exemple ale modificărilor unor proprietăți prin diferite procedee de galvanizare [21].

2.1.5 Acoperirea oțelurilor prin zincarea electrolitică

Dintre toate procedeele de acoperire prin galvanizare, zincarea este cel mai larg răspândit procedeu și constă în electroliza sărurilor de zinc (alcalina cianura, hidroxidul de zinc carbonat, sulfatul sau clorura de zinc). Dintre toate oțelurile acoperite cu diferite straturi metalice ponderea cea mai mare o are acoperirea cu Zn. În ansamblul sectoarelor industriale oțelurile acoperite cu zinc sau aliaje de zinc, prin imersare, ocupă o pondere de peste 62%, iar oțelurile acoperite cu zinc, prin galvanizare, ocupă o pondere de 25%. Restul de 13% sunt oțeluri acoperite cu alte metale sau aliaje ale acestora. Procedeul bazat pe electroliți cianurați este foarte toxic și se elimină din folosință. Calitatea depunerilor depinde de gradul de tratare al suprafețelor, de compoziția băii, natura electroliților, densitatea medie a curentului, temperatura și agitația soluției din baie. Piesa de acoperire se leagă la catodul sursei de curent continuu, iar anodul este confecționat chiar din zinc, dacă electroliza este cu anod solubil.

Parametrii procedurii de zincare electrolitică sunt dați în tabelul 2.3.

Tabelul 2.3. Parametrii procesului de zincare electrolitică

Temperatura [°C]	Densitatea de curent [A/dm ²]	Viteza de depunere [μm/min]	Timp [min]	Grosimea depunerii [μm]
20 – 25	2,5	0,6 – 0,8	15	8
20 – 25	2,5	0.6 – 0,8	22	15

Pregătirea suprafețelor constă în:

- degresarea chimică, timp de 5 -15 min., la o temperatură de 60 – 80°C folosind degresant pe bază de silicați, carbonați sau fosfați;

- spălarea dublă în cascadă;
- decaparea în soluție de acid clorhidric, timp de 20 – 50 min.;
- degresarea electrochimică în soluție alcalină de hidroxid de sodiu sau potasiu, timp de 0,5 – 2 min.
- activarea în soluție de acid clorhidric sau sulfuric, timp de 10 – 30 s;
- zincarea propriu zisă, folosind un mediu pe bază de cloruri.
- tratamentul de pasivizare, tratament care se face atât cu rol estetic cât și cu rol de creștere a rezistenței la coroziune;
- uscarea la o temperatură de 70 °C, un timp de 10 min. și verificarea.

2.1.6 Acoperirea prin cromare electrolitică

Cromul depus pe cale electrolitică are culoare argintie-opacă și este foarte dur (600-1200 HB). El se poate depune pe suprafețele tablelor subțiri fabricate din oțel, fontă, cupru, alamă, aliaje de aluminiu etc. Stratul de crom are rezistență la coroziune mare, un coeficient de frecare mic, precum și duritate și rezistență la uzură mari. Rezistența la rupere a stratului scade odată cu creșterea grosimii lui. Odată cu creșterea grosimii stratului scade și rezistența la oboseală, care poate fi restabilă dacă piesei i se aplică un tratament termic de revenire (la 150-250 °C timp de trei ore). Umectarea cu ulei a suprafeței stratului de crom se face greu; din această cauză frecarea este semiuscată, dezavantaj eliminat la cromarea poroasă. Electrolițul folosit la cromare este o soluție apoasă de anhidridă cromică (CrO_3) cu adaos de acid sulfuric (H_2SO_4). Anozii băii de cromare sunt insolubili și sunt confecționați din plumb pur sau aliaj de plumb și stibiu. Tensiunea aplicată la electrozii băii este de 6-10 V. Depunerea continuă de crom pe piesă duce la scăderea concentrației de anhidridă cromică, ceea ce face necesară completarea sistematică a băii cu electrolit. La anod se degajă o mare cantitate de oxigen, care oxidând plumbul, scade randamentul de depunere a stratului de crom. Pentru a preveni o astfel de situație, periodic, anozii trebuie curățați de peroxidul de plumb cu ajutorul unor soluții de acid sulfuric și de hidroxid de sodiu. Pentru o bună cromare, este necesar ca raportul dintre anhidrida cromică și acidul sulfuric din electrolit să se mențină constant. Raportul optim este cuprins între valorile 90-120. Micșorarea acestui raport duce la scăderea capacității de difuziune a electrolițului, precum și a randamentului. Mărirea lui, peste limita indicată ca optimă, sporește cantitatea de gaze degajată (hidrogen și oxigen) și favorizează apariția fisurilor în stratul de crom depus. Parametrii cromării electrolitice sunt dați în tabelul 2.4 [19]

Tabelul 2.4. Parametrii procesului de cromare electrolitică

Tipul electrolitului	Compoziția chimică a băii [g/l]	Temperatura băii [°C]	Densitatea de curent [A/dm^2]
Cromare lucioasă	Acid cromic 300-400 Acid sulfuric 3,5-4	Max 60	10-20
Cromare dură	Acid cromic 150-450 Acid sulfuric 0.3-1 Acid fluorosiliciu 0,3-3	20-25	5
Electroliți cu autoreglare	Acid cromic 300 Sulfat de Sr 1-3,5 Fluorosilicat de K 2,5-4,5 Bicromat de K 5-10	30-45	8-15

Concentrația de anhidridă cromică și acid sulfuric determină trei categorii de electrolit care conduc la randamente diferite și proprietăți specifice. Regimul electrolizei influențează structura, proprietățile și aspectul exterior al stratului de crom depus. Densitatea de curent variază în limite largi între 10 și 100 A/dm² și chiar până la 200 A/dm². Dacă densitatea de curent este mai mare, durata operațiunii se micșorează, iar randamentul crește. La densități mai mici de 5 A/dm² cromul nu se mai depune la catod. Temperatura băii de cromare variază între 45°C și 75°C. Micșorarea temperaturii favorizează creșterea randamentului curentului.

2.1.7 Acoperirea prin cuprare electrolitică

Acoperirile electrolitice de cupru, depuse prin galvanizare, au o culoare roz (arămie), dând piesei un aspect frumos. În prezența compușilor de sulf, umezelii și bioxidului de carbon din atmosferă pelicula de cupru se oxidează, schimbând aspectul inițial, închizându-se la culoare. Stratul superficial de oxid de cupru joacă un rol protector, întrucât oprește procesul de oxidare în adâncimea stratului de cupru depus pe tablele subțiri. Duritatea peliculelor de cupru electrolitic este mică, de numai 60-150 HB. Stratul depus are bune calități de antifricțiune și de aceea este utilizat la acoperirea suprafețelor supuse fenomenului de frecare. Pentru cuprare se folosesc electrolizi pe bază de acizi sau cianuri. Electroliții acizi se obțin mai simplu și au un preț de cost mai redus; ei prezintă însă dezavantajul că stratul depus este neuniform, grăunții de metal sunt mai mari, iar aderența lui, la piesele din oțel, este foarte slabă. Ei sunt formați dintr-o soluție apoasă de sulfat de cupru (piatră vântă), 200-250 g/l și acid sulfuric, 50-70 g/l. Regimul de cuprare impune o temperatură de 15-20°C și o densitate de curent de 2-8 A/dm². Piesa de acoperire prin cuprare este legată la catod. Anodul constituit din cupru electrolitic este solubil. Prin agitarea electrolitului se sporește productivitatea procesului.

Tabelul 2.5. Principalii parametri ai procesului de cuprare electrolitică

Tipul electrolitului	Compoziția chimică a băii [g/l]	Temperatura băii [°C]	Densitatea de curent [A/dm ²]
Cu sulfat de cupru	CuSO ₄ , 150-200 H ₂ SO ₄ Cloruri	20-50	Max 7
Cu fluoroborat	Max 120, substanțe pentru luciu	25-50	Max 40
Cu fosfat	50	50-70	Max 8
Cu cianuri	Cu 20-60 CN 20-40	40-75	Max 8

Procesul de cuprare este afectat de impuritățile din baie: substanțe organice, ioni de metale grele sau săruri (carbonați). Substanțele organice și sărurile se pot elimina prin filtrare, iar metalele grele se elimină electrolitic. Pentru obținerea unor suprafețe netede și lucioase, precum și pentru mărirea productivității se întrebunțează electrolizi pe bază de acid fluoroboric - fluoroborat de cupru 220-280 g/l; acid boric 15-16 g/l și acid fluoroboric 2-3 g/l - care se agită continuu cu aer comprimat sau cu un agitator mecanic. Electroliții pe bază de cianuri au o mare capacitate de dispersie, iar cristalele depuse sunt foarte fine. De asemenea ei permit depunerea directă a cuprului pe piesa din oțel. Au și unele dezavantaje, astfel: sunt

toxici, densitățile de curent folosite sunt mai mici și deci productivitatea este redusă și necesită corectarea continuă a compoziției pe timpul procesului. Parametrii cuprării electrolitice sunt dați în tabelul 2.5. [19].

2.1.8 Acoperirea prin nichelare electrolitică

Este un procedeu de galvanizare care se folosește mai ales pentru scopuri decorativ-protectoare. Stratul de nichel are plasticitate redusă, duritatea lui o poate atinge pe aceea a oțelului călit, se polizează ușor și este rezistent la acțiunea chimică a diferiților agenți. Nichelarea pieselor din oțel reclamă mai întâi aplicarea unui strat de cupru.

Nichelul este rezistent chimic la soluții alcaline și slab alcaline. Fiind mai electropozitiv decât majoritatea metalelor, depunerile de nichel sunt de tip catodic și nu protejează suportul împotriva coroziunii. Din acest motiv straturile de nichel trebuie să fie cât mai dense. Pentru a nu se forma pori la depunerea nichelului se apelează la depunerea în două straturi. Primul strat va fi unul mat, iar al doilea va fi unul lucios. În acest fel formarea porilor este minimă. În plus stratul lucios, mai electropozitiv datorită conținutului mai mare de substanțe anorganice, protejează stratul mat, care este mai electronegativ.

La nichelare procesul de electroliză este foarte sensibil; el reclamă un mare grad de puritate și respectarea strictă și continuă a regimului de lucru. Orice abatere de la regimul de lucru conducând la exfolierea stratului depus. În tabelul 2.6. se prezintă principalii parametri ai procesului de nichelare electrolitică.

Tabelul 2.6. Parametrii principali ai procesului de nichelare electrolitică

Tipul electrolitului	Compoziția chimică a băii [g/l]	Temperatura băii [°C]	Densitatea de curent [A/dm ²]
Cu sulfat	Sulfat de nichel max. 300 Clorură de nichel max. 50 Acid boric max. 40	40-70	3-10
Cu sulfamat	Sulfamat de nichel 350-450 Clorură de nichel max.10 Acid boric 30-40	30-50	20
Cu fluoroborat	Fluoroborat de nichel 350-450 Acid fluoroboric max. 40 Acid boric 30-40	40-80	Max 10

Suprafața obținută prin nichelare galvanică are o mare duritate și se poate lustrui. Straturile de nichel depuse electrochimic au o grosime de 7-10μm și au rol de protecție anticorrosivă. În general, straturile depuse au 2-3μm, dar în unele procese, mai ales de reparații, ajung la grosimi de 200-3000μm.

2.1.9 Procedeu de acoperire prin metalizare

Procedeu de acoperire a pieselor prin metalizare constă în acoperirea suprafețelor cu un material de adaos topit, cu flacără sau arc electric, și pulverizat de un jet de aer comprimat. Acest procedeu prezintă următoarele avantaje:

- oferă posibilitatea de a acoperi piese fabricate din orice material, deoarece temperaturile de lucru sunt foarte scăzute;
- permite acoperirea unor suprafețe mari care, practic, pot avea orice configurație geometrică;
- se pot depune straturi cu grosimi de la 0,01 până la 5 mm și chiar mai mult;
- stratul depus prin acoperire are o mare rezistență la uzură și bune proprietăți de lubrifiere;
- nu afectează structura materialului de bază din care este fabricată piesa de acoperit, întrucât temperaturile de încălzire nu depășesc 100°C;
- permite depunerea unor straturi de orice metal, inclusiv aluminiul, cuprul, plumbul etc., și formarea unor pseudoaliaje care nu se pot obține în stare lichidă, de exemplu de plumb și aluminiu;
- are productivitate mare și preț de cost scăzut.

Acoperirea prin metalizare prezintă însă și unele dezavantaje. Cele mai semnificative dezavantaje sunt:

- aderența stratului depus, la materialul de bază al piesei, este slabă;
- pentru a spori aderența stratului se fac operațiuni speciale de pregătire;
- datorită pulverizării o parte din materialul de aport (circa 5%) se risipește;
- piesele metalizate nu pot fi prelucrate prin deformări plastice. Suprafețele acoperite nu suportă sarcini dinamice sau frecări uscate;
- regimul de depunere a stratului de acoperire prin metalizare determină aderența particulelor, densitatea stratului de încărcare și deci și structura și proprietățile lui mecanice. Temperatura mai ridicată a particulelor de metal pulverizat favorizează aderența acestora, dar jetul conține la exterior particule cu temperaturi mai scăzute care aderă mai puțin la piesă;
- particula topită de metal se oxidează, ceea ce scade iarăși aderența.

Natura gazului folosit la pulverizare determină gradul de oxidare; oxidarea este maximă când pentru pulverizare se întrebuițează aerul comprimat și scade foarte mult când pentru pulverizare se folosește gaze inerte. Aparatele moderne de acoperire a suprafețelor prin pulverizare sunt prevăzute cu dispozitiv de reglare a mărimii jetului, ceea ce asigură depunerea particulelor din zona centrală a acestuia, realizându-se astfel o bună aderență. Aderența stratului depus prin metalizare depinde, de asemenea, de temperatura piesei care trebuie încărcată, distanța de pulverizare, precum și de grosimea stratului depus. Cu cât temperatura piesei de bază este mai mare cu atât aderența este mai bună, așa cum rezultă și din tabelul 2.7,[22].

Tabelul 2.7. Aderența stratului depus prin metalizare

Materialul de adaos	Starea piesei de acoperi prin metalizare			
	Rece		Încălzită la 250 °C	
	Grosimea stratului [mm]	Aderența [daN/cm ²]	Grosimea stratului [mm]	Aderența [daN/cm ²]
Oțel cu 0,1%C	0,195	60,5	0,462	95,0
Aluminiu	0,320	31,5	0,137	81,0
Zinc	0,145	42,9	0,137	104,0
Cupru	0,147	35,9	0,147	105,0
Staniu	0,147	37,3	0,137	59,8
Bronz	0,155	47,8	0,104	100,0
Alamă	0,155	41,5	0,234	100,0

Cu cât traiectoria particulei topite - de la formarea ei și până la depunere este mai scurtă, cu atât crește aderența acesteia. Din acest motiv primele straturi se depun de la distanța de 80-90 mm, iar straturile următoare, de la minimum 120 mm.

Acoperirea prin metalizare a suprafețelor se poate face prin următoarele modalități:

- pulverizarea cu flacără de gaz a materialului de acoperire care poate fi sub formă de pulbere, sârmă sau vergea;
- pulverizarea cu arc electric, iar materialul de acoperire este sub formă de sârmă sau vergea;
- pulverizarea cu plasmă, iar materialul de acoperire este sub formă de pulbere metalică.

2.2 Procedee de lipire a tablelor subțiri

Lipirea este o îmbinarea nedemontabilă a două piese metalice, din același metal sau din metale diferite, cu ajutorul unui metal sau aliaj de adaos (de lipire), adus în stare fluidă prin încălzire la o temperatură inferioară celei de topire a materialului pieselor de îmbinat, cu care formează soluții solide (aliaje).

Lipirea se numește moale dacă temperatura de topire a metalului sau a aliajului de adaos este sub 450 °C; dacă materialul de adaos are o temperatură de topire mai mare de 450 °C, atunci lipirea se numește tare sau brazare. În ambele cazuri temperatura de topire a materialului de adaos trebuie să fie mai mică decât temperaturile punctelor de topire ale materialelor de bază. Îmbinarea prin lipire se realizează prin difuzia materialului de adaos, în materialul pieselor de bază, prin efectul de capilaritate, după ce materialul de adaos a fost adus în stare lichidă. Piesele de lipit, încălzite și ele la temperatura de topire a materialului de adaos, rămân tot timpul operației de lipire în stare solidă.

Procesul de difuzie este în general lent, însă prin topirea metalului de adaos, acesta pătrunde repede în metalul de baza; difuzia este cu atât mai mare, cu cât metalele de lipit au temperaturi de topire mai înalte, iar gradul de solubilitate a metalelor de bază și de adaos este mai mare. Prin difuzie se produce interacțiunea prin pătrunderea atomilor metalelor de adaos în metalele de bază, iar după răcire se formează lipitura. Prin difuzia aliajului de adaos în metalele de bază se obține adeziunea necesară datorită soluțiilor (aliajelor) solide formate, realizându-se astfel legătura metalică între piesele de îmbinat. Această legătură metalică, împreună cu constrângerile geometrice care i se impun materialului de adaos de către metalele de bază, fac ca îmbinarea să aibă o rezistență mecanică mai mare decât rezistența materialului de adaos. Pentru aceasta este necesar însă, ca metalul de adaos să aibă o bună aderență cu metalul de bază.

Aliajele de topire moi, standardizate în țara noastră, sunt pe bază de staniu-plumb și staniu-plumb-stibiu (STAS 96-73). Ele sunt simbolizate prin grupa de litere Lp (prescurtare de la lipire), urmată de un număr care indică conținutul mediu de staniu și literele Sb, în cazul când conțin minim 1% stibiu. Astfel, aliajul Lp 20 Sb conține 20% Sn, circa 1% Sb, restul plumb.

Aliajele de plumb-staniu sunt Lp 30, Lp 37, Lp 40, Lp 50, Lp 65 și Lp 90 cu temperaturi de topire cuprinse între 256 și 183 °C, temperatura descrescând odată cu creșterea conținutului de staniu, iar aliajele de staniu-plumb-stibiu sunt: Lp 20 Sb, Lp 30 Sb și Lp 40 Sb cu temperaturi de topire cuprinse între 270 și 235 °C. Ele sunt destinate lipiturilor de uz general din oțel, cupru, alamă, la conductoare, piese de

aparate electrice, radio, etc. Aliajul Lp 90 cu 90% Sn este destinat pentru lipituri speciale la aparate sanitare, vase alimentare, cutii de conserve etc. Caracteristicile mecanice sunt reduse, rezistența la tracțiune variind între 3 și 6 daN/mm².

În afară de aliajele de lipire pe bază de Pb-Sn și Pb-Sn-Sb, se mai folosesc alte aliaje moi cu temperaturi de topire sub 150 °C sau peste 300 °C cum sunt: Zn-Al-Cu-Cd; Zn-Al-Cu; Zn-Pb; Zn-Al; etc.

Lipituri metalice tari, realizate cu ajutorul metalelor sau aliajelor greu fuzibile au punctul de topire peste de circa 850°C. Lipiturile tari se utilizează pentru îmbinări supuse la solicitări mecanice mai importante, cum ar fi: îmbinarea țevilor în instalațiile de aer comprimat sau hidraulice (de apă, de combustibil, de ulei, etc.) utilizate în construcții navale, autovehicule, aeriene, la instalații chimice, etc. În construcția de mașini, lipiturile tari se execută cu alamă de lipit conținând 58-62% cupru iar restul zinc, eventual cu adaos de siliciu sau de staniu. Aliajul pur se utilizează la lipirea oțelurilor iar cel cu adaos de siliciu sau de staniu se utilizează la lipirea fontelor și a oțelurilor.

În tabelul 2.8 se dau compozițiile unor aliaje și domeniile de aplicații ale acestora.

Tabelul 2.8. Aliaje de lipit și compozițiile acestora

Compoziția aliajelor de lipire [%]					Punctul de topire[°C]	Aplicații
Staniu	Plumb	Argint	Zinc	Stibiu		
-	96	4	-	-	305	Îmbinări pentru temperaturi mari
60	40	-	-	-	188	Circuite electronice
50	50	-	-	-	199	Îmbinări cabluri
40	60	-	-	-	208	Lipituri radiatoare
91	-	-	9	-	200	Îmbinări cabluri de Al
95	-	-	-	5	238	Lipiri cu Pb

Fonta se mai poate lipi și cu metalul monel, iar la îmbinările prin lipire tare a oțelurilor, mai importante, se utilizează aliaje speciale din argint și cadmiu.

Comparativ cu îmbinările prin sudură, îmbinările prin lipire nu introduc tensiuni interne deoarece nu presupun încălzirea până la plasticizare a pieselor în zona îmbinării. De asemenea, din punct de vedere mecanic și termic, îmbinările prin lipire sunt mai puțin rezistente decât îmbinările prin sudură.

2.3 Procedee de sudare utilizate la îmbinarea tablelor subțiri

Principalele procedee de sudare utilizate pentru îmbinarea tablelor subțiri, din oțel de uz general S 235 JR, domeniu care constituie obiectul principal de studiu al cercetărilor întreprinse în cadrul acestei lucrări, sunt:

- sudarea manuală cu electrozi înveliți;
- sudarea în mediu de gaz protector cu electrod fuzibil, MIG/MAG.

Aceste două abrevieri provin din limba engleză: metal inert gaz (MIG), respectiv metal activ gaz (MAG), ele constituind două variante ale procedurii de sudare cu arc în mediu de gaz (din limba engleză: gaz metal arc welding = GMAW).

- Sudarea în mediu de gaz protector cu electrod nefuzibil, WIG/TIG, din abrevierea wolfram inert gaz, respectiv tungsten inert gaz;
- Sudare prin presiune în puncte sau în linie.

Aspecte privind problemele ridicate de îmbinările prin sudură ale tablelor subțiri, cât și procedee de îmbinare prin sudare ale tablelor subțiri și ale tablelor subțiri din oțeluri acoperite sunt prezentate în lucrările [24, 25].

2.3.1 Sudarea manuală cu electrozi înveliți

Sudarea tablelor de grosimi mici, prin procedeul de sudarea cu electrozi înveliți, depinde de priceperea sudorului. Dacă sudarea se face în poziție orizontală (PA), conform SR ISO 6947, tablele subțiri se pot suda fără operații de prelucrare a marginilor. Îmbinările se pot face folosind rosturi în I (fig. 2.1.a), rosturi în I cu suport de oțel la rădăcină (fig.2.1.b), îmbinare în colț (fig.2.1.c) și îmbinare în colț cu suprapunere laterală (fig.2.1.d).

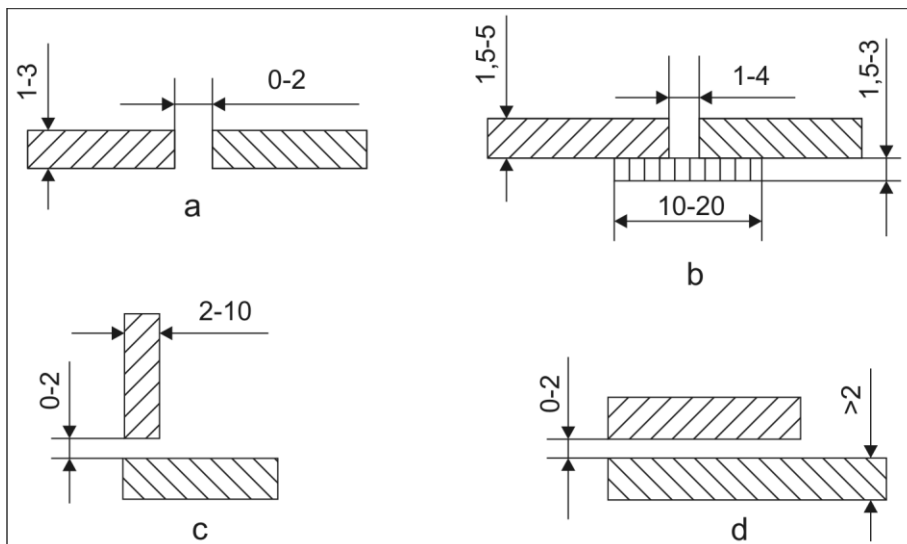


Figura 2.1. Tipuri de rosturi utilizate la sudarea tablelor subțiri cu electrozi înveliți
a. sudură cap la cap în I; b. sudură cap la cap pe suport de oțel; c. sudură în colț;
d. sudură în colț prin suprapunere

La sudarea manuală cu electrozi înveliți formele rosturilor sunt standardizate [23].

Pentru table cu grosimi cuprinse între 1mm și 3 mm se aleg electrozi cu diametrul de $d_e = 1,6 \text{ mm}$; 2mm; 2,5mm, iar numărul de treceri este de $n_t = 1$. Curentul de sudare este în funcție de diametrul electrodului, iar pentru diametrele cuprinse între 1,6mm și 2,5mm acesta variază între 30 A și 90A.

În cazul sudării în poziție verticală (PF), respectiv (PG) sau peste cap (PE), curentul de sudare se micșorează cu aproximativ 10% - 25%, față de sudarea în poziție orizontală. Tensiunea arcului U_a este cuprinsă între 18V și 20V.

2.3.2 Sudarea în mediu de gaz protector cu electrod fuzibil, MIG/MAG

Sudarea în mediu de gaz protector se împarte în două mari categorii: sudarea în mediu de gaz inert și sudarea în mediu de gaz activ. Aceste două procedee pot fi la rândul lor semimecanizate sau mecanizate; prin intermediul unui

pistolet fiind aduse, la locul de sudare, gazul de protecție și electrodul fuzibil sub formă de sârmă. În cadrul procedurii de sudare MIG/MAG este uzual utilizată o sursă de curent continuu, cu tensiune constantă. La acest procedeu sunt trei moduri principale de transfer a metalului: transferul prin scurt circuit - short-arc, transferul fără scurtcircuit - spray-arc, respectiv transferul intermediar; fiecare dintre aceste moduri de transfer conferind anumite proprietăți particulare și avantaje. Sudarea MIG/MAG este un procedeu de sudură în care căldura necesară sudurii se obține prin intermediul arcului electric ce se produce între materialul de adaos și cel de bază. Baia de sudură este alimentată continuu cu material de adaos și este protejată cu un gaz ce poate fi inert (MIG) sau activ (MAG). În situația în care se utilizează material de adaos sârma cu miez de flux, procedeu de sudură se numește sudură cu sârmă tubulară.

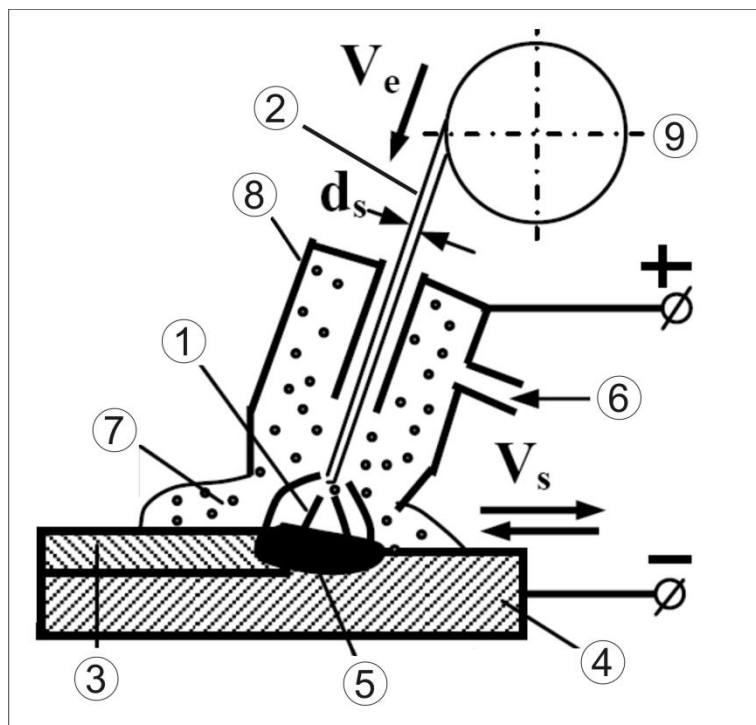


Figura 2.2. Schema de principiu a procedurii de sudare MIG/MAG

O schemă de principiu a procedurii de sudare MIG/MAG este prezentată în figura 2.2 și reprezintă o variantă prelucrată din lucrările [26, 27].

Arcul electric 1 este amorsat între sârma electrod 2 și componentele de bază 3 și produce topirea acestora formând baia de metal 5. Gazul de protecție este adus în zona de sudare prin duza 6 dintr-o butelie și realizează protecția atât a arcului cât și a băii de metal. Sârma electrod este antrenată prin tubul de ghidare cu viteza de antrenare constantă v_e de către sistemul de avans prin derulare de pe bobina 9. Alimentarea cu energie electrică a arcului se face de la sursa de curent continuu printr-o duză de contact și prin cablul de punere la masă. Tubul de ghidare a sârmei electrod, cablul de alimentare cu energie (+) și furtunul de gaz sunt montate într-un furtun flexibil de cauciuc care, împreună cu capul de sudare, formează pistolul de sudare.

Sursele de curent continuu sunt utilizate pentru sudarea de tip MIG-MAG deoarece asigură o valoare constantă a curentului de sudură, fapt ce asigură o bună stabilitate a arcului electric. Prin reglarea curentului de sudare și a vitezei de avans a sârmei se obține transferul picăturilor de metal topit în două moduri: "short arc" sau „spray arc”.

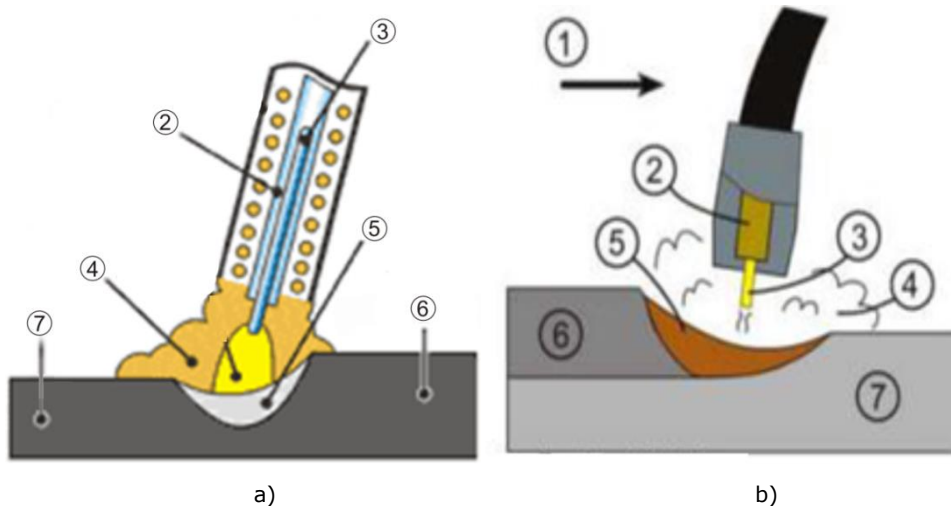


Figura 2.3 Zona de lucru a arcului electric la procedeul MIG/MAG

Zona de lucru în procedeul MIG/MAG este prezentată schematic în figura 2.3 a și figura 2.3.b. S-au făcut următoarele notații: 1 este direcția de sudare, 2 duza de contact, 3 sârma de sudare, 4 gazul de protecție, 5 baia de metal topit, 6 cusătura sudată și 7 metalul de bază.

Procedeul de sudare MIG/MAG se poate aplica următoarelor categorii de metale:

- **Oțelurile carbon obișnuite**, care se sudează cu curent continuu și cu polaritate inversă. Ca gaz protector se utilizează dioxidul de carbon sau amestecuri de argon cu dioxid de carbon în diferite proporții (cel mai des utilizat este 80% Argon, 20% CO₂). Utilizarea de sârmă aliată cu siliciu sau mangan va favoriza evitarea oxidării materialului de bază.
- **Oțelurile inoxidabile** se sudează în curent continuu și cu polaritate inversă. Gazul protector este un amestec de argon cu 2-4% CO₂ sau argon cu 1-3% oxigen.
- **Aluminiul și aliajele sale** se sudează cu curent continuu sau curent continuu pulsant cu polaritate inversă. Gazul protector utilizat este argonul pur sau un amestec de argon și heliu.
- **Alte metale.** Prin procedeul MIG-MAG pot fi sudate și alte metale cum ar fi nichelul, cuprul sau aliajele lor. Se sudează în curent continuu cu polaritate inversă. Prin procedeul de sudură MIG-MAG se pot suda, în general, materiale metalice având grosimea de maxim 5-6 mm. Pentru grosimi mai mari se recomandă utilizarea procedeului de sudură TIG.

O aplicație specifică sudării în mediu de gaz protector MIG/MAG este sudarea tablelor subțiri. Principalele tipuri de îmbinări ce se pot suda prin procedeul MIG/MAG sunt: îmbinări cap la cap, cu sau fără suport, sudate pe o parte sau pe ambele părți, îmbinări în colț sau îmbinări suprapuse.

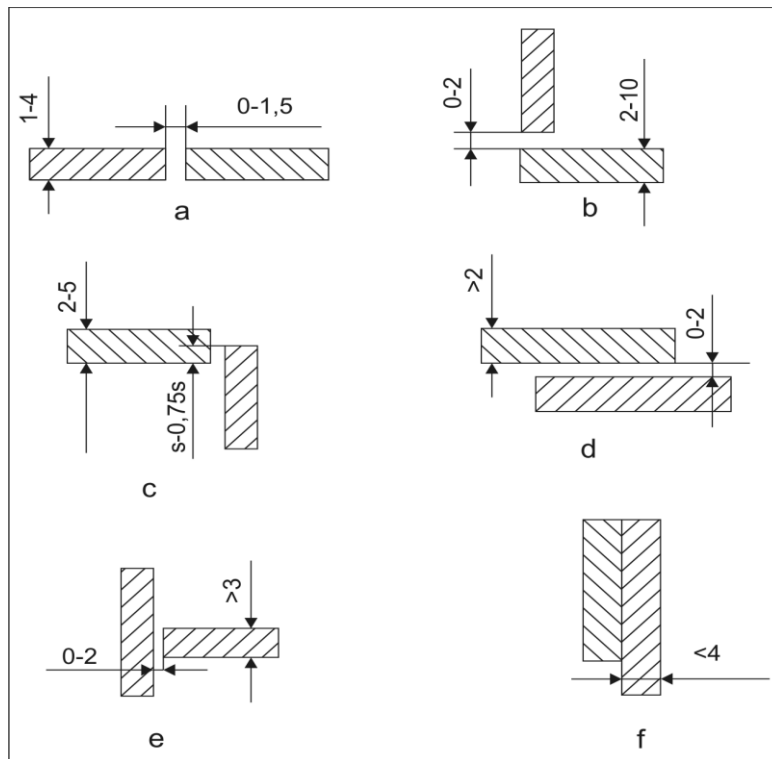


Figura 2.4. Tipuri de rosturi utilizate la sudarea tablelor subțiri în mediu de gaz protector cu electrod fuzibil, MIG/MAG

a. sudură cap la cap cu rost în I; b. sudură în colț; c. sudură în colț pe muchie; d. sudură în colț prin suprapunere; e. sudură în colț în T; f. sudură frontală

La sudarea în mediu de gaz protector a tablelor subțiri se utilizează rosturile prezentate în figura 2.4.

Grosimea tablelor ce se pot suda prin acest procedeu este cuprinsă între 0,5 mm și 3 mm, iar diametrul sârmei de sudare este între 0,6mm – 1mm. La sudarea tablelor subțiri este recomandată varianta de sudare cu transfer de material prin scurtcircuit. Metoda de sudare este aplicată prin sudare spre stânga sau prin "prin împingere".

Deoarece curentul de sudare I_s depinde de grosimea componentelor ce se sudează, acesta poate să varieze în limite largi, într-un domeniu cuprins între 40 A și 75 A pentru table a căror grosime este de $s = 1$ mm, respectiv, acesta poate fi cuprins într-un interval de la 80 A la 190 A pentru table a căror grosime este de 3 mm. Valori orientative ale curentului de sudare și ale tensiunii arcului sunt prezentate în tabelul 2.9.

Tabelul 2.9. Curentul de sudare și tensiunea arcului în funcție de diametrul sârmei de electrod la sudarea MAG

d_s [mm]	0,6	0,8	1,0
I_s [A]	30 - 70	60 - 160	80 - 180
U_s [V]	13 - 18	17 - 21	19 - 24

La sudarea în pozițiile PC, PD, PE, PF și PG valorile tensiunii arcului U_a trebuie să fie mai mici cu 1 – 3 V. La sudare în mediu de gaze în amestec Ar și CO_2 , tensiunea arcului scade cu aproximativ 1 – 3V.

Viteza de sudare v_s , pentru diametre ale sârmei $d_s = 0,8 - 1\text{mm}$ poate să varieze în limitele 18 - 60m/h, la sudarea mecanizată, sau între 5 – 26m/h la sudarea semimecanizată.

Viteza de avans v_a , a sârmei electrod determină curentul de sudare și depinde de diametrul sârmei electrod, putând să varieze între 1,8 m/min și 18 m/min.

Debitul de gaz depinde de tipul gazului de protecție utilizat, de curentul de sudare, de forma îmbinării etc. În general, la sudarea cu arc în scurtcircuit sunt suficiente debite de gaze de $D_g = 8 - 15 \text{ l/min}$.

2.3.4 Sudarea în mediu de gaz protector cu electrod fuzibil, MIG/MAG, în curent continuu pulsator

O variantă a procedurii MIG/MAG foarte utilizată în sudarea tablelor subțiri din oțel de uz general S 235 JR este sudarea în curent continuu pulsator. Curentul pulsator forțează desprinderea rapidă a picăturilor de metal topit de pe materialul de adaos. Pentru realizarea stabilității arcului electric se impune o reglare precisă a curentului de sudare și a vitezei de avans (Figura 2.5). Sudarea în curent continuu pulsator se poate face cu polaritatea directă sau cu polaritate inversă.

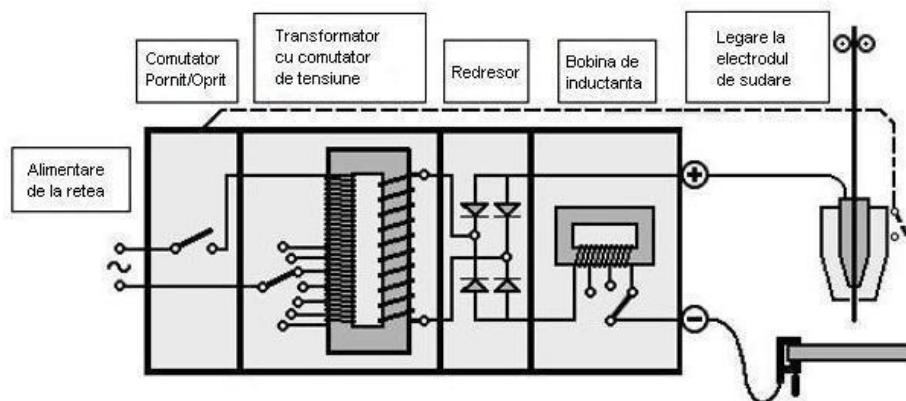


Figura 2.5 Schema unei surse de c.c. cu reglare în trepte pentru sudarea MIG/MAG

În cazul sudării cu polaritatea directă, pistolul este conectat la polul negativ al sursei și piesa de sudat la polul pozitiv. Acest tip de legătură este utilizat la sudura sub strat de flux (FLUX). În cazul sudării cu polaritatea inversă, pistolul este conectat la polul pozitiv al sursei și piesa de sudat este conectată la polul negativ.

Deosebirea fundamentală dintre sudarea MIG/MAG în impulsuri de curent continuu și sudarea MIG/MAG clasică constă în faptul că la acest procedeu, curentul de sudare nu mai este constant în timp, ci variază periodic între o valoare maximă, numită curent de puls, și o valoare minimă, numită curent de bază. Această variație are loc cu o anumită frecvență determinată de cele două intervale de timp.

În intervalul de timp în care curentul este maxim, numit timp de puls t_p sau timp cald, valoarea mare a curentului de puls I_p determină topirea rapidă și desprinderea, sub efectul forțelor electromagnetice, a picăturilor de metal de dimensiuni mici fără scurtcircuitarea arcului electric. Are loc un proces asemănător transferului de metal prin pulverizare. În intervalul de timp în care curentul are o valoare minimă, numit timp de bază t_b sau timp rece, curentul de bază I_b asigură întreținerea stabilă a arcului, fără însă să se producă topirea sârmei și deci, fără să se realizeze picături. Valoarea medie a intensității curentului pulsator se situează, în funcție de valorile I_p și I_b , în domeniul intensității curentului de la transferul prin scurtcircuit sau corespunzătoare sudării clasice prin curent continuu (Figura 2.6).

Intensitatea curentului de puls I_p trebuie să aibă o valoare mai mare decât valoarea intensității curentului critic sau de tranziție I_{tr} , pentru a asigura transferul prin pulverizare a picăturii de metal topit.

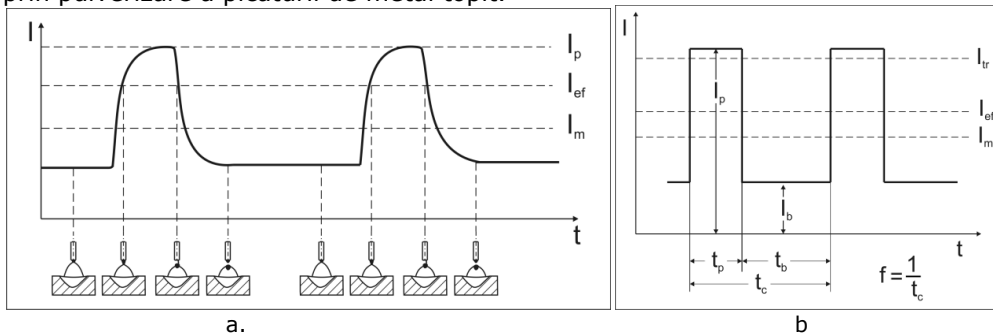


Figura 2.6. Sudarea MIG/MAG în impulsuri
a. principiul procedeei de sudare în curent continuu pulsator; b. parametrii curentului pulsator.

Valoarea ridicată a intensității curentului de puls I_p face posibilă topirea vârfului sârmei electrod, iar sub acțiune forței electromagnetice, care va fi și ea mare, are loc desprinderea picăturii de metal la dimensiuni mici ale acesteia, în mod asemănător transferului prin pulverizare. Valoarea ridicată a intensității curentului de puls face ca arcul electric să fie stabil. Din aceste puncte de vedere este de dorit ca acest curent de puls să aibă valoarea intensității cât mai mare. În același timp, o valoare prea mare a intensității curentului de puls face ca presiunea dinamică a plamei arcului să crească foarte mult, ceea ce poate să provoace perforarea tablei sau apariția unor defecte de tipul creștăturilor marginale. Totodată, trecerea picăturii în baie cu viteze mari poate conduce la împrăștierea metalului topit, pe de o parte, iar pe de altă parte curenții de puls, cu valori mari ale intensității, conduc la uzuri premature ale duzelor de contact și la creșterea nivelurilor de zgomot.

Curentul de bază I_b asigură stabilitatea arcului în intervalul de timp t_b interval în care, datorită valorii mici a intensității curentului, acesta s-ar putea stinge. Valoarea intensității curentului de bază este prea mică pentru a asigura topirea sârmei electrod și cu atât mai mult să aibă loc desprinderea picăturii. Totuși, în acest interval de timp are loc o dezvoltare de căldură prin efect Joule – Lenz în vârful sârmei electrod, căldură care va favoriza topirea acesteia în intervalul de timp t_p . În sudarea în curent continuu pulsator este foarte important să se obțină o valoare medie a intensității curentului cât mai scăzută, ceea ce implică o valoare a curentului de bază I_b , cât mai mică. Totuși, în procesul de sudare valoarea intensității curentului de bază nu rămâne constantă, ea se modifică în limite mici, după o variație liniară proporțională cu viteza de avans v_a a sârmei electrod.

În tabelul 2.10. se prezintă domeniile de variație ale principalilor parametri ai curentului continuu pulsator, parametri folosiți în instalațiile de sudare folosite în practică.

Tabelul 2.10. Domeniile de variație ale parametrilor curentului continuu pulsatoriu

Nr.crt.	Denumirea parametrului	Simbolul	Domeniul de variație
1	Curentul de puls	I_p	(300 - 500) A
2	Timpul de puls	t_p	(2 - 5) ms
3	Curentul de bază	I_b	(30 - 100)A
4	Timpul de bază	t_b	(2 - 20)ms
5	Frecvența pulsurilor	$f_p=1/(t_p+t_b)$	(50 -300)Hz

2.3.5 Sudarea în mediu de gaz protector cu electrod nefuzibil, WIG/TIG

Sudarea în mediu protector de gaz cu electrod nefuzibil din wolfram sau tungsten este un procedeu de sudare în care căldura necesară sudării este furnizată de arcul electric ce se produce între electrodul nefuzibil și piesa de sudat. Abrevierea WIG/TIG este de la cuvintele din limba engleză, wolfram inert gaz, respective tungsten inert gaz. Sudarea manuală WIG/TIG este adeseori considerată ca fiind cel mai dificil procedeu de sudare din punct de vedere practic, deoarece sudorul trebuie să mențină o lungime mică a arcului electric, iar pentru aceasta este necesară o atenție sporită și o bună îndemânare, urmărind evitarea contactului dintre electrod și piesele de sudat.

Spre deosebire de celelalte procedee de sudare, acest procedeu necesită din partea operatorului să folosească ambele mâini, deoarece majoritatea aplicațiilor necesită ca sudorul să aducă cu o mână material de adaos, în baia de metal topit, iar cu cealaltă mână să manevreze pistolul. Totuși, la realizarea îmbinării dintre două materiale subțiri nu este necesară folosirea de material de adaos. Pentru a aprinde arcul electric este nevoie de un generator de curent de înaltă frecvență care să creeze o cale curentului de sudare prin gazul de protecție, permițând arcului să se aprindă când distanța dintre electrod și piesa de sudat este de aproape 1,5 - 3mm.

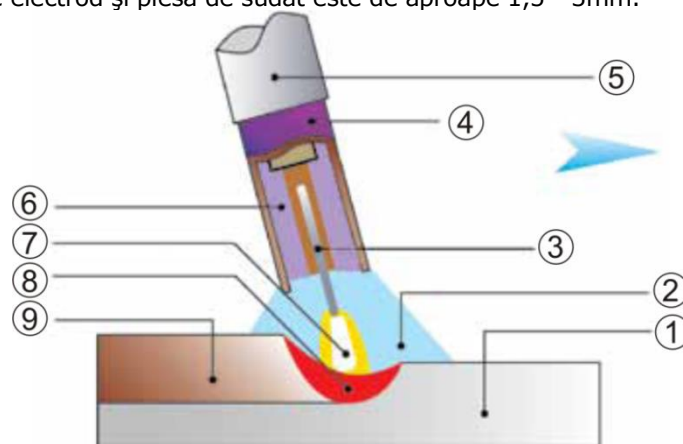


Figura 2.7 Procesul de sudare WIG/TIG în mediu de gaz protector

Odată aprins arcul electric sudorul mișcă pistolul circular pentru a forma baia de metal topit, mărimea acesteia depinzând de mărimea electrodului și de densitatea de curent. În timp ce menține constantă lungimea arcului, sudorul înclină pistolul până la aproximativ 10-15° față de verticală. Materialul de adaos este introdus manual în baia de metal topit (dacă este necesar). Sudorii, adesea, dezvoltă o tehnică rapidă de mișcare a pistolului și de aducere de material de adaos în baia de metal topit. Când procesul de sudare este aproape finalizat, intensitatea arcului este treptat redusă pentru a permite solidificarea craterului final și a preveni apariția fisurilor la capătul îmbinării sudate. Electrocul nefuzibil este fabricat din tungsten /wolfram sau dintr-un aliaj de wolfram. Baia de sudură este protejată de un gaz inert ce este adus în zona de sudură prin intermediul duzei de gaz. Sudura WIG/TIG poate fi:

- fără material de adaos, când sudarea se realizează prin topirea locală a materialelor ce urmează a fi sudate;
- cu material de adaos, când sudarea se realizează prin topirea locală a materialului de baza și a materialului de adaos.

Procedeele de sudare WIG/TIG este utilizat în special pentru sudarea oțelurilor inoxidabile și a materialelor neferoase cum ar fi aluminiul și cuprul, poate fi aplicat însă și pentru sudarea tuturor metalelor. Sudarea oțelurilor carbon este limitată din cauza restricțiilor procedeei și mai ales din cauza existenței altor procedee de sudare, mult mai eficiente din mai multe considerente, în principal cel economic. De asemenea, procedeele pot fi aplicate în toate pozițiile de sudare depinzând cel mai mult de îndemânarea sudorului. În principal procedeele TIG se utilizează pentru sudarea oțelului inoxidabil, nichelului, cuprului, aluminiului, magneziului și aliajelor acestora.

Zona de sudare din procesul de sudare WIG/TIG este prezentată în figura 2.7, în care s-au făcut următoarele notații: 1 metalul de bază, 2 gazul de protecție a metalului topit, 3 electrodul nefuzibil, 4 duza de sudare, 5 pistolul de sudare, 6 alimentarea cu gaz de protecție, 7 arcul electric, 8 baia de metal topit, 9 cusătura sudată.

Pentru tablele subțiri, având grosimea $s \leq 3\text{mm}$, sudarea prin procedeele de sudare în mediu de gaz protector cu electrod nefuzibil WIG/TIG, în cazul îmbinărilor cap la cap, fără material de adaos, se poate face cu rost neprelucrat în I, (fig. 2.8.a) respectiv cu un rost având deschiderea de 0 – 0.5 mm la sudarea cu material de adaos (fig.2.8.b).

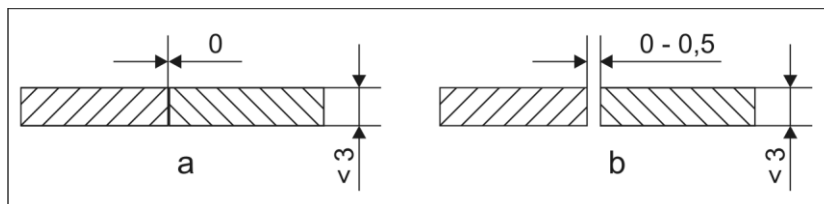


Figura 2.8. Tipuri de rosturi la sudarea WIG a tablelor subțiri
a. sudură cap la cap în I fără rost; b. sudură cap la cap în I cu rost

Parametrii tehnologici, recomandați în procedeele de sudare în mediu de gaz protector cu electrod nefuzibil WIG/TIG, sunt dați în tabelul 2.11 [28]. În acest tabel s-au făcut următoarele notații: s este grosimea tablei, d_e este diametrul sârmei de adaos, d_w este diametrul electrodului de wolfram, I_s este intensitatea curentului de sudare, D este diametrul duzei, D_g este debitul gazului inert.

Tabelul 2.11. Parametrii de sudare pentru sudarea tablelor subțiri prin procedeul WIG/TIG

s[mm]	d _e [mm]	d _w [mm]	I[A]	D[mm]	D _g [l/min]
1	1	1	30 - 60	6	6
1,5	1,5	1 - 1,6	50 - 100	8	8
2	1,5 - 2	1 - 1,6 -	60 - 100	8	8
3	2 - 3	1,6 - 2	90 - 150	8 - 10	8 - 10

Valorile intensității curenților de sudare în pozițiile PC, PD, PE conform SR ISO 6947/1994 se diminuează cu 10% - 20%. În ceea ce privește tipul curentului recomandat pentru sudarea tablelor subțiri este curentul continuu cu polaritate directă. Dacă sudarea este cu material de adaos, atunci materialul de adaos se alege sub formă de vergea metalică, având o compoziție similară cu cea a materialului de bază și care va ajunge în baia topită.

O variantă a sudării WIG/TIG aplicabilă în special pentru sudarea tablelor subțiri este sudarea în curent continuu pulsator, similar procedurii MIG/MAG. Acest procedeu prezintă avantajul că prin ajustarea nivelurilor parametrilor de sudare : valoare intensității curentului de puls I_p , valoarea intensității curentului de bază I_b , timpul de puls t_p , și timpul de bază t_b , este posibilă o dozare a energiei introduse în zona de sudare. Topirea materialului și formarea băii lichide au loc în intervalul timpului de puls, iar în intervalul de bază se menține stabilitatea arcului, realizându-se o răcire cu o solidificare parțială, dar și posibilitatea amorsării arcului la începerea unui nou ciclu. Astfel, la aceeași valoare medie a intensității curentului, în cazul sudării în curent continuu pulsator se realizează o pătrundere mai mare decât în cazul sudării în curent continuu. Pe de altă parte energia introdusă în material este mai redusă, iar prin aceasta caracteristicile materialului sunt mai puțin afectate. Totodată tensiunile și deformațiile produse prin sudare au valori mai reduse. Intensitatea curentului de puls este de 1,5 - 2,5 ori mai mare decât intensitatea curentului utilizat la sudarea clasică. Intensitatea curentului de bază este aproximativ un sfert din curentul de puls.

2.3.6 Sudarea electrică prin presiune în linie

Sudarea prin presiune este procedeul cel mai utilizat la sudarea tablelor subțiri din oțel de uz general S 235 JR, datorită avantajelor deosebite. Procedeul de sudare prin presiune se pretează la producția de masă, reduce timpul de îmbinare, reduce consumul de metal și de energie, se pretează la mecanizarea procesului, are un preț scăzut, iar piesele rezultate au o calitate superioară și un aspect frumos. Sudarea prin presiune se caracterizează prin încălzirea locală a pieselor de la o sursă electrică, prin efect Joule - Lenz, urmată de acțiunea forțelor de apăsare. Efectul Joule Lenz se produce prin rezistența electrică locală dintre suprafața pieselor în contact.

La procedeul de sudare a tablelor subțiri, prin presiune în linie, se aplică și sudarea cap la cap cu material de adaos sub formă de platbandă. Platbanda poate fi pe o parte sau pe ambele părți ale tablelor de sudat. (fig.2.9) În cadrul acestui procedeu, între rolele de contact 2 și tablele 1 se introduce o platbandă 3 de grosime 0,2 - 0,5 mm și lățime de 4 mm. Tablele sunt strânse cu forțele F_1 și F_2 . Aceste forțe de strângere se realizează prin poziționarea tablelor pe o masă magnetică.

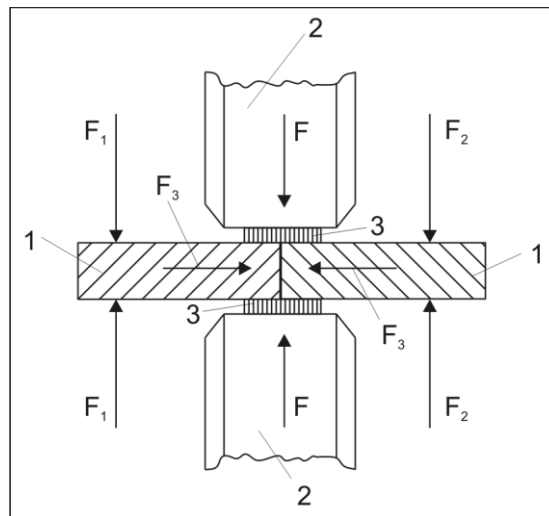


Figura 2.9. Sudarea prin presiune în linie a tablelor subțiri
1-piesa de sudat; 2-role de presare; 3-platbandă

Curentul de sudare trece prin rolele de contact și va topi marginile tablelor de sudat. Datorită forței de presare F_3 care apare în urma dilatării împiedicate a celor două componente, se formează îmbinarea sudată. Sub acțiunea forței de presare F , platbandele se presează în materialul de bază, rezultând o îmbinare mai groasă decât materialele care se sudează. Îmbinările sudate astfel au caracteristici mecanice bune. Rezistența la rupere este mai mare decât cea a materialului de bază, doar rezistența la oboseală se diminuează cu 10%.

Modul de desfășurare și fazele electrice și mecanice ale sudurii electrice prin presiune sunt prezentate în figura 2.9. Acestea sunt:

- faza I este faza de amorsare, care se caracterizează prin creșterea forței de apăsare F de la valoarea 0 până la valoarea la care se realizează strângerea pieselor;
- faza II este faza electrică și mecanică, în care strângerea rămâne constantă și peste ea se suprapune faza electrică, de încălzire a pieselor;
- faza III este faza de deformare plastică, caracterizată prin creșterea forței și producerea deformărilor plastice;
- faza IV corespunde dezamorsării.

Cantitatea de căldură dezvoltată este proporțională cu pătratul intensității, cu rezistența electrică și cu timpul. Regimul electric folosește valori foarte mari ale intensității curentului electric, de ordinul zecilor sau sutelor de kA. Durata de aplicare este foarte mică, sub 1s, iar rezistența de contact este cât mai mare, pentru a se concentra toată energia calorică, în timp ce rezistența între electrozi este mai mică, pentru a ușura trecerea curentului electric. Electrozii se fac din cupru aliat cu diferite elemente care îi măresc duritatea și rezistența la uzură. Deoarece în timpul procesului de sudare se încălzesc foarte tare, aceștia sunt prevăzuți cu circuite de răcire cu apă.

Procedeele de sudare prin presiune în linie se poate aplica la sudarea oțelurilor nealiate, slab aliate și aliate cu Cr – Ni. Sudarea prin presiune în linie necesită o pregătire riguroasă a componentelor. La montarea cap la cap a celor

două componente este necesar un rost de cel mult 0,4 mm. În caz contrar sudura este compromisă.

Parametrii care caracterizează procesul de sudare prin presiune în linie sunt: valoarea intensității curentului de sudare și variația în timp a acesteia, viteza de sudare, forma rolor de contact, valoarea forței de presiune, iar în cazul sudării în impulsuri, timpul de curent și timpul de pauză dintre impulsuri. Parametrii de sudare recomandați la sudarea prin presiune în linie, pentru oțeluri nealiat și slab aliate cu curent de sudare constant și curent de sudare în impulsuri sunt dați în tabelul 2.12, [29].

Tabelul 2.12. Parametrii de sudare recomandați pentru sudarea în linie a tablelor subțiri din oțeluri nealiat și slab aliate

Grosimea table s[mm]	Forța de presare F[kN]			Viteza de sudare v _s [m/min]			Curentul de sudare I _s [kA]			Timp de puls t _p [s]
	continuu		cu impuls	continuu		cu impuls	continuu		Cu imp.	
	min	max		min	max		min	max		
0,25	1,5	1,8	-	6,1	12	-	10	8	-	-
0,5	2,0	2,4	2,4	5,3	11	2,0	12	9	10	2
0,75	2,3	2,9	3,2	4,7	10	2,0	13	10	12	2
1,0	2,7	4,0	4,0	3,7	8	1,75	14	11	14	3
1,25	3,1	4,5	4,8	3,1	7	1,75	17	12	16	4
1,5	3,4	5,3	5,0	2,2	5	1,5	17	14	17	4
2,0	4,0	6,0	6,0	3	1,5	1,5	17	15	19	6
2,5	-	-	7,0	-	-	1,5	-	-	20	7
3	-	-	8,0	-	-	1,1	-	-	22	10

2.3.7 Sudarea CMT a tablelor subțiri

Tehnologia CMT (Cold Metal Transfer) este o tehnologie de vârf aplicată în domeniul sudării tablelor subțiri, în cadrul îmbinărilor sudate din construcția de autovehicule, a instalațiilor termice și de climatizare, -îmbinări ultrasensibile și puncte nevralgice pentru siguranța în funcționare -, în industria electronică și în fabricarea unor piese complexe prin îmbinări de semifabricate. Acest procedeu se datorează firmei **Fronius International GmbH**, care l-a implementat într-o instalație pe care a pus-o în practică începând cu anul 2005, iar în anul 2009 a obținut un patent USA [30]. Procedeu de sudare la rece prin transfer de metal, se caracterizează printr-o alternanță ciclică a unei faze de arc și a unei faze de scurtcircuit. În timpul fazei de arc, sârma electrod de sudare este deplasată spre piesa de lucru până când intră în contact cu aceasta, iar în timpul fazei de scurtcircuit de sudare deplasarea sârmei este inversată și electrodul de sudură este îndepărtat de piesă. Curentul de sudare și / sau tensiunea de sudare sunt controlate în timpul fazei de arc într-un astfel de mod încât sârma electrod se topește, formând o picătură și care în timpul fazei de rupere a arcului de scurtcircuit este desprinsă prin intermediul curentului de sudare.

Acest procedeu de sudare are câteva elemente caracteristice prin care se deosebește de alte procedee de sudare, și anume:

- reglarea lungimii arcului electric;
- asigurarea aportului de căldură.

Reglarea lungimii arcului se realizează prin retragerea periodică a sârmei de sudare constituie de fapt esența de reglare a tehnologiei CMT. Prin asigurarea unui contact direct dintre sârma electrod și metalul de bază, se asigură o distanță reglementară a sârmei față de piesă. Acest procedeu furnizează un control mai

exact decât procedeul de control bazat pe determinarea tensiunii arcului, procedeu utilizat în sudarea electrică clasică, deoarece tensiunea poate fi viciată de existența unor impurități la suprafața piesei de bază.

Asigurarea aportului de căldură se realizează prin reglarea digitală a „recunoașterii” scurtcircuitelor produse la retragerea sârmei și desprinderea picăturilor de pe capătul metalului de adaos. Transferul de metal se face aproape fără curent și imprimă procesului de sudare un ritm tipic de „fierbinte – rece – fierbinte-rece”. În perioada de ardere a arcului, perioada fierbinte, curentul electric dezvoltă o căldură atât în metalul de bază cât și în metalul de adaos. În intervalul de timp în care are loc retragerea sârmei electrod, practic această căldură nu se produce, este denumită și perioada rece. În perioada rece are loc transferul unei singure picături în baia topită, realizându-se o îmbinare omogenă din punct de vedere metalurgic la un transfer minim de căldură. Acest transfer de metal, care se face la „rece”, a dat denumire noului procedeu (Cold Transfer Metal - Transfer de Metal la Rece). În comparație cu sudarea MIG/MAG, folosind aceleași valori ale energiei arcului, la procesul CMT se produce o deformație mai redusă, trecerea peste rosturi se face mai ușor, iar stropiri nu apar deloc. Acesta este motivul pentru care procedeul este foarte utilizat în sudarea tablelor subțiri [31]. Procedeul de sudare prin transfer de metal la rece are aplicabilitate și pentru alte metale decât oțelurile [32].

Procedeul de sudare prin transfer de metal la rece (CMT) se poate combina cu procedeul de sudare de sudare MIG/MAG în curent continuu pulsator, procedeu descris la paragraful 2.3.4. Prin combinarea acestor două procedee de sudare se pot obține următoarele caracteristici ale noului procedeu:

- dozarea aportului de căldură;
- stabilitatea procesului.

În urma combinării tehnologiei CMT cu procedeul de sudare cu arc pulsator, rămâne la dispoziția sudorului un spațiu energetic dintre cele două procese. Prin posibilitatea alegerii continue, fără salturi, a aportului de căldură, operatorul poate influența procesul de aliere a metalelor, precum și forma, respectiv dimensiunile cusăturilor depuse. Practic sunt eliminate limitările impuse de procedeul CMT, dar beneficiază de avantajele oferite de acesta.

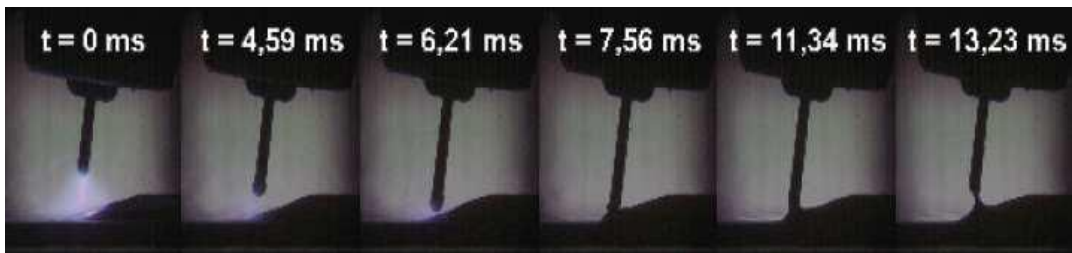


Figura 2.10 Principiul procesului de sudare CMT și fazele unui ciclu

Stabilitatea procesului de sudură oferit de CMT poate fi transferată procedeuului de sudare prin arc pulsator. Printr-un control electronic a sistemului de redresare cu tiristoare comandate se poate realiza ca la o frecvență a impulsurilor de 300Hz la fiecare 100 ms să se intercaleze o singură cadență (secvență) CMT, sau altfel spus o singură secvență CMT la 30 de cadențe de arc pulsator. Prin modificarea raportului cadențelor CMT – arc pulsatoriu se poate regla atât energia celor două procese, cât și trecerea de la un proces la altul. La un raport de 3

cadențe CMT și una de arc pulsatoriu, dominant este procesul CMT, adică aportul de căldură este mic.

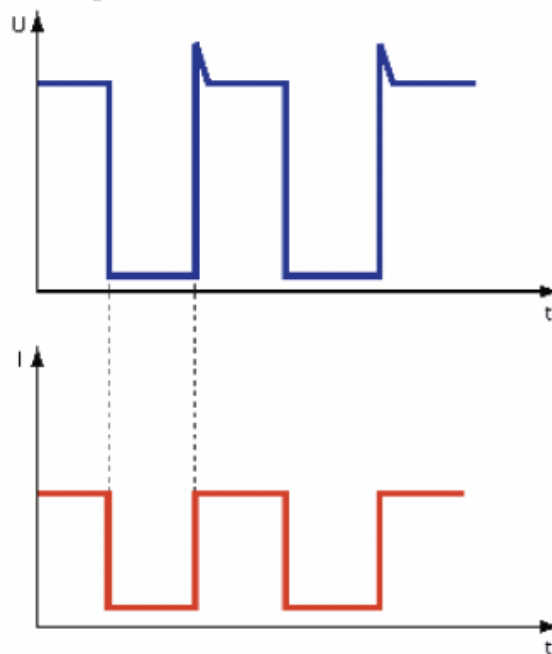


Figura 2.11 Variația tensiunii și curentului în procesul de sudare CMT

La un raport de o cadență de CMT și una de arc pulsator, aportul de căldură se situează la o valoare intermediară dintre cele două procese: arcul pulsator este la limită minimă a energiei, iar procesul CMT la o pătrime din valoarea maximă. Dacă se schimbă raportul cadențelor în favoarea arcului pulsator, de exemplu la 30 de cadențe ale arcului pulsator și numai una a procedurii CMT, procesul CMT are numai un rol de reglare a lungimii arcului electric [33].

Noi variante ale acestui procedeu de sudare sunt aplicate în prelucrări industriale și publicate în cadrul unor lucrări științifice [34]. Procesul de sudare este analizat, prin comparație cu sudarea clasică GMAW (Gaz Metal Arc Welding) și în lucrarea [35].

Interesul deosebit pentru acest procedeu de sudare i-a adus o dezvoltare extraordinară și o aplicare foarte largă, mai ales în industria de automobile și în cea a radiatoarelor termice, unde acest procedeu este complet automatizat /robotizat. În figura 2.12 este prezentat un astfel de sistem.

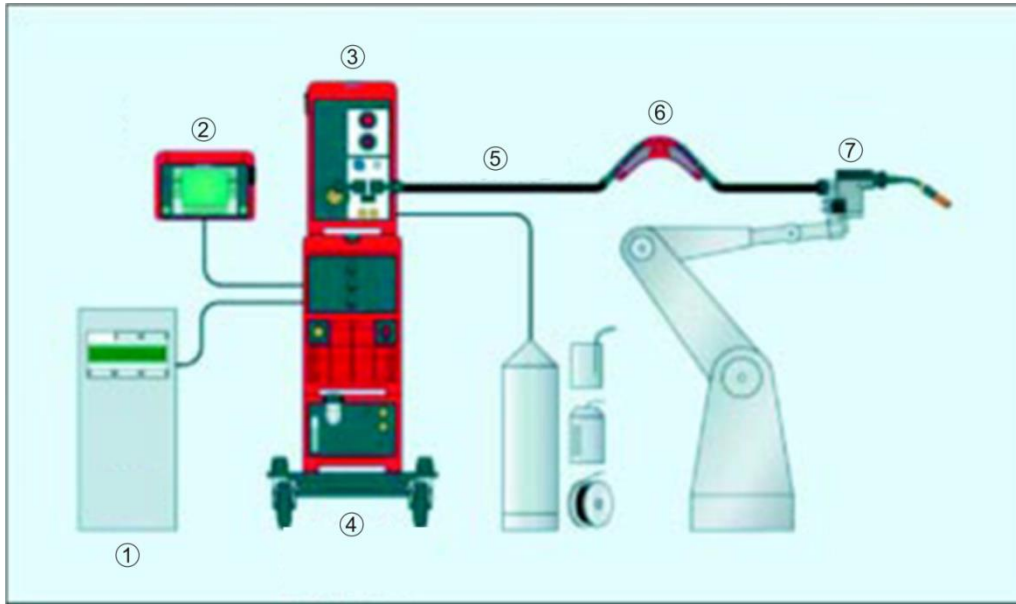


Figura 2.12 Sistem robotizat de sudare prin procedeul CMT. [34]

Sistemul de sudare robotizat este compus din: 1, sursa de alimentare, controlată prin microprocesor, cu un pachet funcțional integral pentru procesul CMT; 2, unitatea de comandă de la distanță; 3, unitatea de răcire; 4, interfață robot; 5, alimentatorul cu sârmă digitalizat; 6, magazie tampon de sârmă, cu rol de decuplare a celor două unități de sârmă; 7, pistolul compact cu control digital.

Un nou procedeu a fost lansat destul de recent, adică în anul 2009, numit CMT Avansat, care se bazează pe procedeul CMT, la care se adaugă în plus faptul că polaritatea curentului alternativ este suprapusă peste perioadele mecanice controlate ale deplasării sârmei electrod [36]. Adică, avantajele tehnologice ale schimbării polarității electrodului, prin aplicarea unui curent alternativ, se adaugă la beneficiile obținute din inversarea mișcării de alimentare cu sârmă. Curentul alternativ permite modificarea atât a ratei de depunere de sudură, cât și energia termică dezvoltată în material.

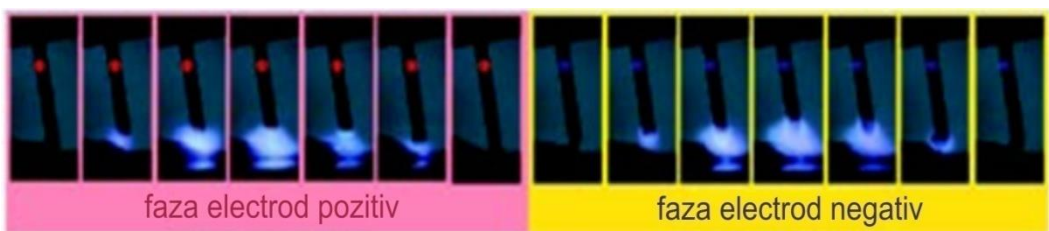


Figura. 2.13 Polaritatea electrodului la trecerea prin perioada de scurt-circuit

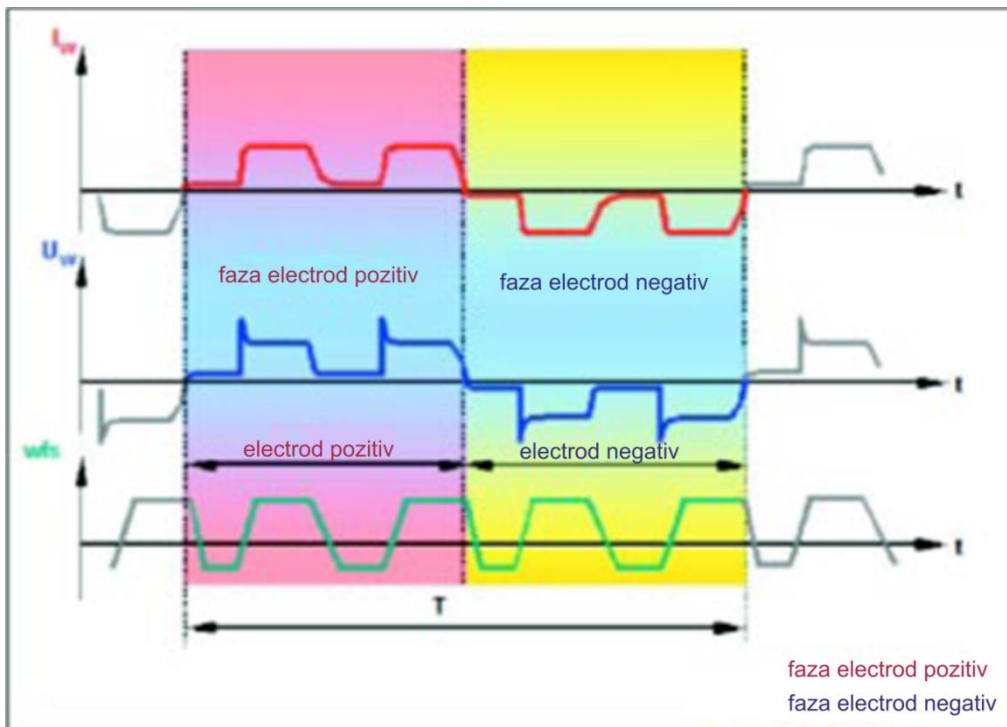


Figura 2.14 Graficele variației de curent, tensiune și vitezei sârmei electrod în procedeul de sudare CMT-Avansat [37]

Din analiza cantităților de produse sudate, din industria mondială, se poate trage concluzia că o pondere importantă o constituie sudarea de tablă subțire. În timpul sudării, variațiile de temperatură în suduri și în metalele de bază pot avea efecte importante asupra caracteristicilor materialului, tensiunilor reziduale, preciziei dimensionale și formei finale a produselor sudate [38], [39]. Acest lucru este deosebit de important în cazul produselor din tablă subțire, în cazul în care controlul asupra distorsiunilor sau deformărilor produselor sudate este dificil. O puternică cercetare experimentală, bazată pe metode de modelare, analiză și de calcul, a fost angajată pentru a investiga efectele induse asupra structurilor sudate rezultate prin diferite aplicații ale procesul MIG convențional [40], [41].

Procedeul de sudare TIG este bine adaptat la foarte multe produse subțiri, ceea ce face posibil să se obțină suduri de înaltă calitate, cu costuri mai mici și productivitate mai mare decât cea a procedeului MIG. Viteza de sudare este între 100-500 mm/min, deși în sudare automată sunt posibile viteze mai mari. Dezavantajul procesului de sudare TIG este legat de dificultățile de a-l automatiza și de viteza de sudare mai mică comparativ cu viteza de sudare la procedeul MIG. Procese de sudare noi, cu un aport mai mic de căldură, bazate sudarea cu curent pulsator, pot fi utilizate în mod eficace pentru fabricarea de produse din table subțiri de metal, relativ la problemele ridicate de procesul de sudare MIG. Procesul de sudare CMT este considerat ca fiind un procedeu de sudură de mare perspectivă pentru industria tablelor subțiri, cu toleranțe de fabricație mici, cu cereri ridicate pentru calitatea produsului și cu înaltă productivitate. Pentru a îmbunătăți calitatea,

flexibilitatea și productivitatea sudării de performanță, este necesară automatizarea procesului, folosind roboți de sudură. Informațiile disponibile cu privire la parametrii de sudare ale procesului de CMT sunt puține, dar sunt esențiale pentru programarea roboților de sudură și crearea de specificații ale procedurilor de sudare. Lipsa de operatori sudare calificați pe piața forței de muncă de astăzi este o preocupare comună pentru cele mai multe industrii de prelucrare a metalelor. Ea are un impact semnificativ asupra competitivității industriei de prelucrare a metalelor. O soluție evidentă, pentru lipsa de resurse umane, este automatizarea proceselor de sudare. În trecut, sudarea robotizată a fost considerată aplicabilă numai în producția de masă, de exemplu, în industria de automobile. Tehnologia a suferit enorm datorită dezvoltării din ultimii ani și trecerii rapide, în zilele noastre, la procese de producție interschimbabile ceea ce permite automatizarea chiar și în companii care produc loturi mici de diferite piese. Sudare CMT este considerată a fi o metodă de îmbinare nouă care satisface cerințe din ce în ce mai stricte, unele dintre cele mai importante fiind stabilitatea și reproductibilitatea proceselor, precum și raportul cost-eficiență. De obicei, pentru sudarea tablelor subțiri este folosit arc scurt circuit. Procesul CMT este bazat pe controlul impulsurilor de curent de sudare și de tensiune și este de fapt un derivat al bine cunoscutului procedeu MIG / MAG. Transferul de metal de umplere la metalul de bază are loc fără tensiune aplicată și curent. Sârma electrod este în mod constant retrasă la intervale foarte scurte de timp. Retragerea firului este controlată cu precizie și facilitează detașarea picăturii oferind un produs curat, fără stropi. Mișcarea sârmei apare cu frecvență înaltă. Sunt detașate aproximativ 70 de picături pe secundă. Trebuie remarcat alimentatorul cu sârmă electrod, care este montat direct pe pistolul de sudură. În momentul în care sursa de alimentare detectează un scurt-circuit, la stropi de sudură, sârma de umplere începe să se retragă. O singură picătură este desprinsă, fără a se produce stropi. Sârma de umplere se aduce în contact cu piesa, din nou, și ciclul se repetă. Frecvența ridicată și un control precis asupra mișcării sunt cerințele de bază pentru un transfer de material controlat.

2.3.8 Sudobrazarea tablelor subțiri

Sudobrazarea tablelor subțiri este trecută la sfârșitul tuturor celorlalte procedee de sudare a tablelor subțiri pentru că acest procedeu poate fi considerat ca unul special, undeva între lipirea tare (brazarea) și sudare. Procedeu de îmbinare prin sudobrazare are asemănări cu fiecare dintre celelalte două procedee amintite, dar și deosebiri [42].

Se aseamănă cu brazarea (lipirea tare) pentru că ambele procedee utilizează materiale de adaos. Ca și în cazul brazării, materialul de bază nu este topit, ci numai materialul de adaos. Dacă la brazare materialul de adaos se distribuie pe suprafața materialului de bază datorită fenomenului de capilaritate, care permite o difuzie a atomilor, la sudobrazare materialul de adaos se livrează sub forma unei sârme electrod, la fel ca și în cazul sudării. Sursa de căldură care asigură topirea materialului de adaos poate fi flacăra de gaz, arcul electric, arcul de plasmă, etc. Îmbinarea realizată în cazul sudobrazării are loc ca urmare a depunerii materialului de adaos pe suprafața încălzită a metalului de bază, ca și în cazul lipirii. În cazul sudării se realizează o baie în care există metal topit din materialul de adaos, dar și din metalul de bază, [43].

Prin analize microscopice se constată că într-o îmbinare prin sudobrazare, materialul de adaos nu intră în această îmbinare. Acest fapt se explică prin

următorul mecanism: când materialul de adaos, în stare lichidă, intră în contact cu materialul de bază, temperatura materialului de adaos scade rapid datorită conductibilității termice a materialului de bază, iar acest lucru face ca materialul de adaos să adere pe o suprafață redusă a materialului de bază.

Oțelurile acoperite pot fi îmbinate, nedemontabil, prin lipire sau sudare. Pentru că aportul de căldură în zona îmbinării este mai mic în cazul lipirii, se preferă acest procedeu. Din acest motiv straturile superficiale obținute în urma acoperirilor metalice sunt mai puțin expuse deteriorărilor. Tot din același motiv se preferă îmbinarea prin sudobrazare, procedeu intermediar celorlalte două. Sudobrazarea este foarte frecvent folosită în îmbinarea tablelor zincate, în special în domeniul construcțiilor de autovehicule.

Principalele probleme care apar la sudarea oțelurilor acoperite cu straturi metalice sunt:

- Prin amestecul materialului de adaos cu zincul apar fisuri, datorită faptului că zincul depus este la limita grăunților și ca urmare a influenței tensiunilor interne. Fisurile apar în special la oțelurile de mare rezistență și numai la table groase. În consecință la sudarea tablelor subțiri fisurile nu au o importanță semnificativă;

- Datorită temperaturii de evaporare scăzute a zincului, acesta se evaporă în procesul de sudare favorizând apariția porilor. Dacă evaporarea se produce la suprafața tablelor, atunci se degajă fum. În schimb dacă evaporarea se produce între tablele suprapuse, atunci există pericolul apariției suflurilor. În cazul tablelor subțiri acest pericol este mai mic, deoarece solidificarea este mai lentă și degajarea gazelor mai bună;

- Vaporii de zinc pătrund în arcul electric și înrăutățesc calitățile arcului datorită afinității mari pe care o are zincul față de oxigen. Prin legarea oxigenului de zinc se produce o creștere a tensiunii superficiale a picăturilor ceea ce duce la intensificarea fenomenului de stropire. Acest fenomen este mai puternic în cadrul sudării prin procedeul MAG;

- Datorită temperaturilor ridicate stratul de zinc se evaporă în apropierea zonei de sudare, ceea ce face ca protecția anticorrosivă să dispară. Dacă zona este mare se practică de obicei reacoperirea metalică a acesteia.

Sudobrazarea este un procedeu de îmbinare prin care numai materialul de adaos ajunge la topire (la fel ca la brazare), iar acesta are punctul de topire mult mai scăzut decât metalul de bază [44]. La sudobrazarea în medii de gaze protectoare se folosesc ca materiale de adaos aliaje ale cuprului care au temperatura de topire mult mai mică decât a oțelului. Sursa termică în procesul de sudobrazare a fost mult timp flacăra oxiacetilenică, dar în ultimul timp s-au dezvoltat procedee de sudobrazare cu arcul electric, astfel se poate spune că există sudobrazare MIG/MAG sau TIG/WIG.

Sudobrazarea are câteva avantaje în comparație cu sudarea prin topire. Printre acestea se pot enumera:

- Căldura din procesul de sudobrazare este mai mică decât în procesul de sudare, în acest fel crește viteza de îmbinare și implicit productivitatea;
- Consumul de energie mai mic;
- Deformațiile mai mici, datorită aportului de căldură mai redusă;
- Materialul de adaos este moale și ductil ceea ce conduce la o prelucrare mecanică ușoară și la tensiuni reziduale mici;
- Rezistența mecanică este mulțumitoare pentru multe aplicații tehnice;

- Materialele greu sudabile pot fi îmbinate prin sudobrazare, fără o preîncălzire a materialelor de bază;
- Pot fi îmbinate materiale disimilare. Prin acest procedeu pot fi îmbinate cupru cu oțel, nichel cu cupru, oțel cu aluminiu. Echipamentul folosit la sudobrazare este similar cu cel folosit la procedeele de sudare.

Există însă și câteva dezavantaje, și în primul rând rezistența mecanică este inferioară celei de la sudare, depinzând de materialele de adaos [45]. Cele mai utilizate materiale de adaos în procedeu de sudobrazare sunt cele pe bază de aliaje de cupru, în special aliajul 60% Cu și 40% Zn, la care se mai adaugă cantități nesemnificative de Sn, Fe, Mn și Si pentru îmbunătățirea calității de curgere a materialului, pentru a împiedica evaporarea zincului și pentru creșterea rezistenței îmbinării. Sunt folosite, mai rar, și aliaje cu Ni sau bronzuri (Cu-Sn) în scopul creșterii rezistenței la coroziune.

Tabelul 2.13 Comparație între lipire, brazare și sudare

Nr. crt	Lipirea	Brazarea	Sudarea
1	Prin acest procedeu se obțin cele mai slabe îmbinări. Lipirile nu sunt destinate să suporte eforturi mari. Sunt utilizate, mai ales în electronică pentru contacte electrice	Brazarea este un procedeu care asigură o rezistență a îmbinării mai mare decât lipirea, dar mai mică decât sudarea.	Aceste sunt îmbinări pentru solicitări mari. Îmbinarea poate să aibă o rezistență mai mare decât a materialelor de bază
2	Temperaturile de topire ale metalelor de adaos sunt până la 450 °C	Temperaturile ale metalelor de adaos sunt la peste 550 °C	Temperatura necesară este de până la 1800 °C
3	Nu este necesară încălzirea metalelor de bază	Piese care se îmbină sunt încălzite până la punctul de topire.	Piese care se îmbină sunt încălzite până la punctul lor de topire
4	Nu are loc nici o schimbare a proprietăților mecanice în urma îmbinării prin lipire	Pot avea loc schimbări ale caracteristicilor mecanice prin brazare, dar sunt neglijabile.	Proprietățile mecanice se pot schimba prin îmbinare în urma topirii și răcirii metalelor topite.
5	Cerințele de calificare și costurile sunt mici	Costurile implicate sunt mai mici decât la sudare, dar mai mari decât la lipire.	Costurile cu încălzirea și calificarea sunt mari
6	Nu sunt necesare tratamente termice	Nu sunt necesare tratamente termice după brazare	Aplicarea unor tratamente termice sunt necesare pentru eliminarea tensiunilor
7	O preîncălzire a pieselor este indicată pentru a se obține o îmbinare de bună calitate.	Preîncălzirea este de dorit	Nu este necesară o preîncălzire a pieselor de sudat

Cele trei procese de lipire, brazare și sudare au câteva caracteristici comune. În primul rând toate sunt procedee de îmbinare nedemontabilă a unor structuri metalice. În al doilea rând, în toate cele trei procese se utilizează metal de adaos și flux, și se bazează pe aport de căldură. În același timp, ele sunt diferite în ceea ce privește costul implicat, performanța obținută, aria de aplicare, etc. Această comparație este făcută detaliat în tabelul 2.13.

Se poate trage o concluzie importantă pentru tematica abordată în cadrul acestei lucrări, și anume, că acest procedeu poate fi extins pentru îmbinările tablelor subțiri, și în general ale tablelor acoperite metalic, pentru că, datorită căldurii scăzute introduse în proces, aceasta nu distruge protecția anticorrosivă. De asemenea, sudobrazarea este o metodă foarte des folosită în cazul îmbinărilor unor materiale diferite (disimilare) [46].

3 ELEMENTE DE TEORIA ELASTICITĂȚII ȘI TEORIA VIBRAȚIILOR MEDIILOR CONTINUE

În contextul său cel mai general, termenul de măsurători în domeniul materialelor, reprezintă principiile, tehnicile și operațiile făcute pentru distingerea calitativă și pentru determinarea cantitativă a caracteristicilor de materiale. Metodele de caracterizare a materialelor au un domeniu de aplicare foarte larg și de impact pentru știință, tehnologie, economiei și societate. Fără a avea intenția prezentării științei măsurării și nici a principiilor de metrologie, în cele ce urmează va fi prezentată o imagine de ansamblu cu privire la caracteristicile elastice ale materialelor. Cunoașterea caracteristicilor de material, pe baza de măsurători, au ca scop caracterizarea, relativ ușoară a materialelor, din punct de vedere cantitativ, aceasta fiind adesea strâns legată de analiza, modelarea și simularea, calitativă, prin teste [47]. În general vorbind, măsurarea începe cu o definiție a măsurandului, cantitatea care trebuie să fie măsurată [48], și implică întotdeauna o comparație a măsurandului cu o cantitate cunoscută de același fel. Întrucât sistemul de metrologie generală se bazează pe binecunoscutul sistem internațional de unități (SI), pentru materiale există un spectru larg de măsurători. Acest lucru se datorează varietății de materiale, dar și a multiplelor proprietăți de natură chimică, fizică, mecanică etc. și, care sunt strâns legate de materiale, pornind de la compoziție, structură, scară, sinteză și aplicații. Unele dintre aceste proprietăți pot fi exprimate, într-un sens metrologic, prin numere, cum ar fi densitatea sau conductivitate termică, unele proprietăți sunt binare (exprimarea prin două posibilități :adevărat sau fals), cum ar fi capacitatea de a fi reciclate. Unele, cum ar fi rezistența la coroziune, pot fi exprimate printr-un clasament de exemplu: slabă, adecvată bună, foarte bună, iar altele pot fi descrise numai prin cuvinte sau/și imagini [49].

Determinarea caracteristicilor de material este importantă în cunoașterea comportării acestora, astfel încât utilizarea lor să poată fi făcută în mod variat, în funcție de solicitările la care sunt supuse, asigurându-se astfel utilizarea lor la un potențial maxim. În domeniile în care siguranța, fiabilitatea și controlul calității sunt foarte importante, dezvoltarea continuă a tehnicii de analiză și a tehnologiei de măsurare pentru caracterizarea materialelor, devine inevitabilă. Cercetarea și cunoașterea caracteristicilor de material este aplicată pe scară largă în domeniul de analiză a distrugerilor, în special a celor nedorite, catastrofale și în cascadă.

Un aspect important în caracterizarea materialelor este cunoașterea și investigarea proprietăților elastice ale acestora, respectiv determinarea constantelor elastice corespunzătoare și anume: modulul lui Young (E), modulul de forfecare, (G) și coeficientul lui Poisson (ν). În [50], se face o analiză detaliată asupra comportării elastice a solidului deformabil, precum și asupra unei proprietăți a unor materiale transparente de a-și modifica indicele de refracție sub acțiunea deformațiilor elastice. De-a lungul timpului au fost dezvoltate diverse tehnici, meticolos analizate în [51], pentru caracterizarea materialelor prin proprietățile lor elastice. Această multitudine de tehnici ar putea fi clasificată în două grupe principale: statice și dinamice. Metodele statice sunt bazate pe măsurarea tensiunii și a deformației în timpul testării mecanice standard. Probele trebuie să se conformeze unei anumite

forme și mărimi specifice pentru testare. Un exemplu de astfel de test este testul de tracțiune cu ajutorul unei mașini universale de tracțiune, caz în care eșantioanele (epruvetele) sunt fabricate sub o formă de „os de câine”, de lungime și grosime specificate. Graficul tensiune – deformație este reprezentat pe bază de testări și se folosește pentru a determina comportarea mecanică a epruvetelor. Modulul de elasticitate longitudinal, E se obține din panta regiunii liniare a graficului tensiune-deformație. Testul necesită de cele mai multe ori un anumit interval de deformare a modelului, acesta având dimensiuni și formă specifică. Testul de tracțiune este un test distructiv pentru că epruvetele sunt, de obicei, solicitate până la rupere sau până se ajunge într-o regiune de deformare plastică, prin urmare, nu mai pot fi folosite pentru o analiză ulterioară.

Metodele dinamice sunt metode nedistructive care permit variații în forme și dimensiuni ale epruvetelor. Materialele pot fi testate în mod repetat pentru o gamă largă de temperaturi sau alte condiții de mediu. În practică sunt folosite două tipuri de metode dinamice și anume: metoda cu ultrasunete și metoda de rezonanță. Metoda cu ultrasunete implică cuantificarea timpului de tranzit în propagarea unei unde prin materiale, în timp ce metoda de rezonanță implică măsurarea frecvențelor naturale și a formelor modale asociate pentru a obține constantele elastice dorite. Metoda analizei modale sau de testare la vibrații a fost larg favorizată ca metodă de control, datorită faptului că este ușor de pus în aplicare și nu necesită echipamente scumpe [52]. În standardul american ASTM E 1876-09 [52], sunt stabilite procedurile pentru determinarea proprietăților elastice ale unor materiale prin analiza semnalelor de vibrații, date de un impuls de excitație. Cu toate acestea, standardul se aplică numai unor probe cu forme structurale bine definite și aflate sub forma unor grinzi, tije sau discuri. După cum este subliniat în [51], pentru structuri simple, cum ar fi grinzile și tijele, determinarea directă a constantelor elastice este mai ușor de realizat prin aplicarea metodei de testare modală, în comparație cu structuri mai complexe, cum ar fi plăci sau table. Mai multe cercetări au fost efectuate pentru a găsi procedura cea mai adecvată pentru determinarea proprietăților elastice ale plăcilor dreptunghiulare prin tehnica de analiză modală a răspunsului la vibrații [53-58].

3.1 Caracteristici mecanice la încercări monoaxiale

În acest paragraf se prezintă unele aspecte fundamentale ale mecanicii materialelor, folosind răspunsul materialului la o solicitare unidirecțională, pentru a oferi o imagine de ansamblu ale proprietăților mecanice, fără a aborda complexitatea solicitărilor multidirecționale. Pentru evaluarea proprietăților materialelor sunt folosite o serie de încercări mecanice relativ simple.

Din punct de vedere istoric Galileo Galilei a publicat, în anul 1638, lucrarea *Discorsi e dimonstrazioni matematiche intorno a due scienze attenanti alla meccanica e di movimenti locali*, lucrare în care s-a pus, pentru prima dată, problema rezistenței materialelor și a mișcării corpurilor.

În anul 1678, Robert Hooke a descoperit legea care îi poartă numele (legea lui Hooke), prin care se preciza că deformarea unui corp, sub acțiunea unei solicitări mai mici decât limita de curgere, este proporțională cu forța exercitată.

Thomas Young a fost cel care a descoperit deformarea elastică la forfecare și a observat că rezistența la forfecare este diferită de rezistența elastică la tracțiune sau la compresiune pentru același material. El a introdus conceptul de modul de elasticitate al unui material și care a devenit modulul lui Young.

3.1.1 Încercarea la tracțiune monoaxială

Poate că testul cel mai cunoscut pentru caracterizarea proprietăților mecanice ale unui material este testul de tracțiune, în care o epruvetă, de obicei standardizată (pentru materiale metalice conform SR EN ISO 6892-1:2010), [59], având lungimea L_0 și secțiune transversală A_0 , fixată la un capăt, se supune la o forță axială F , de-a lungul axei lungi a probei. Forța F se aplică fără șocuri sau vibrații, până se produce ruperea epruvetei. Concomitent se măsoară distanța între două repere marcate pe probă, distanță notată cu L , respectiv alungirea acesteia $\Delta L = L - L_0$ cu ajutorul unui extensometru. Reprezentarea grafică a forței F în funcție de alungirea ΔL (legea lui Hooke) reprezintă o diagramă care depinde nu numai de natura materialului, ci și de dimensiunile epruvetei, deci nu caracterizează comportarea materialului. Acesta este motivul pentru care se reprezintă o altă curbă: tensiunea în funcție de alungirea relativă. Tensiunea la întindere sau tensiunea normală este definită ca fiind :

$$\sigma = \frac{F}{A_0}, \quad (3.1)$$

iar alungirea specifică este definită, astfel:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}. \quad (3.2)$$

Prin această reprezentare se obține curba caracteristică de material numită diagrama de încercare la tracțiune (Figura 3.1).

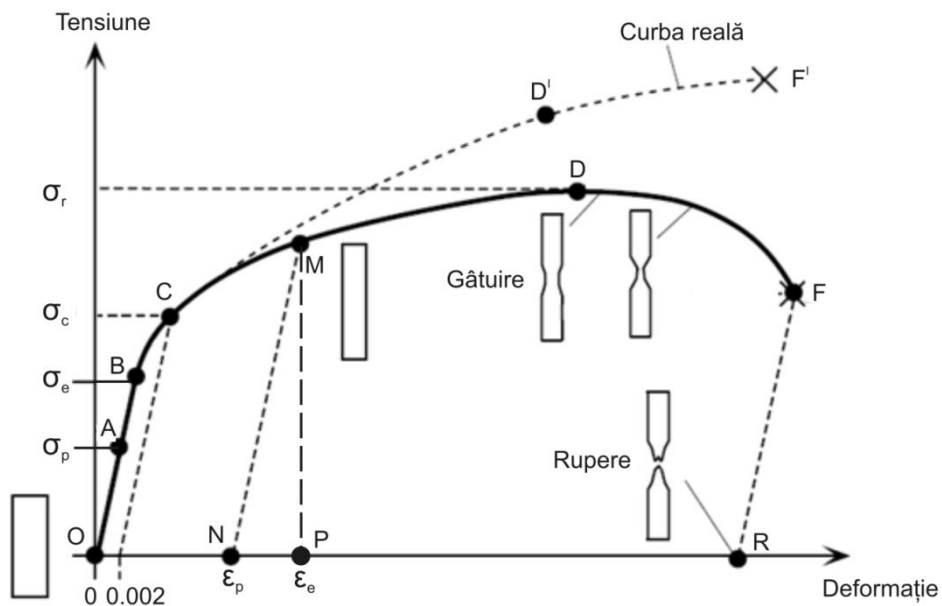


Figura 3.1. Diagrama de încercare la tracțiune

Această curbă este una convențională, și nu una reală, pentru că raportarea forței aplicate se face permanent la valoarea ariei secțiunii inițiale, A_0 . Cu linie

punctată este reprezentată în figura 3.1 cum ar arăta curba dacă raportarea s-ar face la valoarea ariei secțiunii din fiecare punct.

Pe diagrama din figura 3.1, care corespunde unui oțel cu conținut scăzut de carbon, sunt marcate câteva puncte, ale căror ordonate definesc unele caracteristici mecanice importante ale materialului.

- Limita de proporționalitate σ_p este valoarea tensiunii până la care există o relație liniară între tensiune și alungire, și corespunde ordonatei punctului A. Pe această porțiune a diagramei de tracțiune se poate scrie legea lui Hooke:

$$\sigma = E\varepsilon, \quad (3.3)$$

iar panta acestei curbe este modulul de elasticitate longitudinal al materialului, sau modulul lui Young.

- Limita de elasticitate σ_e este valoarea tensiunii până la care materialul se comportă elastic și corespunde ordonatei punctului B de pe diagrama de tracțiune. Până în acest punct deformațiile sunt reversibile. Pentru majoritatea materialelor utilizate în diferite structuri mecanice cele două limite de proporționalitate și de elasticitate sunt foarte apropiate.
- Limita de curgere aparentă σ_c este valoarea tensiunii la care epruveta începe să aibă deformații apreciabile, chiar și în condițiile în care sarcina rămâne constantă. Ea corespunde ordonatei punctului C de pe diagrama de tracțiune. Unele metale, chiar și oțelurile, prezintă un palier de curgere, definindu-se o limită inferioară a tensiunii de curgere și o limită superioară a acesteia.
- Rezistența la tracțiune σ_r , denumită și rezistență la rupere, este tensiunea corespunzătoare forței maxime înregistrate în cursul încercării, după depășirea limitei de curgere. Rezistența la rupere corespunde valorii ordonatei punctului D de pe diagrama de tracțiune.

Limitele și rezistențele definite pe baza curbei de tracțiune convențională sunt constante de material, deci valori fixe ale tensiunii normale. Pentru a le deosebi de tensiunile normale de întindere σ , acestea se notează uneori diferit. Pentru încercările materialelor, conform SR EN ISO 6892-1:2010, se folosesc următoarele notații:

- Pentru rezistența la tracțiune, sau rezistența la rupere, σ_r se folosește notația R_m , având, evident, aceeași valoare;
- Pentru limita de curgere σ_c se folosește notația R_c ;
- Pentru limita de curgere convențională $\sigma_{0,2}$ se folosește notația $R_{p0,2}$.

Punctul E corespunde ruperii epruvetei, iar tensiunea de rupere ar avea o valoare inferioară rezistenței la tracțiune. Acest lucru se datorează faptului că în calcule forța se raportează la aria secțiunii inițiale. În realitate, după punctul D apare o gătuire a epruvetei, iar raportarea la această arie duce la valoarea reală corespunzătoare ordonatei punctului F'. În funcție de porțiune CDF a diagramei de tracțiune, materialele se numesc tenace, acestea având această porțiune extinsă, respectiv fragile, pentru care această porțiune lipsește.

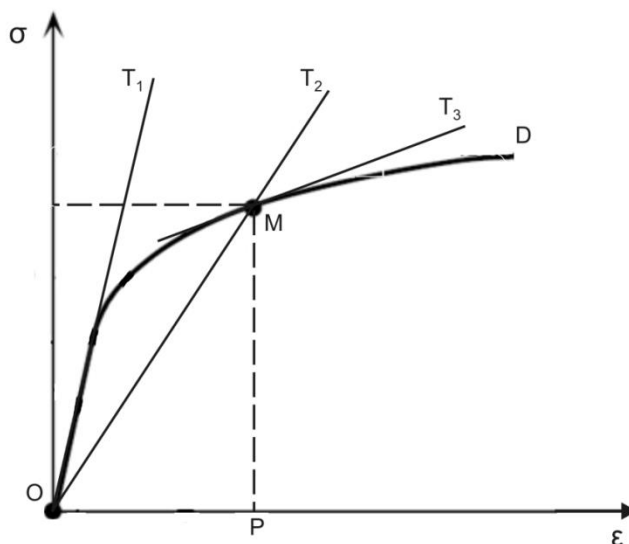


Figura 3.2 Curba caracteristică pentru materiale electrotehnice

În practica inginerescă se urmărește ca valorile tensiunilor maxime să nu depășească limita de curgere la materialele tenace sau rezistența la rupere, în cazul materialelor fragile [60].

O categorie mare de materiale, numite materiale electrotehnice, printre care cupru, aluminiul și aliaje ale acestora au curba de tracțiune ca în figura 3.2, un traseu curbiliniu până la rupere. Pentru acestea se definesc:

- modulul de elasticitate tangent

$$E_t = \frac{d\sigma}{d\varepsilon'}, \quad (3.4)$$

dat de valoarea tangentei unghiului format de tangenta MT_3 și axa deformației;

- modulul de elasticitate secant

$$E_s = \frac{MP}{OP}, \quad (3.5)$$

dat de panta secantei OT_2 .

De obicei se utilizează modulul de elasticitate în origine, E , dat de panta tangentei OT_1 , dusă în originea diagramei de tracțiune și este numit *modulul lui Young*.

3.1.2 Încercarea la forfecare

Când două forțe de sens contrar acționează tangențial pe fețele opuse ale unui corp paralelipedic ca în figura 3.3, atunci, solicitările care rezultă sunt numite eforturi de forfecare, pentru că acestea au tendința de a forfeca solidul. Tensiunea de forfecare, notată cu τ , este definită ca fiind forța tangențială raportată pe unitatea de suprafață pe care acționează:

$$\tau = \frac{F_t}{A_0}, \quad (3.6)$$

unde F_t este forța tangențială care acționează pe suprafața A_0 . Forfecarea provoacă solidului o deformare de alunecare cu Δx a suprafețelor situate la distanța L . Deformația de forfecare este definită prin :

$$\gamma = \frac{\Delta x}{L} = \tan\theta \approx \theta, \quad (3.7)$$

unde θ este unghiul de forfecare. De obicei, θ este mic și se poate face aproximația, $\tan\theta \approx \theta$ și deformația de forfecare este pur și simplu acest unghi. Toate experimentele arată că pentru un anumit material și pentru tensiuni de forfecare mici, deformarea de forfecare este elastică și se supune legii lui Hooke[61],[62]:

$$\tau = G\gamma, \quad (3.8)$$

unde G este numit modulul de elasticitate de forfecare sau modulul de elasticitate transversal.

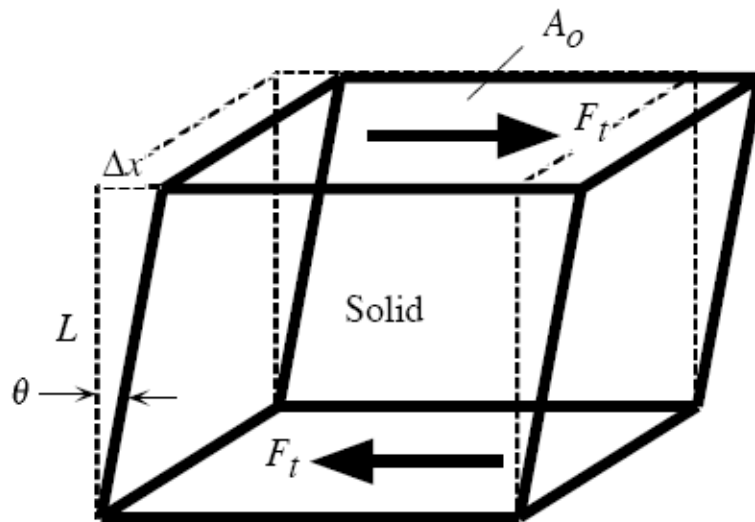


Figura 3.3. Solicitarea de forfecare

Pentru realizarea unei solicitări de forfecare pură se folosește așa numita epruvetă Iosipescu. Prin forfecarea pură se înțelege solicitarea produsă numai de tensiuni tangențiale paralele cu o singură direcție din planul secțiunii transversale a unei piese, fără ca pe aceste secțiuni să acționeze tensiuni normale.

3.2 Elemente de vibrații mecanice

Metodele dinamice utilizate pentru determinarea caracteristicilor elastice ale materialelor sunt metode nedistructive care permit variații în forme și dimensiuni ale epruvetelor. În practică sunt folosite două tipuri de metode dinamice și anume metoda cu ultrasunete și metoda de rezonanță. Metoda cu ultrasunete implică cuantificarea timpului de tranzit în propagarea unei unde prin materiale, în timp ce metoda de rezonanță implică măsurarea frecvențelor naturale și a formelor modale asociate pentru a obține constantele elastice dorite.

Metoda analizei modale sau de testare prin vibrații este foarte larg utilizată ca metoda de identificare a sistemelor dinamice, de determinare a caracteristicilor elastice ale materialelor, dar și de control nedistructiv, datorită faptului că este ușor de pus în aplicare și nu necesită echipamente scumpe.

Pentru înțelegerea acestei metode, dar mai ales a modului în care caracteristicile mecanice influențează comportarea dinamică a sistemelor mecanice, în cele ce urmează se vor da câteva elemente de vibrații ale unor structuri (medii) continue. Sunt câteva cărți excepționale privind abordarea problemelor de vibrații și analiză modală [63-71]. Totuși, datorită unor diferențe în denumirea unor mărimi caracteristice vibrațiilor, dar și datorită notațiilor utilizate în literatura românească, în cele ce urmează, prezentarea elementelor de vibrații se va face în concordanță cu [72] sau [73], subliniindu-se modul în care intervin caracteristicile mecanice elastice în diferitele tipuri de vibrații și legătura dintre acestea și frecvențele modurilor proprii.

3.2.1 Vibrațiile de torsiune ale unei bare

În cazul în care o bară este supusă unor cupluri de răsucire, variabile în timp, deformațiile care se produc sunt și ele variabile în timp și se numesc vibrații de răsucire sau de torsiune. Se va considera bara din figura 3.4. supusă la răsucire prin intermediul unui moment distribuit, aplicat din exterior $m(x,t)$. Rotirea secțiunii situată la distanța x , în raport cu axa longitudinală Ox ce unește centrele tuturor secțiunilor, se va nota prin unghiul $\theta(x,t)$.

Considerând un element de bară Δx , asupra lui vor acționa cuplurile forțelor interioare de momente $M(x,t)$ și $M(x+\Delta x, t)$, cuplurile distribuite de frecare $r(x, \theta, t)$ și cuplurile perturbatoare de moment $m(x, t)\Delta x$.

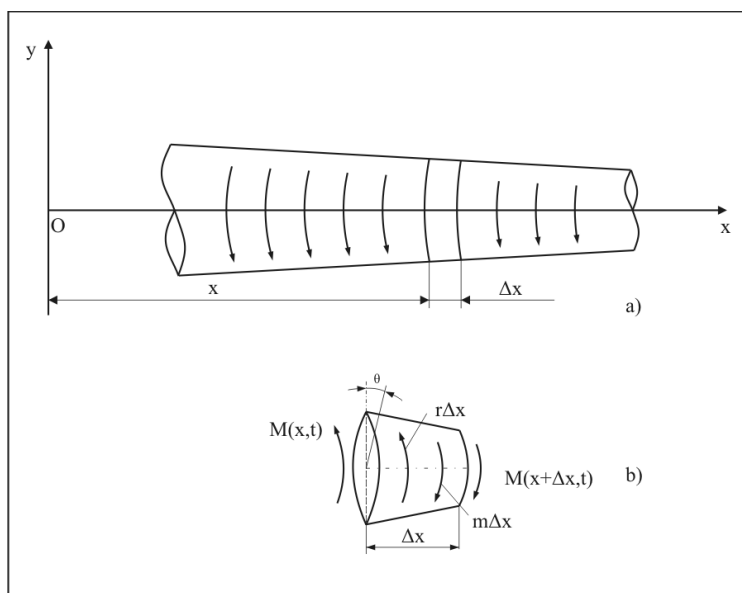


Figura 3.4. Modelul fizic al vibrațiilor de răsucire ale unei bare

Pentru efortul tangențial se poate scrie *legea lui Hooke* (3.7), unde γ este alunecarea specifică la distanța r de centrul secțiunii:

$$\gamma = r \lim_{\Delta x} \frac{\theta(x + \Delta x, t) - \theta(x, t)}{\Delta x} = r \frac{\partial \theta(x, t)}{\partial x}. \quad (3.9)$$

Momentul forțelor interioare reduse în centrul secțiunii este:

$$M(x, t) = \iint r \tau dA = G \frac{\partial \theta}{\partial x} \iint r^2 dA = GI_0 \frac{\partial \theta}{\partial x}, \quad (3.10)$$

unde $I_0(x)$ este momentul de inerție polar al secțiunii (momentul geometric), iar G este modulul de elasticitate de forfecare.

Dacă se notează cu $J_0(x)$, momentul de inerție axial (momentul mecanic) pentru unitatea de lungime a barei, se poate scrie ecuația de momente față de axa longitudinală a barei.

$$-J_0 \Delta x \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} + M(x + \Delta x, t) - M(x, t) - r(x, \theta, t) \Delta x + m(x, t) \Delta x = 0 \quad (3.11)$$

Prin împărțire și trecerea la limită se obține:

$$J_0 \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} = \frac{\partial M}{\partial x} - r(x, \theta, t) + m(x, t). \quad (3.12)$$

sau ținând cont și de relația (3.10)

$$J_0 \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial x} \left[GI_0 \frac{\partial \theta}{\partial x} \right] - r(x, \theta, t) + m(x, t) \quad (3.13)$$

Considerând frecările neglijabile și momentele exterioare perturbatoare nule se obține:

$$J_0 \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial x} \left[GI_0 \frac{\partial \theta}{\partial x} \right]. \quad (3.14)$$

Pentru cazul barei omogene și de secțiune constantă, ecuația vibrațiilor libere de răsucire va fi:

$$J_0 \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} = GI_0 \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2}. \quad (3.15)$$

Dacă se notează:

$$GI_0/J_0 = c^2 \quad \text{sau} \quad c = \sqrt{\frac{GI_0}{J_0}} \quad (3.16)$$

ecuația (3.15) are aceeași formă ca și ecuația vibrațiilor longitudinale ale barei. Și în acest caz pentru rezolvarea completă a problemei este necesar cunoașterea condițiilor inițiale și la limită.

Condițiile inițiale pentru vibrațiile de răsucire vor fi de forma:

$$\theta(x, t)|_{t=0} = \varphi(x); \quad \frac{\partial \theta(x, t)}{\partial t} |_{t=0} = \psi(x). \quad (3.17)$$

Condițiile la limită sunt determinate de legăturile existente la cele două extremități. Astfel, pentru un capăt încastrat, celălalt liber (I, L) condițiile sunt:

$$\theta(x, t)|_{L=0} = 0 \quad \text{și} \quad M(x, t)|_{x=L} = GI_0 \frac{\partial \theta}{\partial x} |_{x=L} = \frac{\partial \theta}{\partial x} |_{x=L} = 0 \quad (3.18)$$

Deoarece se neglijează frecările și nu există forțe exterioare care să acționeze asupra barei, aceasta este o problemă de vibrații libere. Pentru rezolvarea ei se pornește de la determinarea unei soluții separabile în timp și spațiu. Din punct

de vedere fizic, aceasta înseamnă că sistemul execută mișcări sincrone, adică fiecare punct al sistemului execută același tip de mișcare în timp. În aceste condiții soluția este de forma:

$$\theta(x, t) = \Theta(x) \cdot T(t). \quad (3.19)$$

Punând condiția ca această soluție să verifice ecuația (3.15), se obține:

$$J_0 \Theta(x) \ddot{T}(t) - GI_0 \Theta''(x) T(t) = 0, \quad (3.20)$$

care se poate separa în două ecuații diferențiale ordinare:

$$c^2 \frac{\Theta''}{\Theta} = \frac{\ddot{T}}{T} = \text{const} = \lambda. \quad (3.21)$$

Cele două rapoarte ale unor funcții de variabile diferite, pot fi egale doar dacă sunt constante, iar constanta λ trebuie să fie negativă, deci $\lambda = -p^2$, deoarece soluția trebuie să fie mărginită în timp. Această mărginire se motivează prin faptul că mișcarea nu durează infinit de mult și nici nu crește spre infinit pentru ca vibrațiile sunt libere, deci nu se introduce energie din exterior, decât cea inițială care este finită. Urmează că:

$$\ddot{T} + p^2 T = 0; \quad (3.22)$$

și

$$\Theta'' + \left(\frac{p}{c}\right)^2 \Theta = 0. \quad (3.23)$$

Aceste ecuații au soluțiile:

$$T(t) = A \cos pt + B \sin pt; \quad (3.24)$$

$$\Theta(x) = C \cos \frac{px}{c} + D \sin \frac{px}{c}. \quad (3.25)$$

Egalitatea (3.21) poate fi satisfăcută pentru o infinitate de valori λ_r numite valori proprii și cărora le corespund funcții proprii $\Theta_r(x)$. Valorile proprii se determină pe baza condițiilor de frontieră impuse soluției $\theta(x, t)$, adică funcției $\Theta(x)$. Această ecuație, numită ecuație caracteristică, este întotdeauna transcendentă și are o infinitate de rădăcini.

Fiecărei valori proprii îi va corespunde o pulsație proprie p_r ($r = 1, 2, \dots, n$, reprezintă numărul de ordine al pulsației proprii) și o funcție $T_r(t)$ respectiv o funcție proprie $\Theta_r(x)$, iar soluția generală va fi de forma:

$$\theta(x, t) = \sum_{r=1}^{\infty} \Theta_r(x) T_r(t). \quad (3.26)$$

Cele mai frecvente tipuri de legături sunt date în Tabelul 3.1.

Tabelul 3.1. Condițiile de frontieră și pulsațiile proprii pentru cele mai frecvente legături

Tipuri de legături	Condiții limită		Ecuația caracteristică	Pulsații proprii
	$x=0$	$x=L$		
I - L	$\Theta=0$	$\Theta'=0$	$\cos \frac{pL}{c} = 0$	$p_r = \frac{(2r-1)\pi c}{2L}$
I - I	$\Theta=0$	$\Theta=0$	$\sin \frac{pL}{c} = 0$	$p_r = \frac{r\pi c}{L}$
L - L	$\Theta'=0$	$\Theta'=0$	$\sin \frac{pL}{c} = 0$	$p_r = \frac{r\pi c}{L}$

În acest tabel s-au notat legăturile de pe frontieră cu I - I ambele capete încastrate, cu I - L, un capăt încastrat celălalt liber, iar cu L - L ambele capete libere. Dacă se consideră că tablele sunt subțiri, omogene și de aceeași secțiune, atunci, constanta c se poate scrie:

$$c = \sqrt{\frac{G}{\rho}}, \quad (3.27)$$

unde ρ este densitatea materialului. Trebuie făcută observația că această relație se obține din ecuațiile (3.14-3.16) și este valabilă numai pentru barele cu secțiune circulară. Pentru celelalte tipuri de secțiuni de bare relația (3.27) va fi afectată printr-un coeficient de formă al secțiunii, notat K_F .

Se constată faptul că în relațiile din Tabelul 3.1, în formulele de calcul ale pulsațiilor proprii, intervin pe lângă date relativ la dimensiunile barei și două constante de material: densitatea ρ , respectiv modulul de elasticitate transversal G . Densitatea este cunoscută sau se determină prin cântărire. Prin urmare, se poate explicita modulul de elasticitate transversal G , în funcție de frecvența proprie a modului de vibrație, ținând cont și de faptul că $p_r = 2\pi f_r$. Se obține

$$G = \frac{16\rho f_r^2 L^2}{(2r-1)^2}, \quad (3.28)$$

dacă bara are un capăt încastrat, iar celălalt liber, (I - L) respectiv,

$$G = \frac{4\rho f_r^2 L^2}{r^2}, \quad (3.29)$$

dacă bara are ambele capete libere sau încastrate : (L - L), (I - I).

Din relațiile (3.28) și (3.29) se poate constata faptul că dacă frecvența unui mod de vibrație este cunoscută, ceea ce se poate obține pe cale experimentală, prin înregistrarea și analiza unui semnal de vibrație, atunci se poate determina modulul de elasticitate transversal.

Dacă bara este constituită din două table subțiri îmbinate prin sudură sau prin lipire, atunci ecuația (3.15) va avea forma:

$$(J_1 + J_2) \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} = (G_1 I_1 + G_2 I_2) \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2}, \quad (3.30)$$

unde J_1 și J_2 sunt momentele de inerție mecanice ale celor două table în raport cu axa longitudinală, G_1 și G_2 sunt modulele de elasticitate de forfecare ale celor două materiale constitutive, iar I_1 și I_2 sunt momentele de inerție geometrice în raport cu aceeași axă. Pe baza ecuației (3.27) se obține constanta c :

$$c = \sqrt{\frac{G_1 I_1 + G_2 I_2}{J_1 + J_2}}, \quad (3.31)$$

iar pe baza relațiilor din Tabelul 3.1 se obțin frecvențele proprii:

$$f_r = \frac{(2r-1)}{4L} \sqrt{\frac{G_1 I_1 + G_2 I_2}{J_1 + J_2}}, \quad (3.32)$$

dacă un capăt este încastrat (I) și celălalt liber (L), respectiv,

$$f_r = \frac{r}{2L} \sqrt{\frac{G_1 I_1 + G_2 I_2}{J_1 + J_2}}, \quad (3.33)$$

dacă ambele capete sunt libere (L) sau ambele capete sunt încastrate (I).

Problema se poate generaliza pentru cazul în care sunt mai multe table îmbinate, sau mai multe straturi de acoperiri metalice sau în cazul materialelor compozite. Pentru aceste situații, frecvențele proprii au următoarele expresii:

$$f_r = \frac{(2r-1)}{4L} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N G_i I_i}{\sum_{i=1}^N J_i}}, \quad (3.34)$$

dacă bara este liberă (L) la un capăt și încastrată (I) la celălalt capăt, respectiv,

$$f_r = \frac{r}{2L} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N G_i I_i}{\sum_{i=1}^N J_i}}, \quad (3.35)$$

dacă bara este încastrată (I) la ambele capete sau liberă (L) la ambele capete.

Produsul GI se numește rigiditate la torsiune, prin urmare

$$\overline{GI} = \sum_{i=1}^N G_i I_i, \quad (3.36)$$

va reprezenta rigiditatea la torsiune a structurii formate prin îmbinarea mai multor table subțiri din materiale diseminale, a structurii rezultate prin acoperirea unei table cu mai multe straturi metalice sau vopsele de protecție (metalizate) sau a unor materiale compozite.

Formulele (3.32), (3.33), (3.34) și (3.35) dau legătura dintre frecvențele proprii și rigiditățile tablelor ce intră în structura îmbinată. Prin urmare, dacă se determină printr-o metodă nedistructivă, cum este cazul metodei vibroacustice sau metodei testelor de vibrații măsurate prin intermediul unui Laser Doppler, metode folosite în cadrul acestei lucrări, frecvențele proprii ale unei structurii, atunci se poate determina: rigiditatea structurii - element important în calculul de dimensionare a structurii sau a comportării dinamice. Se poate calcula, de asemenea, un modul de elasticitate echivalent sau se poate determina modulul de elasticitate al unui material dacă celelalte (celălalt) sunt cunoscute.

3.2.2 Vibrațiile de încovoiere ale unei bare

3.2.2.1 Deducerea ecuației vibrațiilor de încovoiere

Dacă dimensiunea longitudinală a unei plăci (a unei structurii) este mult mai mare în comparație cu celelalte două dimensiuni, comportarea acesteia poate fi considerată ca a unei bare.

Se va considera bara din figura 3.5.a. a cărei axă nedeformată este axa Ox și care va lua prin deformare forma din figura 3.5.b. Deplasarea transversală a axei neutre în punctul de abscisă x la un moment t se notează cu v(x,t). Pentru stabilirea ecuației vibrațiilor transversale se separă un element al barei, figura 3.5.c.

Prin separare se înlocuiesc legăturile interioare, din cele două secțiuni, cu forțele tăietoare T(x+Δx) și T(x,t), respectiv momentele încovoietoare M(x+Δx, t) și M(x,t). Asupra elementului se consideră că acționează și forța perturbatoare pe unitatea de lungime q(x,t)Δx. Se va considera că elementul separat, sub acțiunea forțelor date și de legătură, va avea o mișcare plană.

Prin θ(x,t) s-a notat rotația secțiunii transversale, β(x,t) este unghiul de alunecare a secțiunii, datorită efectului forțelor tăietoare, iar $\frac{\partial v}{\partial x}$ este unghiul de înclinare al axei neutre.

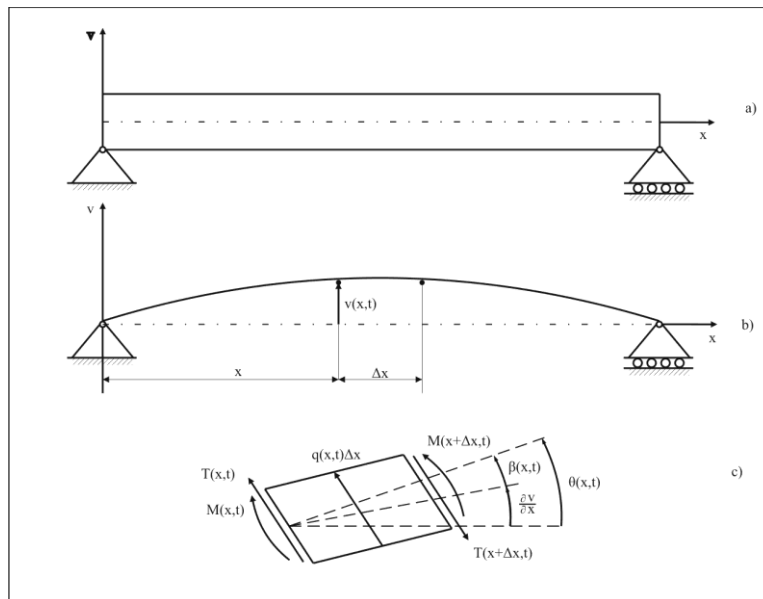


Figura 3.5. Modelul fizic al vibrațiilor de încovoiere ale unei bare

Presupunând neglijabilă deplasarea în lungul axei Ox , se pot scrie două ecuații de echilibru pentru elementul considerat. Ecuația de proiecții pe direcția transversală se poate scrie:

$$\rho A \Delta x \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = T(x+\Delta x, t) - T(x, t) + q(x, t) \Delta x, \quad (3.37)$$

iar ecuația de momente față de centrul de masă al elementului va fi:

$$J \Delta x \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} = M(x+\Delta x, t) - M(x, t) - T(x+\Delta x, t) \frac{\Delta x}{2} - T(x, t) \frac{\Delta x}{2}. \quad (3.38)$$

Împărțind cele două ecuații (3.37) și (3.38) prin Δx și trecând la limită pentru $\Delta x \rightarrow 0$ se obțin ecuațiile:

$$\rho A \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = -\frac{\partial T}{\partial x} + q(x, t) \quad (3.39)$$

și

$$J \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} = \frac{\partial M}{\partial x} - T \quad (3.40)$$

Pe de altă parte, din teoria de rezistența materialelor, se poate scrie:

$$\frac{\partial \theta}{\partial x} = \frac{M}{EI} \quad (3.41)$$

și

$$\beta = \frac{T}{kAG} = \theta - \frac{\partial v}{\partial x} \quad (3.42)$$

Termenii $J \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2}$ și $\frac{T}{kAG}$ sunt numiți, în mod uzual, efecte de ordinul doi, unde coeficientul k are valoarea 5/6 pentru secțiuni dreptunghiulare și 9/10 pentru secțiuni circulare.

Primul termen a fost introdus de *Rayleigh* și ține cont de inerția de rotație, iar al doilea a fost introdus de *Timoshenko* și ține cont de efectul deformației de alunecare a secțiunilor sub acțiunea forțelor tăietoare. Eliminând T , M și θ între relațiile (3.39), (3.40), (3.41) și (3.42) se obține *ecuația lui Timoshenko* pentru bare omogene de secțiune constantă.

$$EI \frac{\partial^4 v}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} - \rho I \left(1 + \frac{sE}{G}\right) \frac{\partial^4 v}{\partial x^2 \partial t^2} + \rho^2 I \frac{sE}{G} \frac{\partial^4 v}{\partial t^4} = 0 \quad (3.43)$$

În ecuația (3.43) se pot identifica termenii de corecție dați de inerția de rotație, respectiv de deformația de alunecare. Neglijând acești termeni, din ecuația (3.43) se deduce *ecuația Euler – Bernoulli*:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(EI \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right) + \rho A \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = q(x, t) \quad (3.44)$$

care, în cazul barelor de secțiune constantă devine:

$$EI \frac{\partial^4 v}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = q(x, t) \quad (3.45)$$

În cazul particular $q(x, t) = 0$, în lipsa forțelor perturbatoare, se obține ecuația vibrațiilor libere transversale ale barei:

$$\frac{\partial^2 v}{\partial t^2} + a^2 \frac{\partial^4 v}{\partial x^4} = 0, \quad (3.46)$$

unde

$$a = \sqrt{\frac{EI}{\rho A}}. \quad (3.47)$$

Trebuie remarcat că efectul corecției dat de deformația de alunecare și de inerția de rotație crește odată cu creșterea modului considerat și descrește cu lungimea și inversul razei de girație.

3.2.2.2 Vibrațiile libere de încovoiere ale unei bare

Vibrațiile libere de încovoiere ale barelor lungi și subțiri, cazul Bernoulli – Euler sunt guvernate de ecuația:

$$(EIv'''' + \rho A \ddot{v} = 0. \quad (3.48)$$

Pentru integrarea ecuației (3.48) se va aplica metoda separării variabilelor, soluția luându-se de forma:

$$v(x, t) = V(x) \cdot T(t), \quad (3.49)$$

unde $V(x)$ și $T(t)$ sunt funcții ce urmează a fi determinate. Înlocuind (3.49) în ecuația (3.48), aceasta, pentru bare omogene și de secțiune constantă, devine:

$$EI \cdot V^{IV}(x) \cdot T(t) + \rho A V(x) \cdot \ddot{T}(t) = 0, \quad (3.50)$$

care poate fi separată în următoarele două ecuații, fiecare având altă variabilă :

$$\frac{EI}{A} \frac{V^{IV}}{V} = -\frac{\ddot{T}}{T} = p^2. \quad (3.51)$$

În acest caz rapoartele (3.51) sunt satisfăcute pentru orice x și t numai dacă sunt egale cu aceeași constantă. Din condiția de mărginire în timp rezultă că această constantă trebuie să fie pozitivă. Cele două ecuații care se pot scrie din (3.51) sunt:

$$\ddot{T} + p^2 T = 0, \quad (3.52)$$

respectiv

$$V^{IV} - \frac{\rho A}{EI} p^2 V = 0. \quad (3.53)$$

Ecuția (3.52) are soluția de forma:

$$T(t) = A \sin pt + B \cos pt, \quad (3.54)$$

iar pentru ecuația (3.53) soluția este de forma $e^{\lambda x}$ obținându-se ecuația caracteristică:

$$\lambda^4 - \frac{\rho A p^2}{EI} = 0, \quad (3.55)$$

și are rădăcinile : $\lambda_1 = \lambda$, $\lambda_2 = -\lambda$, $\lambda_3 = i\lambda$, $\lambda_4 = -i\lambda$, unde cu λ s-a notat:

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{\rho A p^2}{EI}}. \quad (3.56)$$

Soluția generală se va scrie:

$$V(x) = C \cdot \text{sh } \lambda x + D \cdot \text{ch } \lambda x + E \cdot \sin \lambda x + F \cdot \cos \lambda x. \quad (3.57)$$

Există cinci constante de integrare în soluția generală, C , D , E și F , iar pulsațiile proprii p sunt asociate fiecărei valori proprii λ . Pentru determinarea acestor constante se folosesc condițiile de limită (frontieră):

a) Capăt încastrat (I)

$$v(x, t)|_{x=0} = 0 \quad \text{și} \quad v'(x, t)|_{x=0} = 0 \quad (3.58)$$

adică deplasarea și unghiul de înclinare sunt nule.

b) Capăt simplu rezemat sau articulat (R)

$$v(x, t)|_{x=L} = 0 \quad \text{și} \quad M(x, t)|_{x=L} = 0 \quad (3.59)$$

ceea ce înseamnă că deplasarea și momentul încovoietor sunt nule în capătul simplu rezemat. Ultima relație este echivalentă cu $v''(x, t)|_{x=L} = 0$.

c) Capăt liber (L)

$$T(x, t)|_{x=L} = 0 \quad \text{sau} \quad \frac{\partial^3 v}{\partial x^3} \Big|_{x=L} = 0 \quad \text{și} \quad M(x, t)|_{x=L} = 0 \quad \text{sau} \quad \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \Big|_{x=L} = 0 \quad (3.60)$$

În Tabelul 3.2 sunt date cazurile cele mai frecvente de legături la care poate fi supusă o bară, în care simbolul R reprezintă rezemarea, I încastrare, iar L reprezintă capăt liber.

Tabelul 3.2. Ecuațiile caracteristice și primele cinci rădăcini ale acestora pentru cele mai frecvente legături ale unei bare

Tipul legăturii	Ecuația caracteristică	X_1^2	X_2^2	X_3^2	X_4^2	X_5^2
I - L	$1 + \text{ch} X \cos X = 0$	3,516	22,03	61,69	120,9	199,8
R - R	$\sin X = 0$	9,869	39,47	88,82	157,9	246,7
I - I; L - L	$1 - \text{ch} X \cos X = 0$	22,37	61,67	120,9	199,8	272,0
I - R; L - R	$\text{tg} X = \text{th} X$	15,41	49,96	104,2	178,2	298,5

În ecuațiile caracteristice s-a notat $X = \lambda L$, deci pentru rădăcinile ecuațiilor caracteristice din tabelul 3.2 se poate scrie:

$$X_r = \lambda_r L, \quad r = 1, 2, 3, \dots, n \quad (3.61)$$

unde r reprezintă ordinul modului de vibrație luat în considerare. În baza ecuațiilor (3.56) și (3.58), pentru orice mod r de vibrație, rezultă următoarele două relații:

$$\lambda_r = \sqrt[4]{\frac{\rho A p_r^2}{EI}} = \sqrt[4]{\frac{p_r^2}{a^2}} \quad (3.62)$$

respectiv,

$$p_r = a \frac{X_r^2}{L^2} = \frac{X_r^2}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad (3.63)$$

Din relația (3.63) se poate determina modulul de elasticitate longitudinal E , al cărei expresie este:

$$E = \frac{p_r^2 L^4 \rho A}{X_r^4 I} = \frac{4n^2 f_r^2 L^4 \rho A}{X_r^4 I} \quad (3.64)$$

Se poate constata că în această relație sunt cunoscute elemente legate de geometria barei: lungimea L , aria secțiunii transversale A , momentul de inerție geometric al secțiunii transversale în raport cu axa longitudinală ce trece prin centrul ei, dar și o caracteristică de material și anume densitatea ρ . În această expresie (3.64) nu se cunoaște o singură mărime, frecvența unui mod propriu de vibrație de încovoiere f_r . Această mărime poate fi determinată pe cale experimentală, din înregistrarea unui semnal de vibrație și prelucrarea acestuia.

Dacă bara este constituită din două table subțiri îmbinate prin sudură sau prin lipire, atunci ecuația Euler – Bernoulli (3.44) pentru vibrațiile libere ale îmbinării va avea forma:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left((E_1 I_1 + E_2 I_2) \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right) + (\rho_1 A_1 + \rho_2 A_2) \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = 0, \quad (3.65)$$

unde E_1 și E_2 sunt modulii de elasticitate longitudinală ai celor două table îmbinate, I_1 și I_2 sunt momentele de inerție geometrice polare față de axa longitudinală a barei și care trece prin centrul secțiunii transversale, ρ_1 și ρ_2 sunt densitățile celor două materiale, iar A_1 și A_2 sunt ariile transversale ale secțiunilor celor două bare. Având în vedere faptul că modulii de elasticitate sunt constante de material, iar momentele de inerție geometrice pentru table de dimensiuni geometrice date, nu variază în lungul axei longitudinale, ecuația (3.65) se mai poate scrie sub forma :

$$(E_1 I_1 + E_2 I_2) \frac{\partial^4 v}{\partial x^4} + (\rho_1 A_1 + \rho_2 A_2) \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = 0, \quad (3.66)$$

adică este de forma (3.46), de unde se determină a:

$$a = \sqrt{\frac{E_1 I_1 + E_2 I_2}{\rho_1 A_1 + \rho_2 A_2}}, \quad (3.67)$$

iar din relația (3.62) se determină λ_r :

$$\lambda_r = \sqrt[4]{\frac{\rho_1 A_1 + \rho_2 A_2}{E_1 I_1 + E_2 I_2}} p_r^2. \quad (3.68)$$

Din această ultimă relație se pot explicita frecvențele modurilor de vibrație ale îmbinării, astfel:

$$f_r = \frac{1}{2n} \frac{X_r^2}{L^2} \sqrt{\frac{E_1 I_1 + E_2 I_2}{\rho_1 A_1 + \rho_2 A_2}}. \quad (3.69)$$

Trebuie menționat faptul că în toate relațiile deduse mai sus, dar și în cele ce urmează, s-a presupus faptul că cele două componente, sau mai multe componente, care intră în structura îmbinată au aceeași lungime L.

Problema se poate generaliza pentru cazul în care sunt mai multe table îmbinate, sau mai multe straturi de acoperiri metalice sau în cazul materialelor compozite. Pentru aceste situații, frecvențele proprii au următoarele expresii:

$$f_r = \frac{X_r^2}{2nL^2} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N E_i I_i}{\sum_{i=1}^N \rho_i A_i}}, \quad (3.70)$$

unde r reprezintă ordinul modului de vibrație ($r = 1, 2, 3, \dots, n$), iar N reprezintă numărul de componente (straturi) din îmbinare. În relațiile de tip (3.70) toate mărimile sunt constante de material sau dimensiuni geometrice, exceptând valorile X_r care depind de natura condițiilor de frontieră.

Produsul EI se numește rigiditate echivalentă la încovoiere și este dată de formula :

$$\bar{EI} = \sum_{i=1}^N E_i I_i. \quad (3.71)$$

Această mărime este foarte importantă pentru comportarea dinamică a unor structuri. Prin urmare, rigiditatea la încovoiere a structurii formate prin îmbinarea mai multor table subțiri din materiale disimilare sau nu, a structurii rezultate prin acoperirea unei table cu mai multe straturi metalice sau vopsele de protecție (metalizate) sau a unor materiale compozite se poate determina experimental prin determinarea frecvențelor de rezonanță.

4. ELEMENTE DE ANALIZA SEMNALELOR

Dezvoltarea continuă a puterii de calcul a dus la dezvoltarea, în ultimele decenii, atât a sistemelor de achiziții a semnalelor cât și a programelor folosite pentru prelucrarea datelor achiziționate.

Achiziționarea de semnale culese de la zeci de traductori, cu o frecvență de achiziție foarte mare, stocarea acestora pe un suport digital, dar și prelucrarea în timp real, sunt activități uzuale în domeniul achiziției și prelucrării semnalelor.

Firme de prestigiu oferă soluții integrate și complete pentru satisfacerea cererii de pe piață, cerere impulsionată de dezvoltarea industrială. Reducerea continuă a timpului necesar de la stadiul de idee la stadiul de produs nou a dus la reducerea prețurilor de cost, la impulsionarea firmelor de inovare, firme care au posibilitatea oferirii de sisteme de achiziții de date, sau firme care dezvoltă standuri de testări dedicate validării integrității unui produs.

Prin urmare, s-au dezvoltat continuu noi metode numerice pentru a procesa semnalele în scopuri diverse, cum ar fi: reducerea zgomotului, testarea de noi ipoteze, optimizare de strategii de măsurare, diagnosticarea și înțelegerea dificultăților care apar datorită măsurătorilor sau descompunerii semnalelor.

Principalul aspect care trebuie avut în vedere atunci când se achiziționează semnale, este acela ca printr-o măsurătoare cât mai simplă să se obțină suficientă informație astfel ca printr-o prelucrare ulterioară a semnalului original să obținem acei parametri estimativi care caracterizează structura sau echipamentul mecanic investigat.

În cele ce urmează sunt prezentate elementele de bază din analiza semnalelor care sunt utile în măsurătorile experimentale făcute cu sunete, vibrații sau lumină laser.

4.1 Tipuri de semnale

Semnalul se definește ca fiind suportul fizic al informației transferate între diferite sisteme în care este structurată lumea înconjurătoare. Orice semnal este, din punct de vedere matematic, o funcție de timp atașată unei mărimi de natură fizică, dar în definirea unui semnal pot interveni și alte variabile reprezentate de mărimi fizice precum spațiul, temperatura etc.

Când valorile unui semnal sunt cunoscute în orice moment, acesta se numește semnal determinist, și poate fi scris ca funcție de timp $x = x(t)$. Dacă valorile semnalului nu pot fi determinate cu un număr finit de parametri, acesta se numește semnal nedeterminist sau aleatoriu (probabilistic). Semnalele deterministe au un conținut de frecvență relativ constant de-a lungul unei perioade de timp mai lungi. Aceste tipuri de semnale se pot întâlni mai ales în dinamica mașinile rotative sau la instrumentele muzicale.

Semnalele, în funcție de modul de variație în timp sau de modul de definire al timpului pot fi clasificate în semnale continue și semnale discrete, respectiv în semnale definite în timp continuu și semnale definite în momente discrete de timp.

Semnalele se numesc periodice de perioadă T , dacă au proprietatea: $x(t) = x(t+nT)$, pentru orice $t \in \mathbb{R}$ și $n \in \mathbb{N}$. Cele care nu satisfac proprietatea de

periodicitate, se numesc aperiodice. Semnalele deterministe pot fi atât periodice cât și cvasi-periodice. Dacă semnalele periodice se pot exprima ca o dezvoltare în serie armonică, cele cvasi-periodice se pot exprima de regulă ca o combinație de serii armonice.

Deseori, pentru a obține informații de natură experimentală, este suficient să se cunoască semnalele sub forma neprelucrată, ca funcție de timp. În practică, pentru investigații detaliate sau obținerea de informații suplimentare și poate mai intuitive, este necesară utilizarea analizei semnalelor.

Semnalele pot fi clasificate în funcție de natura domeniului de definiție a variabilei independente (timpul) și al domeniului în care funcția ia valori în: a) semnale continue în timp continuu, b) semnale continue în timp discret, c) semnale discrete în timp continuu și d) semnale discrete în timp discret.

În continuare se va face o scurtă descriere a fiecăruia dintre cele patru tipuri de semnal enumerate anterior, oferind și câteva exemple mai des întâlnite în aplicațiile ingineresti.

4.1.1 Semnale continue în timp continuu

Reprezintă semnalele care există în toate momentele de timp din intervalul analizat și a căror amplitudine poate lua orice valoare reală în domeniul lor de valori. Reprezentarea lor grafică este ilustrată în figura 4.1. Circuitele care prelucrează acest tip de semnale, se numesc circuite analogice, respectiv sisteme analogice. În consecință, aceste semnale mai poartă denumirea de semnale analogice. Deci semnalele analogice există teoretic într-o infinitate de momente dintr-un interval dat și pot lua o infinitate de valori într-un domeniu finit.

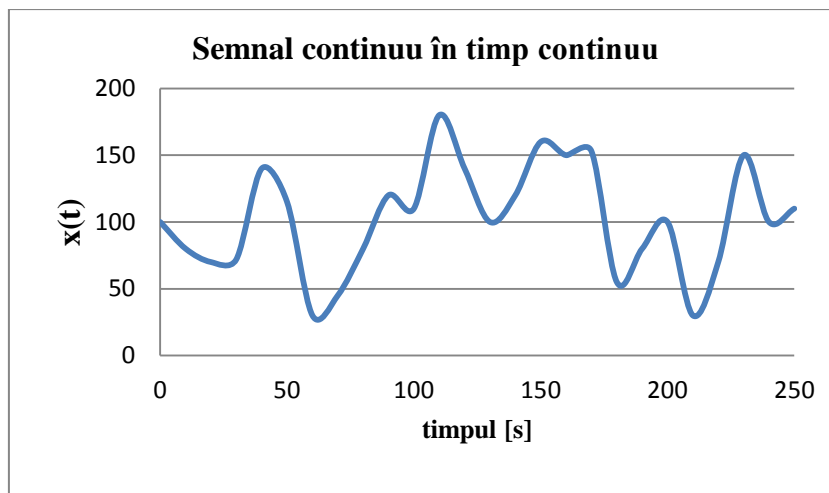


Figura 4.1 Exemplu de semnal continuu in timp continuu

De regulă, semnalele provenite din mediul înconjurător sunt continue în timp și amplitudine. Ele pot fi de natură electrică (tensiune, curent, câmp electric, câmp magnetic), de natură mecanică (deplasare liniară, deplasare unghiulară, viteză, accelerație, viteza unghiulară, accelerație unghiulară, forțe, cuplu, presiune) sau fizico-chimică (temperatură, pH). Pentru a putea fi prelucrate, acestea sunt convertite în mărimi electrice (tensiune sau curent) cu ajutorul unor traductori.

Semnalele continue în timp continuu descriu în modul cel mai fidel mărimea fizică monitorizată.

4.1.2 Semnale continue în timp discret

Reprezintă semnalele definite doar în anumite momente ale domeniului timp și a căror amplitudine poate fi orice valoare reală.

Practic semnalele continue în timp discret provin din semnale continue în timp continuu cărora, printr-o prelucrare matematică, le este restrâns domeniului de definiție.

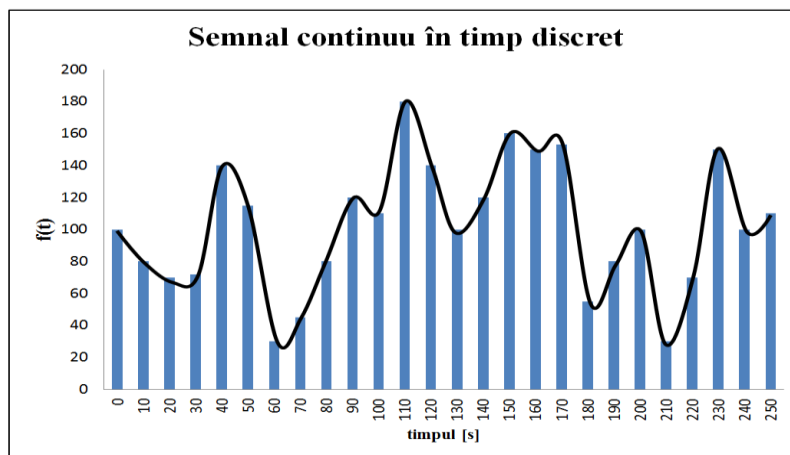


Figura 4.2 Exemplu de semnal continuu în timp discret

Operația prin care din semnalul continuu se iau doar anumite probe, denumite în continuare eșantioane, corespunzătoare unor valori discrete ale timpului, se numește eșantionare. Dacă valorile discrete de timp se aleg echidistante, intervalul de timp dintre două eșantioane formează perioada de eșantionare. Inversul perioadei de eșantionare constituie frecvența de eșantionare și reprezintă numărul de eșantioane din fiecare secundă.

4.1.3 Semnale discrete în timp continuu

Reprezintă semnalele care sunt descrise în toate momentele domeniului timp în intervalul de timp analizat, dar a căror amplitudine nu poate lua decât anumite valori discrete din domeniul lor de valori.

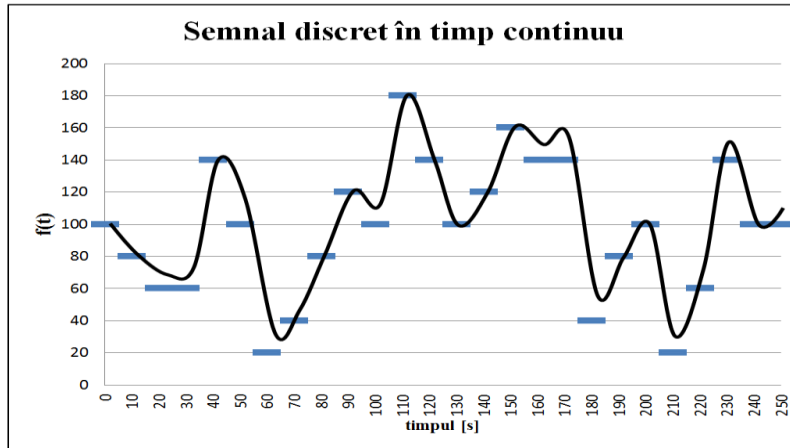


Figura 4.3 Exemplu de semnal discret in timp continuu

De exemplu, dacă măsurăm o presiune acustică în timp continuu cu un sonometru numeric al cărui afișaj are un număr predefinit de cifre, acesta poate indica o valoare discretă a presiunii acustice de 2.22 Pascali.

Operația prin care un semnal continuu este reprezentat cu un număr finit de cifre sau un număr finit de biți se numește **discretizare**.

4.1.4 Semnale discrete în timp discret

Sunt semnale care se obțin din cele continue în timp continuu prin eșantionare în momente de timp bine definite, și apoi prin discretizarea valorii semnalului, luând valori discrete din domeniul său de valori.

Astfel, semnalul va lua doar un număr finit de valori discrete și doar pentru anumite momente de timp.

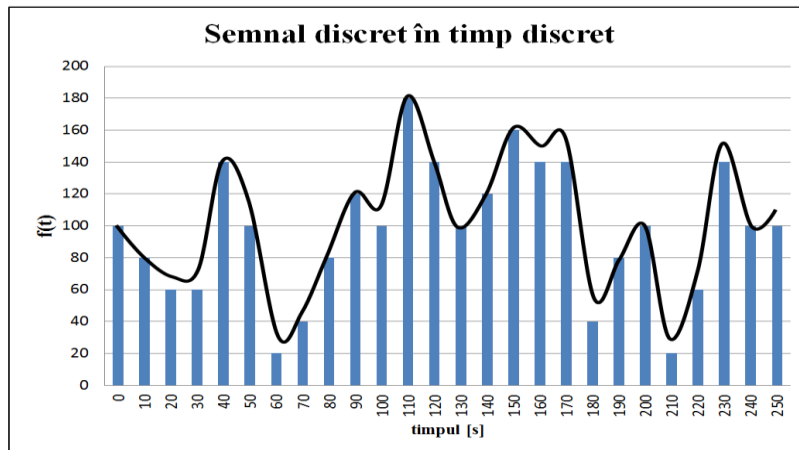


Figura 4.4 Exemplu de semnal discret în timp discret

Acest tip de semnale sunt prelucrate de circuite digitale, operația putând fi numită digitizare. Exemplificând, ele sunt obținute din semnalele analogice prin eșantionare și digitizare, semnalele astfel rezultate numindu-se semnale digitale.

Prin eșantionare și digitizare se pierde o parte din informația purtată de semnalul analogic inițial. Practic, semnalul este mai sărac în informații, și acest lucru trebuie avut în vedere atunci când se stabilesc tipul și parametrii de măsură ai aparaturii folosite pentru investigații experimentale.

Eșantionarea și digitizarea reprezintă unele dintre dezavantajele asumate ale sistemelor moderne de achiziții de date. Totuși, aceste inconveniente ale sistemelor de achiziții de date sunt mici comparativ cu avantajele pe care acestea le oferă: repetabilitatea măsurătorilor, stabilitatea sistemului de măsură, viteză mare de prelucrare și generare de rapoarte ale măsurătorilor. Toate aceste avantaje se traduc în final în economie de timp și de bani.

4.2 Metode de analiză a semnalelor

Analiza semnalelor reprezintă o prelucrare matematică importantă pentru a putea înțelege fenomenele descrise de ecuații diferențiale existente în diverse sisteme: electrice, mecanice, termice, hidraulice, optice etc. În continuare se vor arată câteva metode cunoscute de prelucrare a semnalelor utilizând: *Seriile Fourier*, *Transformatele Fourier*, *Metoda seriilor Prony cât și Metoda bazată pe efectul Doppler*. Unele dintre aceste metode au fost și sunt utilizate cu precădere în analiza semnalelor electrice. Analiza semnalelor de vibrații se pretează cu toate metodele enumerate, dar metoda seriilor Prony sau metoda bazată pe fenomenul Doppler sunt metode foarte puțin aplicate în acest domeniu.

4.2.1 Analiza spectrală a semnalelor periodice

Un semnal periodic $x(t)$ are următoarea proprietate: $x(t) = x(t+nT)$ pentru orice $t \in \mathbb{R}$ și $n \in \mathbb{N}$, unde T reprezintă perioada.

Dacă se notează frecvența cu $f = 1/T$, și pulsația fundamentală cu $\omega = 2\pi f$ atunci semnalul periodic se poate dezvolta în următoarele serii Fourier:

- Seria Fourier Trigonometrică (SFT);
- Seria Fourier Armonică (SFA);
- Seria Fourier Complexă (SFC).

Toate cele trei tipuri de dezvoltare în serie Fourier a unui semnal periodic $x(t)$ sunt echivalente din punct de vedere matematic.

4.2.1.1 Forma trigonometrică a dezvoltării în serie Fourier (SFT)

Expresia matematică a dezvoltării în serie Fourier a semnalului $x(t)$ este următoarea:

$$x(t) = \sum_{n=0}^{\infty} [S_n \sin(n\omega t) + C_n \cos(n\omega t)] \quad (4.1)$$

unde cei doi coeficienți S_n și C_n se pot calcula înmulțind relația (4.1), prima dată cu $\sin(n\omega t) \cdot dt$, iar a doua oară cu $\cos(n\omega t) \cdot dt$ și integrând pe întreaga perioadă T . Ținând cont de proprietățile de ortogonalitate a funcțiilor trigonometrice se obțin relațiile:

$$S_n = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \cdot \sin(n\omega t) \cdot dt \quad (4.2)$$

$$C_n = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \cdot \cos(n\omega t) \cdot dt \quad (4.3)$$

în care $t \in \mathbb{R}$ și $n \in \mathbb{N}$.

Dacă $n=0$, atunci:

$S_0 = 0$, iar $C_0 = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) \cdot dt$ reprezintă aria cuprinsă între graficul funcției $x(t)$ și abscisă, împărțită la T , adică valoarea medie a semnalului $x(t)$. Ținând cont ca valoarea medie a oricărei componente sinusoidale (cosinusoidale) pe o perioadă este nula, constanta C_0 dă valoarea continuă a semnalului.

4.2.1.2 Forma armonică a dezvoltării în serie Fourier (SFA)

Seria trigonometrică exprimată prin funcțiile sinus și cosinus se poate restrânge într-o formă mai compactă folosind numai funcții sinus sau numai funcții cosinus, după cum urmează:

$$x(t) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n \sin(n\omega t + \varphi_n); \quad (4.4)$$

$$x(t) = \sum_{n=0}^{\infty} B_n \cos(n\omega t + \psi_n), \quad (4.5)$$

unde A_n și B_n reprezintă amplitudinea, iar φ_n și ψ_n reprezintă defazajul armonicii de pulsație $n\omega$ în funcție de dezvoltarea semnalului în funcții sinusoidale sau cosinusoidale.

Între coeficienții S_n și C_n , și amplitudinile A_n și B_n , respectiv fazele corespunzătoare φ_n și ψ_n există următoarele relații:

$$S_n = A_n \cos \varphi_n, \quad (4.6)$$

$$C_n = A_n \sin \varphi_n, \quad (4.7)$$

$$A_n = \sqrt{S_n^2 + C_n^2}, \quad (4.8)$$

$$\varphi_n = \arctg \frac{C_n}{S_n}, \quad (4.9)$$

$$S_n = -B_n \sin \psi_n, \quad (4.10)$$

$$C_n = B_n \cos \psi_n, \quad (4.11)$$

$$B_n = \sqrt{S_n^2 + C_n^2} = A_n, \quad (4.12)$$

$$\psi_n = -\arctg \frac{S_n}{C_n}, \quad (4.13)$$

Se poate astfel observa că un semnal periodic $x(t)$ se poate dezvolta ca o sumă de oscilații sinusoidale sau cosinusoidale, de amplitudini A_n și pulsații $n\omega$ denumite armonici. Pentru un semnal armonic spectrul de amplitudine și spectrul de frecvență este reprezentat în figura 4.5.

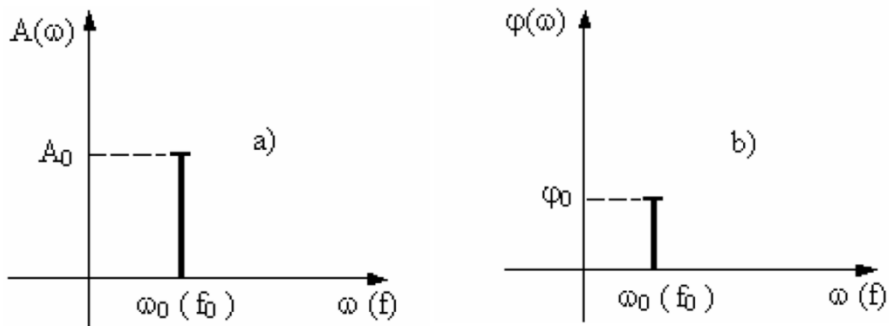


Figura 4.5. Spectrul de amplitudine și spectrul de fază pentru un semnal armonic

Reprezentarea perechilor formate din amplitudinile A_n și pulsațiile corespunzătoare $n\omega$ se numește spectrul amplitudinilor semnalului $x(t)$ (Figura 4.6). Reprezentarea perechilor fazelor φ_n sau ψ_n și pulsațiile corespunzătoare $n\omega$ se numește spectrul fazelor semnalului $x(t)$ (Figura 4.7)

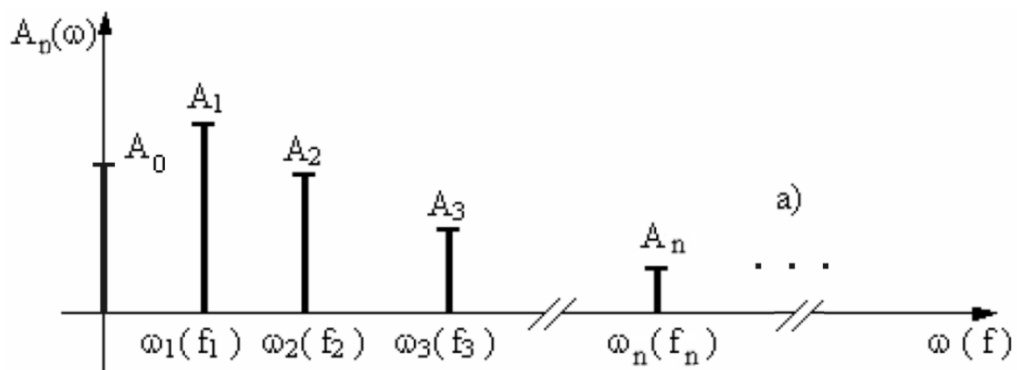


Figura 4.6 Spectrul amplitudinilor

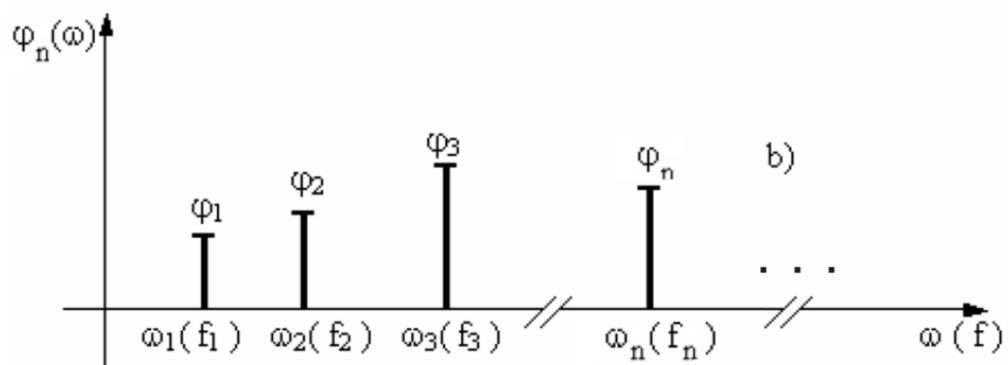


Figura 4.7 Spectrul fazelor

Descompunerea semnalului $x(t)$ în armonici se numește **analiză spectrală**, iar reconstrucția semnalului $x(t)$ prin suprapunerea de armonici se numește **sinteză spectrală**.

4.2.1.3 Forma complexă a dezvoltării în serie Fourier (SFC)

Descompunerea în serie Fourier complexă se poate obține pornind de la SFT folosind următoarele relații ale lui Euler:

$$\cos(n\omega t) = \frac{e^{in\omega t} + e^{-in\omega t}}{2}, \quad \sin(n\omega t) = \frac{e^{in\omega t} - e^{-in\omega t}}{2i}, \quad (4.14)$$

unde $i = \sqrt{-1}$. Înlocuind aceste relații în ecuația (4.1) se obține:

$$x(t) = C_0 + \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[\frac{(C_n - iS_n)}{2} e^{in\omega t} + \frac{(C_n + iS_n)}{2} e^{-in\omega t} \right]. \quad (4.15)$$

Relația (4.15) se mai poate pune și sub forma :

$$x(t) = A_{0c} + \sum_{n=1}^{-1} A_{nc} e^{in\omega t} + \sum_{n=1}^{\infty} A_{nc} e^{in\omega t}, \quad (4.16)$$

sau

$$x(t) = A_{0c} + \sum_{n=1}^{\infty} A_{-nc} e^{-in\omega t} + \sum_{n=1}^{\infty} A_{nc} e^{in\omega t} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_{nc} e^{in\omega t}, \quad (4.17)$$

unde s-au folosit notațiile:

$$A_{nc} = A_{nc}(n\omega); \quad A_{-nc} = A_{nc}(-n\omega) \quad (4.18)$$

Din identificarea coeficienților din relațiile (4.15) și (4.17) se obțin:

$$\begin{aligned} A_{0c} &= C_0 = A_0 \\ A_{nc} &= \frac{C_n - iS_n}{2} \end{aligned} \quad (4.19)$$

$$A_{-nc} = \frac{C_n + iS_n}{2}, \quad (4.20)$$

relații care pun în evidență legăturile dintre coeficienții SFT și SFA.

Pentru calculul coeficienților SFC se înmulțește ecuația (4.17) cu $e^{-in\omega t} dt$ și se integrează pe perioada T ,

$$A_{nc} = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) e^{-in\omega t} dt, \quad (4.21)$$

în care A_{nc} reprezintă un număr complex, prin urmare semnalul periodic $x(t)$ va avea un spectru discret complex. Prin urmare coeficienții A_{nc} pot fi reprezentați prin modul și fază:

$$A_{nc} = |A_{nc}| e^{i\psi_n} \quad (4.22)$$

și

$$\begin{cases} |A_{nc}| = |A_{-nc}| = \frac{A_n}{2} \\ \psi_n = -\arctg \frac{S_n}{C_n} \end{cases} \quad (4.23)$$

Seriile Fourier Complexe (SFC) sunt de preferat seriilor armonice (SFA) datorită simplității cu care se pot efectua unele calcule (derivări, integrări) și datorită caracterului mai general. Relațiile (4.21) reprezintă analiza spectrală în SFC, iar relația (4.17) reprezintă sinteza spectrală.

Analiza în domeniul frecvență se realizează prin reprezentarea diagramei spectrale asociate seriei complexe $|A_{nc}(\omega)|$ sau $|A_{nc}(nf_0)|$ și spectrului fazelor $\psi(\omega)$ sau $\psi(nf_0)$. Liniile spectrale asociate seriei armonice (SFA) sunt localizate la pulsațiile (frecvențele) $n\omega$ (nf_0). Reprezentarea unei serii Fourier sub formă complexă (SFC), utilizează atât frecvențe pozitive cât și negative: $-nf, \dots, -3f, -2f, -f, 0, f, 2f, 3f, \dots, nf$.

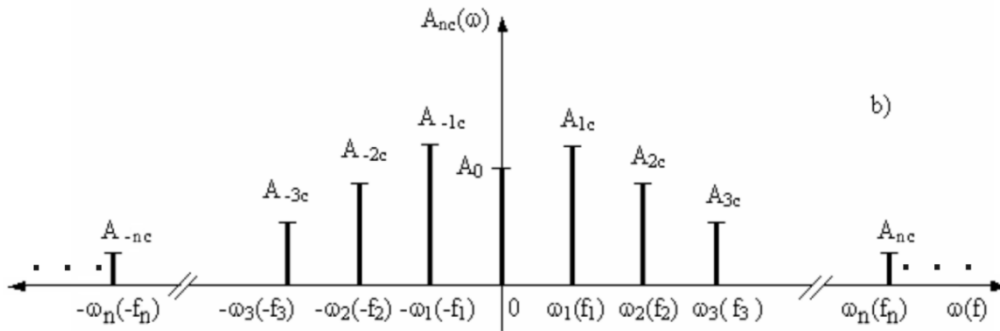


Figura 4.8 Spectrul de amplitudine al unui semnal $x(t)$ prin SFC.

Prezența frecvențelor negative în SFC se explică prin faptul că există întotdeauna perechi de câte două componente exponențiale simetrice față de ordonată care însumate dau o componentă sinusoidală de frecvență pozitivă. Prin urmare, frecvențele negative sunt introduse de acest aparat matematic de dezvoltare în SFC. Ele nu au o semnificație fizică luate individual, ci numai în perechi de frecvențe $(-\omega; +\omega)$.

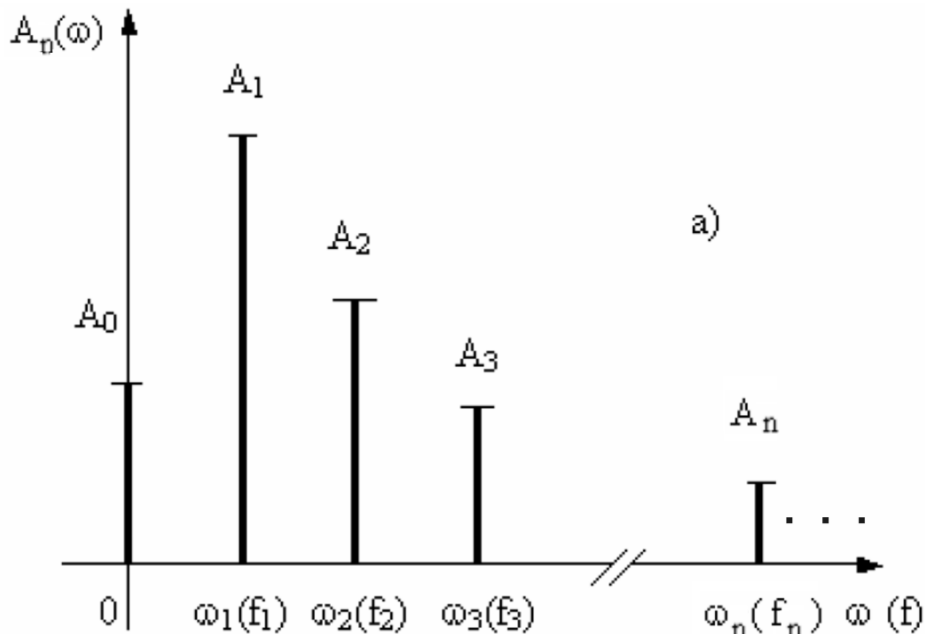


Figura 4.9. Spectrul de amplitudine al aceluiași semnal $x(t)$ prin SFA.

În analiza unui semnal periodic prin SFC, semnificație fizică au numai frecvențele pozitive, iar amplitudinile din spectrul SFC sunt jumătate din amplitudinile spectrului SFA.(figurile 4.8 și 4.9).

Concluzii:

- Spectrul unui semnal periodic este discret existând doar la multiplii frecvenței fundamentale care corespunde perioadei semnalului analizat;
- Din punct de vedere teoretic spectrul în frecvență se întinde de la $\omega = 0$ la $\omega = \infty$, dar din punct de vedere practic el se limitează la un număr finit de termeni, număr de la care se poate constata că amplitudinile sunt neglijabile în raport cu amplitudinea fundamentalei;
- Banda de frecvență a unui semnal corespunde frecvențelor armonicilor ale căror amplitudini sunt mai mari decât o fracțiune din amplitudinea fundamentală.

4.2.2 Analiza spectrală a semnalele neperiodice

După cum s-a constatat, seriile Fourier s-au aplicat unor semnale continue și periodice. Semnalele aperiodice se pot descompune și ele în componente armonice. Acest proces aplicat unor semnale neperiodice se numește Transformată Fourier. Să presupunem un semnal a cărui domeniu de definiție este mult mai mic decât perioada T . În figura 4.9.a este reprezentat un semnal aperiodic, dar care îndeplinește un set de condiții suficiente pentru existența transformatei Fourier a semnalelor aperiodice :

1. Semnalul $x(t)$ are un număr finit de discontinuități;
2. Semnalul $x(t)$ conține un număr finit de maxime și minime;
3. Semnalul $x(t)$ este absolut integrabil, adică,

$$\int_{-\infty}^{\infty} |x(t)| dt < \infty. \quad (4.24)$$

Acestea sunt numite condițiile lui Dirichlet. O altă condiție de convergență, dar mai slabă decât (4.24), este aceea ca semnalul să fie de energie finită, adică să fie de pătrat integrabil.

$$\int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 dt < \infty \quad (4.25)$$

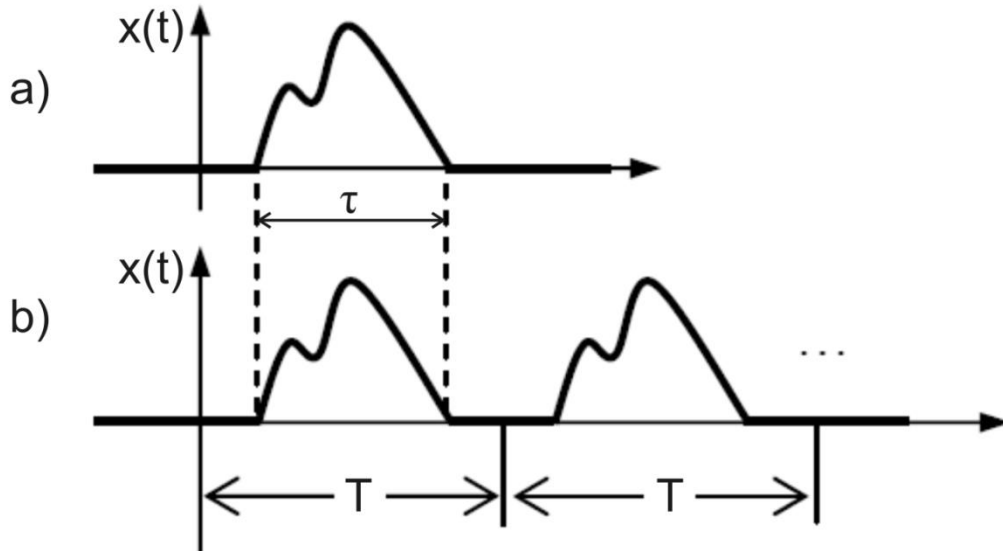


Figura.4.10 Semnal periodic obținut din semnal neperiodic

Din semnalul aperiodic $x(t)$ definit pe un interval de timp $(0, \tau)$, unde $\tau < T$ se poate crea un semnal periodic $x_T(t)$ așa cum se arată în figura 4.10b. Semnalul periodic se poate descompune în SFC (4.17).

$$x_T(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_{nc} e^{in\omega t} \quad (4.26)$$

Deoarece pe întreaga perioadă T , semnalul $x(t) = x_T(t)$, coeficienții SFC sunt dați de relația (4.21)

$$A_{nc} = \frac{1}{T} \int_0^T x_T(t) e^{-in\omega t} dt = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) e^{-in\omega t} dt \quad (4.27)$$

Introducând coeficienții dați de (4.27) în (4.26) se obține:

$$x_T(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \left[\int_0^T x(t) e^{-in\omega t} dt \right] e^{in\omega t} \quad (4.28)$$

sau ținând cont că $2\pi/T = \omega$, relația de mai sus se poate scrie :

$$x_T(t) = \frac{1}{2\pi} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \left[\int_0^T x(t) e^{-in\omega t} dt \right] e^{in\omega t} \omega \quad (4.29)$$

În continuare se are în vedere faptul că semnalul aperiodic $x(t)$ este definit numai pentru intervalul $(0, \tau)$, iar T este foarte mare în comparație cu acest interval, prin urmare și pulsația ω va deveni foarte mică și se va nota cu $\Delta\omega$. Relația (4.29) devine:

$$x_T(t) = \frac{1}{2\pi} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[\int_0^T x(t) e^{-in\Delta\omega t} dt \right] e^{in\Delta\omega t} \Delta\omega. \quad (4.30)$$

În această situație se poate trece la limită cu $T \rightarrow \infty$ și $n\Delta\omega = \omega$, $\Delta\omega = d\omega$, în relația (4.30), și se obține:

$$\lim_{T \rightarrow \infty} x_T(t) = x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \left[\int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-i\omega t} dt \right] e^{i\omega t} d\omega. \quad (4.31)$$

Paranteza dreaptă a relației (4.31) se numește Transformata Fourier (TF) a semnalului $x(t)$ și se notează după cum urmează:

$$X(\omega) = F\{x(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-i\omega t} dt. \quad (4.32)$$

Transformata Fourier reprezintă modelul matematic al semnalului $x(t)$. Această transformată, numită și funcție spectrală sau caracteristică spectrală a semnalului, există pentru frecvențe pozitive și negative, deci pentru tot domeniul de frecvențe $(-\infty, \infty)$. Semnalul $x(t)$ se poate obține din funcția spectrală $X(\omega)$ prin Transformata Fourier Inversă (TFI), dată de relația (4.33) obținută din (4.31) după înlocuirea relației (4.32):

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} X(\omega) e^{i\omega t} d\omega = F^{-1}\{X(\omega)\}. \quad (4.33)$$

Relația (4.32) reprezintă analiza spectrală prin TF, iar relația (4.33) constituie sinteza spectrală pe baza TFI. Trebuie observat că TF transformă un semnal continuu aperiodic într-un spectru continuu. De asemenea se poate constata că TF este o funcție complexă, prin urmare se poate scrie sub forma:

$$X(\omega) = \operatorname{Re}X(\omega) + i\operatorname{Im}X(\omega) = |X(\omega)|e^{i\varphi(\omega)} \quad (4.34)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} |X(\omega)| = \sqrt{\operatorname{Re}^2 X(\omega) + \operatorname{Im}^2 X(\omega)} \\ \varphi(\omega) = \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{Im}X(\omega)}{\operatorname{Re}X(\omega)} \end{array} \right. \quad (4.35)$$

4.2.3 Analiza spectrală a semnalele discrete

Toate metodele de analiză a semnalelor prezentate în paragrafele precedente se referă la semnale analogice continue. Volumul mare de calcule necesare în prelucrarea semnalelor necesită o putere mare de calcul, adică utilizarea calculatoarelor. Acestea pot să facă operații numerice, prin urmare semnalul analogic trebuie transformat într-un semnal numeric. Această transformare se numește conversie analog digitală (CAD) pentru care s-a dezvoltat o tehnologie de procesare (prelucrare) a semnalelor digitale (PSD).

Semnalele de vibrații sunt și ele obținute pe baza unor traductoare sub forma de semnale analogice (de obicei o tensiune electrică). Transformata Fourier, analizată în paragraful precedent, transformă un semnal analogic din domeniul timp în domeniul frecvență pentru a putea face analiza acestuia în frecvență. Cu toate acestea, Transformata Fourier este o funcție continuă de frecvență și nu este potrivită pentru calculul cu un sistem de procesare a semnalelor digitale (PSD). Semnalul analogic este eșantionat și cuantificat într-un CAD și introdus la un PSD ca o secvență de numere. Prin urmare Transformata Fourier trebuie să fie modificată, astfel încât să se aplice unor eșantioane și nu unui semnal continuu.

Se consideră semnalul $x(t)$ definit (înregistrat) pe un interval T de timp. Pentru orice timp $t > T$ acesta va avea valoarea nulă. Considerând o fereastră de lungime T și un număr de eșantioane N , cu o rată de eșantionare Δt , aceasta se poate scrie $\Delta t = \frac{T}{N}$, iar punctele de eșantionare vor fi:

$$t_k = k\Delta t = k\frac{T}{N}, \text{ unde } k = 0, 1, 2, \dots, N-1. \quad (4.36)$$

În punctele de eșantionare valoarea semnalului se notează cu $x(t_k)$, iar asociate cu acestea se introduc frecvențele în care se calculează spectrul, date de formula:

$$\omega_n = 2\pi n f, \text{ unde } f = 1/T. \quad (4.37)$$

Numărul f se numește frecvență fundamentală. Acum se poate considera că transformata Fourier dată de relația (4.32) se aproximează prin valorile calculate în punctele $\omega_n = 2\pi n/T$, obținându-se :

$$X(\omega_n) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-i\omega_n t} dt, \quad n = 0, 1, 2, \dots, N-1. \quad (4.38)$$

Deoarece semnalul este dat numai pentru intervalul $(0, T)$, în restul intervalului de la $-\infty$, la ∞ este nul, relația (4.38) devine:

$$X(\omega_n) \approx \int_0^T x(t) e^{-i\omega_n t} dt, \quad n = 0, 1, 2, \dots, N-1. \quad (4.39)$$

În continuare se poate considera o aproximare a integralei (4.39) printr-o sumă Riemann (invers procesului de definire a integralei în sens Riemann) pe baza valorilor semnalului definite în punctele t_k . Cu aceste considerente integrala (4.39) se transformă în suma următoare:

$$X(\omega_n) \approx \Delta t \sum_{k=0}^{N-1} x(t_k) e^{-i\omega_n t_k}, \quad n = 0, 1, 2, \dots, N-1. \quad (4.40)$$

Înlocuind relația de definiție a punctelor de eșantionare (4.36) și a pulsațiilor (frecvențelor) din analiza spectrală, relația (4.40) se transformă în :

$$X(\omega_n) \approx \frac{T}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x(t_k) e^{-2\pi i n k / N}, \quad n = 0, 1, 2, \dots, N-1, \quad (4.41)$$

unde

$$X_n = \sum_{k=0}^{N-1} x(t_k) e^{-2\pi i n k / N}, \quad n = 0, 1, 2, \dots, N-1, \quad (4.42)$$

se numește Transformata Fourier Discretă (TFD). Relația (4.42) constituie analiza spectrală a unui semnal discret (eșantionat). Se constată că în această analiză intră inclusiv componenta continuă a semnalului, componentă ce se obține pentru $n = 0$.

Semnalul poate fi sintetizat din analiza spectrală dată prin TFD folosind Transformata Fourier Discretă Inversă (TFDI). Formula care dă Transformata Fourier Discretă Inversă este :

$$x(t_k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} X_n e^{+ \frac{2\pi i n k}{N}}, \quad n = 0, 1, 2, \dots, N-1, \quad (4.43)$$

Această formulă constituie sinteza spectrală pe baza TFDI.

Timul necesar pentru a evalua o TDF, dată prin relațiile (4.42), pe un calculator digital depinde în principal de numărul de multiplicări implicate, deoarece acestea sunt cele mai lente operații. Dacă semnalul este eșantionat într-un număr de N puncte atunci numărul calculelor necesare este N^2 . Acest lucru se observă din faptul că relațiile (4.42) constituie un sistem de N ecuații cu N necunoscute X_0, X_1, \dots, X_{N-1} , sistem ce se poate pune sub o formă matriceală, matricea sistemului având dimensiunea $N \times N$. Pentru cele mai multe probleme, N este ales cel puțin egal cu 256, în scopul obținerii unei aproximări rezonabile pentru spectrul secvenței luate în considerare. Din acest motiv viteza de calcul devine un aspect major în aplicarea algoritmilor dați de TFD. Algoritmi de calcul foarte eficienți pentru estimarea TFD au fost dezvoltăți pe la mijlocul anilor 1960. Aceștia sunt cunoscuți sub denumirea de Transformata Fourier Rapidă (TFR) și se bazează pe faptul că aplicarea metodei standard de TFD implică o mulțime de calcule care se repetă (redundante).

Pentru a arăta acest lucru este suficient să se scrie relația (4.42) sub următoarea formă:

$$X_n = \sum_{k=0}^{N-1} x(t_k) e^{-2\pi i n k / N} = \sum_{k=0}^{N-1} x(t_k) W_N^{nk}, \quad n = 0, 1, 2, \dots, N-1, \quad (4.44)$$

unde s-a notat $e^{\frac{-2\pi i}{N}} = W_N$. Este ușor de observat că W_N^{nk} va lua aceleași valori de mai multe ori pe parcursul calculelor, în primul rând pentru că nk , fiind produsul unor numere întregi, va fi același pentru diferite combinații dintre n și k . Apoi, în al doilea rând, se observă că funcția W_N^{nk} este periodică, după N valori distincte. Acestea sunt principalele observații aduse de către J. W. Cooley și J. W. Tukey [74] în anul 1965 când a început să se pună bazele algoritmilor pentru Transformata Fourier Rapidă. Tot din motive de calcule care se repetă, dar și din motivul reprezentării în sistemul binar invers, s-a preferat alegerea numărului N în care se eșantionează semnalul ca fiind o putere a numărului 2. Dacă pentru TFD a unui semnal eșantionat în N puncte sunt necesare N^2 calcule, pentru același semnal aplicând algoritmul TFR sunt necesare un număr de calcule egal cu $\frac{N}{2} \log_2 N$.

4.2.4 Metoda seriilor Prony

Bazele analizei unui semnal folosind seriile Prony (metoda seriilor Prony) au fost puse de către Gaspard Riche de Prony în anul 1795. Deci cu mult înainte de fundamentarea de către Fourier (1822) a dezvoltării în serii trigonometrice. Cu toate acestea, datorită volumului imens de calcul, utilizarea practică a metodei nu a putut să aibă o dezvoltare spectaculoasă decât odată cu dezvoltarea calculatoarelor digitale [75]. Similar cu transformata Fourier, metoda Prony extrage informații valoroase de la un semnal eșantionat uniform și construiește o serie de funcții exponențiale complexe amortizate sau sinusoidale. Această metodă permite estimarea frecvențelor, amplitudinilor, fazelor și amortizărilor componente ale unui semnal.

Răspunsul $x(t)$ al unui sistem mecanic la un impuls de scurtă durată, așa numitul răspuns tranzitoriu, poate fi înregistrat sub formă discretă $x_k = x(t_k)$, la momente discrete de timp $t_k = k\Delta t$, unde $k = 0, 1, 2, \dots, N$. În acest caz frecvența de eșantionare a semnalului este $f_e = 1/\Delta t$. Deoarece în măsurătorile experimentale sunt investigate sisteme vibrante amortizate cu un număr finit de grade de libertate, răspunsul liber al sistemului se poate scrie în funcție de parametrii modali, sub forma:

$$x(t) = \sum_{r=1}^{2n} A_r e^{\lambda_r k \Delta t}, \quad (4.45)$$

unde λ_r sunt cantități complex conjugate de forma :

$$\lambda_r = -\sigma_r \pm i p_r, \quad (4.46)$$

unde σ_r reprezintă factorul de amortizare, p_r reprezintă pseudopulsajia, iar $i = \sqrt{-1}$. Pentru că semnalul este unul amortizat, evident că partea reală a cantităților λ_r trebuie să fie negativă. Relațiile date de (4.45) constituie un sistem de $N + 1$ ecuații algebrice neliniare cu un număr de $2 \times 2n$ necunoscute. Necunoscutele sunt amplitudinile A_r și cantitățile λ_r . Dacă numărul ecuațiilor $N + 1$ este egal cu numărul necunoscutelor, $4n$, atunci sistemul se poate rezolva. Dacă numărul ecuațiilor $N + 1$ este mai mare decât numărul necunoscutelor $4n$ se aplică metoda celor mai mici pătrate. În continuare se vor nota cu e_r necunoscutele care apar în relațiile (4.45) de forma:

$$e_r = e^{\lambda_r \Delta t}, \quad r = 1, 2, 3, \dots, 2n. \quad (4.47)$$

Cu ajutorul acestor notații relațiile (4.45) se pot scrie pentru $k = 0, 1, 2, \dots, N$, sub forma următorului sistem algebric:

$$\begin{aligned} x_0 &= A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_{2n} \\ x_1 &= A_1 e_1 + A_2 e_2 + A_3 e_3 + \dots + A_{2n} e_{2n} \\ x_2 &= A_1 e_1^2 + A_2 e_2^2 + A_3 e_3^2 + \dots + A_{2n} e_{2n}^2 \\ &\dots \\ x_r &= A_1 e_1^r + A_2 e_2^r + A_3 e_3^r + \dots + A_{2n} e_{2n}^r \\ &\dots \\ x_N &= A_1 e_1^N + A_2 e_2^N + A_3 e_3^N + \dots + A_{2n} e_{2n}^N \end{aligned} \quad (4.48)$$

Dacă se elimină constantele $\{A_1, A_2, A_3, \dots, A_{2n}\}$, dintr-un sistem de $2n$ ecuații scris pentru $\{x_0, x_1, x_2, \dots, x_{2n-1}\}$ într-un sistem de ecuații scris pentru $\{x_{2n}, x_{2n+1}, x_{2n+2}, \dots, x_{4n}\}$, rezultă succesiv ecuații de forma:

$$x_0 s_{2n} + x_1 s_{2n-1} + x_2 s_{2n-2} + \dots + x_{2n-1} s_1 = -x_{2n} \quad (4.49)$$

unde prin sumele s_j s-au notat relațiile Viète:

$$\begin{aligned} s_1 &= -(e_1 + e_2 + e_3 + \dots + e_{2n}) \\ s_2 &= e_1 e_2 + e_1 e_3 + e_1 e_4 + \dots + e_{2n-1} e_{2n} \\ s_3 &= -(e_1 e_2 e_3 + e_1 e_2 e_4 + \dots + e_{2n-2} e_{2n-1} e_{2n}) \\ &\dots \\ s_j &= (-1)^j \sum_{k_1 \neq k_2 \neq \dots \neq k_j} e_{k_1} e_{k_2} e_{k_3} \dots e_{k_j} \\ &\dots \\ s_{2n} &= e_1 e_2 e_3 e_4 \dots e_{2n} \end{aligned} \quad (4.50)$$

Dacă se repetă procesul se obține un set de ecuații care se pot scrie sub forma matriceală:

$$\begin{bmatrix} x_0 & x_1 & x_2 & \dots & x_{2n-1} \\ x_1 & x_2 & x_3 & \dots & x_{2n} \\ x_2 & x_3 & x_4 & \dots & x_{2n+1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{2n-2} & x_{2n-1} & x_{2n} & \dots & x_{4n-1} \\ x_{2n-1} & x_{2n} & x_{2n+1} & \dots & x_{4n-2} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} s_{2n} \\ s_{2n-1} \\ s_{2n-2} \\ \dots \\ s_2 \\ s_1 \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} x_{2n} \\ x_{2n+1} \\ x_{2n+2} \\ \dots \\ x_{4n-2} \\ x_{4n-1} \end{pmatrix} \quad (4.51)$$

Rezolvând sistemul de ecuații pentru cazul în care numărul ecuațiilor scrise $(N+1)$ este egal cu numărul necunoscutelor, adică $4n$ se obține setul de valori $\{s_1, s_2, s_3, s_4, \dots, s_{2n}\}$ pe baza cărora se poate construi ecuația algebrică în de gradul $2n$ în z :

$$z^{2n} + s_1 z^{2n-1} + s_2 z^{2n-2} + \dots + s_{2n-1} z + s_{2n} = 0, \quad (4.52)$$

ale cărei soluții vor fi :

$$z_r = e_r = \exp(\lambda_r \Delta t), \quad r = 1, 2, \dots, 2n. \quad (4.53)$$

În cazul mișcărilor vibratorii interesează numai rădăcinile complex conjugate ale ecuației (4.52). Din (4.53) se obțin valorile λ_r , calculând logaritmul complex al acestor relații :

$$\lambda_r = \operatorname{Re} \lambda_r + i \operatorname{Im} \lambda_r = -\sigma_r + i p_r = \frac{1}{\Delta t} \ln z_r, \quad r=1, 2, \dots, 2n \quad (4.54)$$

unde p_r respectiv σ_r reprezintă pseudopulsățiile, respectiv factorii de amortizare. Trebuie observat că pseudopulsățiile vor apare în perechi de semn contrar. Trebuie de asemenea să se remarce faptul că sistemul (4.51) și ecuația în complex (4.52) se rezolvă pe cale aproximativă. Toate aceste calcule se pot face cu ajutorul unor programe pe calculator. De fapt s-a presupus, de la început, că semnalul x_k este eșantionat și introdus în calculator. Metoda dă rezultate foarte bune în cazul rădăcinilor simple ale ecuației (4.52) și bine separate. Pentru alte situații există metode descrise în lucrări mai vechi [76], [77] sau lucrări foarte recente [78], [79].

4.2.5 Efectul Doppler

Mișcarea oscilatorie imprimată unor particule ale unui mediu elastic, de către o sursă generatoare de oscilații, se propagă din aproape în aproape în toate punctele sale, iar procesul de propagare a oscilației poartă numele de undă. Particulele mediului elastic efectuează numai oscilații în jurul pozițiilor de echilibru, perturbația transmițându-se de la particulă la particulă și propagându-se pe o anumită distanță. Altfel spus, fenomenul de propagare a undelor elastice comportă existența a două procese distincte: deplasările efectuate de fiecare particulă în jurul poziției de echilibru și propagarea deformației de la o particulă la alta, datorită acțiunii forțelor elastice care se exercită între particulele mediului. Perturbația care se propagă în spațiu este, în general, funcție de poziție și de timp.

Locul geometric al punctelor care oscilează sincron (cu aceeași fază) la un moment dat se numește suprafață de undă sau front de undă, adică, suprafața de undă este mulțimea punctelor din spațiu în care perturbația are la un moment dat aceeași valoare constantă. După forma suprafeței de undă există: unde sferice, cilindrice și plane. Într-un mediu elastic și omogen, oscilațiile produse într-un punct se propagă uniform în toate direcțiile, astfel că suprafețele de undă sunt suprafețe sferice concentrice (unde sferice). Direcția de propagare este normală la suprafață, iar distanța de la sursă la un punct al suprafeței de undă se numește rază.

Dacă o sursă care emite unde și un receptor sunt în repaus, receptorul va recepționa unda emisă la frecvența f , adică frecvența cu care aceasta a fost generată. Dacă sursa și receptorul sunt în mișcare relativă unul față de altul, receptorul înregistrează o frecvență diferită decât cea emisă de sursă. Acest fenomen a fost descoperit de C. Doppler în anul 1842. Considerăm o sursă S care are viteza v_s și emite unde ce au frecvența f , iar viteza de propagare în mediu este v , precum și un receptor care are viteza v_r . Mișcarea relativă a sursei S și a receptorului R se face pe direcția distanței dintre ele. Pe de altă parte se poate scrie o relația dintre lungimea de undă λ_0 , frecvența f_0 sau perioada T_0 și viteza de propagare v ale unde, astfel:

$$\lambda_0 = v T_0 = \frac{v}{f_0}, \quad (4.55)$$

Se poate observa ce se întâmplă dacă sursa este în mișcare, iar receptorul în repaus. Undele se "înghesuie" spre observator, prin urmare va recepționa mai multe unde în același interval de timp, ceea ce înseamnă că frecvența cu care sunt recepționate crește. Fenomenul invers se întâmplă pentru un observator care s-ar afla în spatele sursei.

Explicația efectului Doppler se prezintă sugestiv în figura 4.

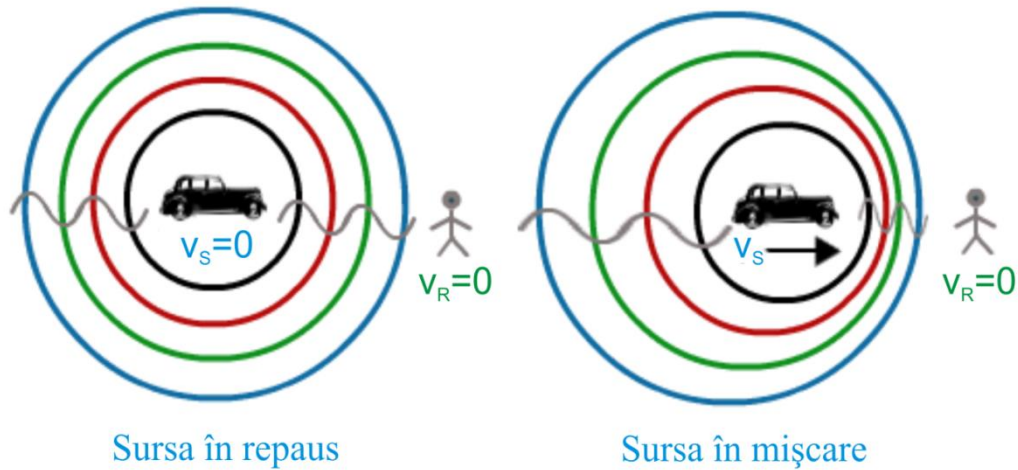


Figura 4.11 Exemplificarea fenomenului Doppler

În continuare se vor analiza mai multe situații. Se presupune o primă situație în care observatorul (receptorul) se mișcă spre sursă cu viteza v_R . În acest caz acesta va întâlni mai multe unde în unitatea de timp decât în situația în care acesta era în repaus. Relativ față de receptor, undele vor avea viteză mai mare:

$$v' = v + v_R. \quad (4.56)$$

Frecvența cu care vor fi recepționate va fi mai mare și va fi dată de relația:

$$f = \frac{v'}{\lambda_0} = \frac{v + v_R}{\lambda_0}. \quad (4.57)$$

Dacă observatorul se mișcă îndepărtându-se de sursă, atunci numărul de unde întâlnite scade, iar viteza undelor față de receptor va fi :

$$v' = v - v_R. \quad (4.58)$$

Frecvența cu care vor fi recepționate undele scade și va fi dată de relația:

$$f = \frac{v'}{\lambda_0} = \frac{v - v_R}{\lambda_0}. \quad (4.59)$$

Pentru cele două situații în care se poate afla receptorul față de sursă se poate scrie o formulă generală pentru frecvența recepționată:

$$f = \frac{v \pm v_R}{\lambda_0} = \frac{v \pm v_R}{v} f_0, \quad (4.60)$$

În cea de-a doua situație se presupune că sursa este în mișcare și receptorul este în repaus. Din nou, dacă mișcarea sursei se face spre observator, numărul de unde recepționate în unitatea de timp va crește, astfel încât și frecvența va crește. De data aceasta, însă, creșterea se produce deoarece lungimea de undă se micșorează datorită mișcării sursei. Când nici sursa și nici receptorul nu se mișcă, lungimea de undă este cea dată de formula (4.55). Dacă sursa se mișcă cu viteza v_s , lungimea de undă (distanța parcursă într-o perioadă) se va micșora cu distanța parcursă de sursă în aceeași perioadă, adică va fi dată de formula:

$$\lambda' = \lambda_0 - v_S T = \frac{v - v_S}{f}. \quad (4.61)$$

Dacă sursa se îndepărtează de observator (receptor), atunci lungimea de undă va crește cu distanța parcursă de sursă într-o perioadă și va fi dată de formula:

$$\lambda' = \lambda_0 + v_S T = \frac{v + v_S}{f}. \quad (4.62)$$

Cumulând cele două sensuri de deplasare ale sursei într-o singură formulă se obține:

$$\lambda' = \frac{v \mp v_S}{f}. \quad (4.63)$$

Frecvența undei detectate de observator va avea expresia:

$$f = \frac{v}{\lambda'} = \frac{v}{v \mp v_S} f_0, \quad (4.64)$$

unde primul semn (-) se folosește dacă sursa se apropie de receptor, iar al doilea semn (+) se folosește dacă sursa se îndepărtează de receptor.

Există situații în care atât sursa cât și observatorul se află în mișcare. Pentru acest caz se poate scrie o ecuație generală a efectului Doppler, combinând ecuațiile (4.63) și (4.64). Ecuația generală care dă frecvența recepționată, pentru orice tip de combinație a mișcărilor relative ale sursei și receptorului, este următoarea:

$$f = \frac{v \pm v_R}{v \mp v_S} f_0. \quad (4.65)$$

Pentru cele două grupe de semne se va folosi primul semn (cel de deasupra) dacă mișcările sursei și receptorului sunt de apropiere, respectiv cel de-al doilea semn (cel de dedesubt) dacă mișcările sursei și receptorului sunt de îndepărtare. O analiză detaliată asupra măsurătorilor laser în domeniul vibrațiilor este prezentată în lucrarea [80]

Se mai poate întâlni o combinație de situații în care unda incidentă face un unghi θ_R cu direcția de mișcare a receptorului sau dacă direcția de mișcare a sursei face un unghi θ_S față de direcția undei incidente [81]. În aceste situații modificările care apar se datoresc numai componentei vitezelor după direcția undei incidente, adică componentei cu cosinus. Pentru aceste situații formula (4.65) va avea următoarea formă:

$$f = \frac{v \pm v_R \cos \theta_R}{v \mp v_S \cos \theta_S} f_0. \quad (4.66)$$

În măsurătorile de vibrații sursa de unde va fi un laser care va avea o poziție fixă, iar tablele îmbinate prin diferite procedee de sudare sau lipire, vor avea o mișcare vibratorie, respectiv vor avea o viteză corespunzătoare acestei mișcări. Prin urmare, unda laser, reflectată de pe suprafața vibrantă a tablelor, va fi modulată cu frecvențele conținute în spectrul de oscilație. Prin intermediul unui Vibrometru Laser, unda reflectată este achiziționată și digitalizată printr-o placă de achiziție.

5 ACHIZIȚIA SEMNALELOR

În capitolul precedent s-a menționat faptul că semnalele date de diferite fenomene mecanice sunt de obicei semnale analogice, adică semnale continue în timp continuu. Analiza unui semnal analogic, deși este semnalul care poartă toate informațiile, este dificil de realizat și de cele mai multe ori nu se pot exploata toate informațiile pe care le conține. Datorită creșterii puterii de calcul a calculatoarelor, semnalele analogice se pot achiziționa la frecvențe ridicate (o frecvență de eșantionare de 44.100 Hz, sau de 44100 eșantioane pe secunda este foarte larg utilizată). Pe de altă parte, pentru a monitoriza mai multe mărimi fizice diferite, achiziția se face pe mai multe canale, iar determinarea parametrilor ce caracterizează acele mărimi se face de cele mai multe ori în timp real.

Elementul principal din sistemul de măsură este senzorul. Aceștia au devenit din ce în ce mai performanți, având o greutate din ce în ce mai mică și pot funcționa în medii diferite etc. Camerele de înregistrare video au rate de achiziție de până la 1 trilion de cadre pe secunda [82], iar sistemele de achiziție sunt mai complexe și pot achiziționa pe 192 de canale simultan. În același timp programele de calculator pentru prelucrarea semnalelor folosesc unele dintre cele mai noi și eficiente metode de prelucrare a semnalelor (analiza Fourier, analiza Wavelet, analiza modală etc).

În prezentul capitol se vor trece în revistă terminologia specifică sistemelor de măsură, se va descrie funcționarea lor, iar în încheiere se vor descrie avantajele și dezavantajele unor senzori folosiți pentru achiziția de semnale.

5.1 Generalități despre achiziția de semnale

Înregistrarea unor fenomene sau proprietăți fizice este o practică frecventă în domeniul ingineriei mecanice. De obicei, mărimile asociate acestor fenomene sau proprietăți sunt transformate într-o altă formă materială care să poarte informația inițială, formă care să poată fi înregistrată și stocată numită semnal. Elementul care face această transformare (traducere) se numește traductor de semnal.

De regulă, traductorul dă un semnal electric, în principal o tensiune electrică, dar poate fi și un curent, o rezistență electrică, etc. Acest semnal este apoi condiționat de către un sistem de condiționare. Sistemul de condiționare are rolul de a amplifica și filtra părțile nedorite din semnal, cu scopul de a avea un semnal cât mai curat, care să conțină fidel informații despre fenomenul înregistrat.

Semnalul astfel obținut este unul analogic, iar pentru extragerea de informații din el, acesta este convertit dintr-un semnal analogic într-un semnal digital de către un convertor de semnal analog-digital (CAD). Acest convertor de semnal, transformă practic un semnal analog, continuu în timp, într-un șir discret de valori, denumite eșantioane, care vor forma semnalul discret digital. Numărul de eșantioane achiziționate de către sistemul de achiziții în unitatea de timp se numește frecvență de eșantionare (sau frecvență de achiziție).

Echipamentele moderne de achiziții de date au încorporate, atât sistemul de condiționare, cât și convertorul de semnal încorporate într-un singur modul denumit sistem de achiziții de date (SAD). Sistemele moderne de achiziții de date pot achiziționa semnale cu o frecvență de peste 200kHz. Totuși, frecvența de achiziție a

semnalelor este de obicei în strânsă corelație cu scopul măsurătorii. Pentru achiziția semnalelor vibroacustice, utilizarea unor frecvențe de eșantionare mai mari de 44.1kHz nu se justifică. Această limitare se face datorită limitei maxime de audibilitate pentru urechea umană, care este de 20kHz, iar conform teoremei lui Nyquist este necesară o frecvență de eșantionare dublă față de frecvența maximă până la care se dorește prelucrarea ulterioară a semnalului.

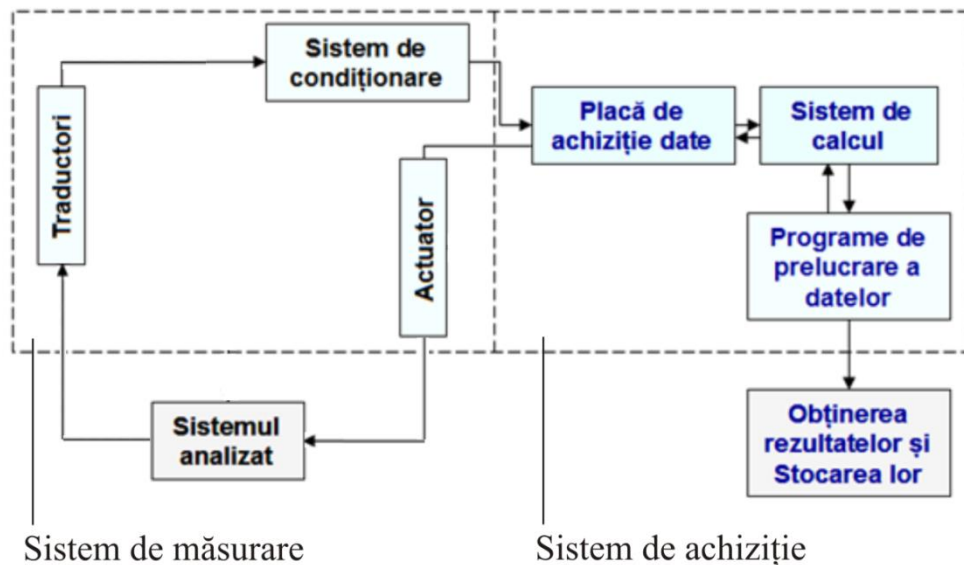


Figura 5.1 Schema generală a unui sistem de măsurare, achiziție și prelucrare de date

În figura 5.1. este prezentată schema generală a unui sistem de măsurare. Acesta este compus din unul sau mai mulți traductori de semnal care monitorizează parametrii fizici ai sistemului urmărit. Semnalul de ieșire, generat de traductor, este condiționat de un sistem de condiționare, ca mai apoi să fie transformat dintr-un semnal analog într-un semnal digital de către placa de achiziție de date. Semnalul digital este apoi analizat cu ajutorul unui sistem de calcul, fiind prelucrat cu un program de prelucrare a datelor (de exemplu: MathCad, MatLab, sau alte programe de calcul dedicate unor anumite tipuri de prelucrări de date). După aflarea rezultatelor prelucrării, informația obținută se poate *stoca* pe un suport de stocare (hard-disk, tipărire pe hârtie, etc.). Sistemul de măsurare poate fi completat și cu un sistem de control care conține un *actuator* și atunci, în urma analizei rezultatelor, programul de calcul poate comanda cu ajutorul sistemului de calcul prin placa de achiziție, actuatorul. Acesta la rândul său va transforma mărimea electrică de ieșire din placa de achiziție într-un parametru mecanic care va acționa asupra sistemului analizat.

Scopul actuatorului este de menținere a răspunsului sistemului analizat într-un domeniu dorit.

5.2 Tipuri de traductori

Un traductor are în componența sa două elemente principale: un element care sesizează schimbarea unui parametru fizic și care este denumit senzor,

respectiv, un element care transformă (traduce) schimbarea parametrului fizic sesizată de senzor într-o altă mărime, de obicei o tensiune electrică (semnal de ieșire).

În alegerea unui traductor pentru investigații experimentale sunt urmărite mai multe caracteristici ale acestuia. Cele mai importante sunt date de : principiul de funcționare al traductorului, sensibilitatea acestuia la variația mărimii fizice care trebuie măsurată, intervalul de măsură al acestuia (pentru a avea o rezoluție bună pe întregul interval), gradul de acuratețe oferit, erorile de măsură pe care acesta le introduce (astfel ca dependența dintre cantitatea măsurată și semnalul electric de ieșire să fie cea așteptată), compatibilitatea cu mediul în care se desfășoară măsurătoarea, să nu fie sensibil la anumite medii (de exemplu electro-magnetic).

Traductori pot fi clasificați în următoarele categorii:

- Traductori activi și traductori pasivi:
 - Traductori activi sunt acei traductori care nu au nevoie de sursă externă de energie pentru a funcționa. În această categorie intră traductori piezo-electrici, traductori magnetici sau traductori foto-voltaici;
 - Traductori pasivi sunt acei traductori care au nevoie de o sursă externă de energie pentru operare. În această categorie regăsim timbrele (mărcile) tensometrice, potențiometrele, traductori inductivi și cei capacitivi.
- Traductori analogici și traductori digitali.
- Pe baza principiului de funcționare:
 - Traductori piezo-electrici. Mărimea fizică măsurată este transformată în sarcină electrică sau tensiune electrică;
 - Traductori electromagnetici. Se folosesc pentru a transforma variația mărimii fizice într-o variație a tensiunii la bornele unei bobine electro-magnetice. Are la bază variația inductanței electromagnetice;
 - Traductori inductivi dau la ieșire o tensiune indusă datorită variației mărimii de măsurat;
 - Traductori capacitivi. Aceștia transformă variația mărimii de măsurat într-o variație a capacității electrice;
 - Traductori foto-voltaici.
- Traductori principali și traductori secundari:
 - Traductori principali convertesc o mărime fizică într-un semnal mecanic (de exemplu deplasare);
 - Traductori secundari, convertesc mai departe, semnalul mecanic într-un semnal electric. De exemplu un traductor de presiune, transformă deplasarea membranei într-o deplasare axială, care mai apoi este convertită de o marcă tensometrică într-o variație a rezistenței electrice.
- Traductori și actuatori:
 - Traductori transformă mărimea mecanică de intrare într-un semnal electric de ieșire;
 - Actuatori convertesc în sens invers, semnalul electric de intrare în mărime mecanică de ieșire.

În cele ce urmează vor fi prezentați, pe scurt : traductorii electro-tensometric rezistivi, puntea tensometrică Wheatstone, traductorii inductivi, traductorii piezoelectrice, iar la final microfonul acustic cu condensator.

Traductorul electro-tensometric rezistiv (TER), cunoscut și sub denumirile de timbru tensometric sau marcă tensometrică, este unul din traductorii cei mai des utilizați la realizarea unei diversificate game de aplicații, pentru măsurarea și monitorizarea unor mărimi mecanice.

În principiu, funcționarea unui TER se bazează pe proprietatea unui material conductor sau semiconductor de a-și modifica rezistența electrică sub acțiunea unor solicitări mecanice, cum ar fi întinderea sau compresiunea.

Elementul principal al timbrilor tensometrice este format dintr-un fir subțire metalic, o folie subțire metalică sau o bara semiconductoare. Timbrele tensometrice se lipesc pe suprafețele materialului a cărui stare de tensiune se urmărește a fi măsurată. Lipirea se face folosind adezivi bicompenți polimerici. Din semnalul achiziționat, de obicei deplasarea, prin derivare în raport cu timpul se obține viteza, iar prin derivarea vitezei în raport cu timpul se obține accelerația.

Pentru confecționarea timbrilor tensometrice, începând din anii 1960, se folosesc în loc de materiale metalice, materiale semiconductoare. Din aceste motive sensibilitatea timbrilor tensometrice semiconductoare este de până la 70 de ori mai mare decât sensibilitatea timbrilor tensometrice confecționate din materiale metalice. Odată cu introducerea materialelor semiconductoare, efectul termic care apare datorită ciclurilor de întindere/comprimare, din timpul măsurărilor, devine important. Pentru contracararea acestui efect se folosesc punți sau semi-punți Wheatstone.

În figura 5.2 sunt prezentate elementele constructive ale unui traductor electro-tensometric rezistiv. Elementul principal este rețeaua rezistivă 1, care poate fi compusă dintr-un fir metalic (de regulă cu un diametru de 25 micrometri), sub formă de rețea, lipit pe un suport din hârtie sau bachelită 2, cu ajutorul unei pelicule de adeziv 3, prin care aderă la rețeaua rezistivă și folia de protecție din hârtie sau bachelită 4. Folia de protecție 4 acoperă și capetele terminale 5 ale rețelei rezistive, sudate de firele 6 de conexiune la circuitul de măsurare. Firul rezistiv al rețelei 1 și terminalele 5 sunt izolate electric față de structura pe care este lipit traductorul electro-tensometric rezistiv.

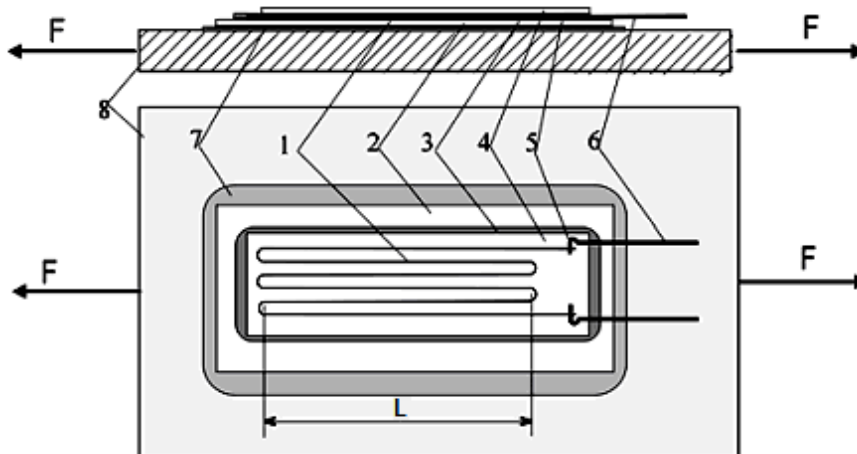


Figura 5.2. Elemente constructive ale unui traductor electro-tensometric rezistiv, TER, cu fir rezistiv

Suportul 2 constituie și baza de aderență, prin lipire cu pelicula de adeziv 7, a TER-ului la suprafața structurii 8, a cărui stare de tensiune este necesar a fi determinată.

Traductorii electro-tensometrici rezistivi pot fi utilizați pentru măsurarea deplasărilor foarte mici, de regulă sunt de ordinul nanometrilor. Astfel, dacă considerăm că un fir cu rezistivitatea materialului ρ_e de lungime L și de arie transversală A (respectiv volumul secțiunii active V), are rezistența electrică R , atunci se poate scrie următoarea ecuație:

$$R = \frac{\rho_e L}{A} = \frac{\rho_e L^2}{V}. \quad (5.1)$$

Dacă se diferențiază ecuația (4.1) va deveni:

$$dR = \frac{\rho_e dL}{A} - \frac{\rho_e L \cdot dA}{A^2} + L \cdot \frac{d\rho_e}{A}. \quad (5.2)$$

Deformarea structurii, de-a lungul axei de sensibilitate a timbrului tensometric, pe care este aplicat TER-ul, duce la deformarea rețelei firului rezistiv a cărui rezistență electrică se va modifica cu ΔR . Variația relativă a rezistenței electrice se obține prin împărțirea ecuației (5.2) la (5.1) și este dată de relația:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta \rho_e}{\rho_e} = 2 \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta \rho_e}{\rho_e} - \frac{\Delta V}{V}. \quad (5.3)$$

Introducând coeficientul de contracție transversală, numit coeficientul lui Poisson μ , atunci ultimul termen din relația (5.3) se poate scrie sub forma:

$$\frac{\Delta V}{V} = (1-2\mu) \frac{\Delta L}{L}. \quad (5.4)$$

Pe de altă parte, pe cale experimentală s-a stabilit următoarea relație:

$$\frac{\Delta \rho_e}{\rho_e} = C_B \frac{\Delta V}{V}, \quad (5.5)$$

unde C_B este constanta de material Bridgman.

Dacă se notează cu ϵ lungirea specifică a TER-ului, atunci se poate stabili următoarea relație între variația rezistenței electrice și lungirea specifică:

$$\frac{\Delta R}{R} = 2 \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta \rho_e}{\rho_e} - \frac{\Delta V}{V} = 2 \frac{\Delta L}{L} + (C-1)(1-2\mu) \frac{\Delta L}{L} = \epsilon k', \quad (5.6)$$

unde k' este coeficientul de sensibilitate al materialului timbrului tensometric.

Din relația (5.6) se poate observa că există o dependență liniară între variația rezistenței timbrului tensometric și lungirea specifică a firului (sau firelor) de material metalic sau semiconductor, din care este confecționat TERul.

Puntea electro-tensometrică rezistivă Wheatstone. Această punte este destinată măsurării unor variații mici de tensiune. Modificarea rezistenței R datorate modificării stării de tensiuni în proba care se investighează experimental, poate fi ușor detectată prin măsurarea variației tensiunii cu un amplificator diferențial de tensiune, variație care este mai apoi transformată de un convertor AD și înregistrată de un sistem de achiziții.

În multe aplicații tehnice este necesară evaluarea momentului de torsiune într-o secțiune a unui arbore sau măsurarea unei forțe care apare într-o bară de torsiune. Aceste tipuri de investigații experimentale se pot realiza mai facil prin intermediul unui senzor special al cărui element elastic este o bară de torsiune, pe

care sunt lipite într-o configurație tip "punte Wheatstone" patru timbre tensometrice.

Schematic, o punte completă Wheatstone este prezentată în figura 5.2. Cele 4 timbre tensometrice au rezistențele R_1 , R_2 , R_3 și R_4 . Rezistorul R_y și potențiometrul R_x sunt folosite pentru a calibra puntea, astfel ca în starea de tensiune zero, tensiunea electrică la ieșire să fie nulă.

Funcționarea se realizează prin aplicarea unei tensiuni inițiale U_i , și măsurarea tensiunii de ieșire $U_{ieșire}$ cu ajutorul unui voltmetru a cărui rezistență electrică internă este R_i .

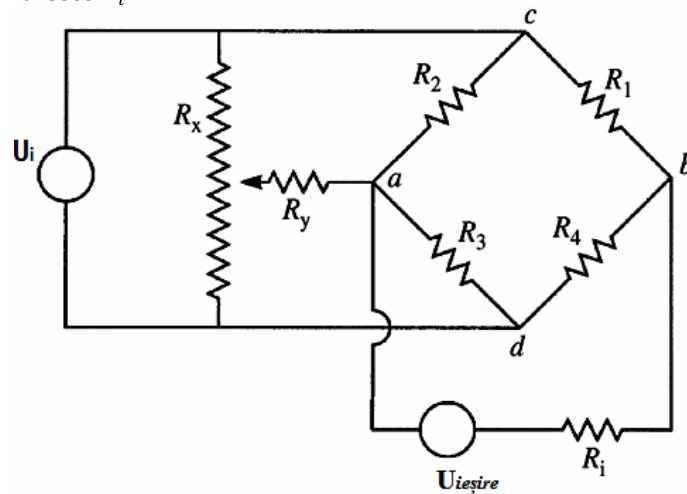


Figura 5.3 Punte completă Wheatstone

În montajul în punte Wheatstone este de preferat ca una dintre rezistențe să fie activă, adică să fie a unui timbru tensometric, atunci când acest lucru este posibil (topologia locului unde se montează permite acest lucru). Montajul în punte completă, cu toate elementele active, asigură o sensibilitate mai bună a sistemului de măsură. Montajul în punte Wheatstone se poate folosi pentru investigarea experimentală și a structurilor mari [83, 84].

Traductori inductivi. Principiul de funcționare al acestui tip de traductor se bazează pe efectul de inducție electromagnetică, adică pe producerea unei tensiuni electromotoare într-un circuit, sau într-o buclă închisă a unui conductor, datorită variației în timp a fluxului magnetic care străbate circuitul sau buclă.

$$u_e = - \frac{d\Phi}{dt}, \quad (5.7)$$

unde cu Φ s-a notat fluxul magnetic. Dacă se consideră un conductor de lungime L care se deplasează perpendicular pe liniile unui câmp magnetic de inducție magnetică B , atunci tensiunea indusă în acesta are expresia:

$$u_e = - BL \frac{dx}{dt}, \quad (5.8)$$

unde cu x s-a notat spațiul parcurs de conductor la un moment dat, iar dx/dt reprezintă viteza de deplasare a conductorului. Relația (5.8) reprezintă ecuația traductorului de inducție, care convertește viteza de deplasare într-un semnal de tensiune.



Figura 5.4. Exemple de traductori inductivi de deplasare TWK – Elektronik GmbH

Dar, de cele mai multe ori și inductanța magnetică L_m este o mărime variabilă în funcție de întrefier iar tensiunea indusă (tensiunea de ieșire) se obține pe principiul funcționării unui transformator.

Acest tip traductor are avantajul că nu este afectat de proprietățile dielectrice ale mediului în care este folosit. Totuși, buna lui funcționare poate fi afectată dacă este folosit în imediata vecinătate a unui câmp magnetic. Pentru a prelucra semnalele astfel obținute este nevoie de echipamente și metode mai complexe decât în cazul măsurătorilor făcute utilizând timbre tensometrice.

Traductori piezoelectrice sunt, probabil cel mai folosit tip de traductori pentru măsurători mecanice. Acestea funcționează pe baza proprietății materialelor piezoelectrice, care, dacă sunt supuse deformării generează un potențial electric (sarcină electrică). Acest efect este reversibil, adică dacă asupra unui material piezoelectric se aplică o sarcină electrică, acesta se deformează (transmițând o forță sau moment).

Principiul de funcționare constă în faptul că dacă un grăunte asimetric de cristal este comprimat sau destins, în interiorul acestuia are loc o reorientare a sarcinilor pozitive și negative, cauzând o deplasare a acestora. Această deplasare duce la modificări ale polarității atât pe fața negativă cât și cea pozitivă a grăuntelui cristalului. Această diferență de sarcină pe cele două fețe poate fi determinată, dacă se măsoară tensiunea electrică la doi electrozi atașați celor două suprafețe, folosind și un transformator de sarcină (pentru a transforma această diferență de sarcină în tensiune electrică).

Dacă se consideră condiții ideale, atunci sarcina indusă q_A este direct proporțională cu forța aplicată F :

$$q_A = k \cdot F, \quad (5.9)$$

unde k este constanta piezoelectrică a materialului, fiind măsurată în C/N.

În cazul unui condensator format din două plăci paralele de arie A care se află la o distanță x una de cealaltă, capacitatea se definește prin următoarea relație:

$$C_A = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{x}, \quad (5.10)$$

Unde ϵ_r este constanta dielectrică a mediului, iar ϵ_0 este constanta dielectrică a stratului izolator dintre cele două plăci ale condensatorului.

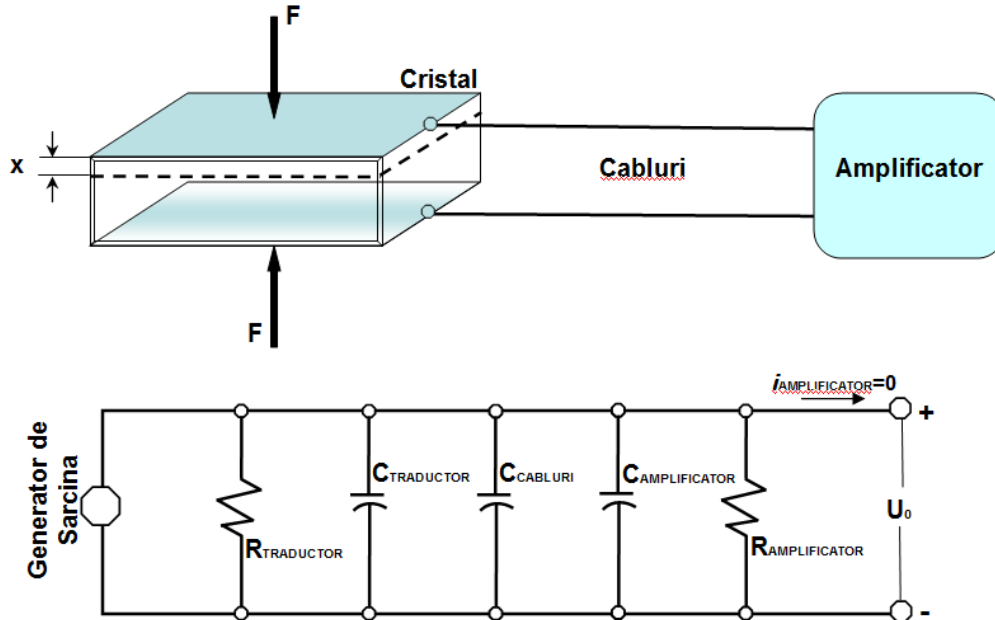


Figura 5.5 Circuitul echivalent al unui traductor piezoelectric

Sensibilitatea k a traductorului capacitiv, la modificări ale distanței x dintre cele două plăci constituente, se obține prin diferențierea relației precedente:

$$k = \frac{dC_A}{dx} = -\epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{x^2}. \quad (5.11)$$

Din precedentele două relații se poate obține următoarea relație, care arată că variația lui x produce modificarea capacității C_A :

$$k = \frac{dC_A}{dx} = -\epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{x^2} = -\frac{C_A}{x}, \quad (5.12)$$

sau

$$\frac{dC_A}{C_A} = -\frac{dx}{x}. \quad (5.13)$$

Pentru traductorii piezoelectrice, presupunând că funcționează similar cu un condensator cu plăci paralele, se poate determina tensiunea U care apare prin acționarea cu o forță F asupra acestuia, prin următoarea relație:

$$U = \frac{k \cdot F}{C_A} = -\frac{k \cdot F \cdot x}{\epsilon_0 \epsilon_r \cdot A}. \quad (5.14)$$

Circuitul electric din figura 5.5 este definit de capacitatea traductorului piezoelectric C_T , capacitatea cablului atașat senzorului C_C , capacitatea generatorului de sarcină C_A , și sarcina q .

Sarcina este definită de relația:

$$q_A = k \cdot x, \quad (5.15)$$

unde k este o constantă de proporționalitate (denumită și constanta piezoelectrică a materialului), măsurată în C/m, iar x reprezintă deplasarea.

Microfonul acustic cu condensator și elemente de acustică. Acustica este acea parte a fizicii care se ocupă cu studiul fenomenelor privind producerea, propagarea și recepția sunetelor.

Sunetele sunt unde mecanice longitudinale sau transversale care se propagă în gaze, solide și lichide și au frecvența cuprinsă între 16-20 000 Hz. Undele mecanice reprezintă propagarea unei oscilații într-un mediu elastic. În general, undele se pot propaga transversal sau longitudinal. În ambele cazuri, are loc doar transfer de energie de la un punct la altul al mediului elastic, fără transfer de substanță. Atunci când frecvența depășește 20 000Hz ele se numesc ultrasunete, iar sub 16 Hz, infrasunete.

Sunetul reprezintă și un mod de transmitere a informației, constituind astfel o metoda nedistructiva pentru studierea zgomotelor produse de echipamente aflate în mișcare. Pentru prima oară, Isaac Newton (1642-1727) a inclus prima descriere matematică a sunetului, și anume că acesta reprezintă o sumă de unde de presiune transmise prin particulele de fluid (de exemplu aer).

Se numește sursă acustică un corp care emite energie acustică în aer, prin producerea unei perturbații locale a presiunii. O sursă acustică poate fi caracterizată prin *intensitate acustică, putere acustică, direcționalitate, caracteristica de frecvență sau tărie acustică*. Astfel o rachetă cu reacție poate avea o putere acustică de 10.000.000[W] în timp ce vorbirea obișnuită are o putere acustică de 0.000001-0.001[W]. Din acest exemplu, se poate observa de ce se folosește scara logaritmică, în decibeli (dB) atunci când se compară două sunete prin raportare.

Prin analiza semnalelor acustice, se pot identifica anumite componente ale acestora. Dacă se folosește analiza spectrală, atunci componentele care se determină sunt amplitudinile și frecvențele corespunzătoare conținute în semnalul analizat. Dacă se folosesc alte metode, cum ar fi seriile lui Prony, atunci se pot determina și amortizările modale. Dintre toate aceste componente, frecvențele corespunzătoare modurilor de vibrații sunt cele mai importante. Ele sunt în legătură (dependente) cu natura materialului și dimensiunile geometrice ale acestuia. Prin urmare, pe cale nedistructivă se pot determina caracteristici de material sau elemente care țin de integritatea lui structurală (defecte).

Investigarea nedistructivă are un avantaj major, și anume acela că nu trebuie intervenit în niciun fel asupra structurii mecanice sau echipamentului supus investigației sau monitorizării. Datorită creșterii puterii de calcul din ultimele decenii, monitorizarea stării de funcționare a echipamentelor industriale, ale clădirilor sau podurilor, a cunoscut o dezvoltare tot mai accentuată.

Astfel, pe lângă dezvoltarea unor noi echipamente de monitorizare, mai fiabile și mai performante, s-au dezvoltat și aplicațiile pentru prelucrarea semnalelor. În zilele noastre, de cele mai multe ori, se optează pentru soluții personalizate, în funcție de nevoile clientului. Inginerul cercetător este expus în permanență fenomenului de inovare, el fiind constrâns astfel să găsească metode noi pentru identificarea de defecte, metode care să fie mai simplu de implementat, mai robuste și cu costuri în exploatare cât mai scăzute.

Metodele de monitorizare sau investigare acustică reprezintă o modalitate simplă și ieftină comparativ cu metodele de investigare a nivelului de vibrații, de exemplu folosind traductori piezoelectrice. Principalul dezavantaj este reprezentat de sensibilitatea echipamentului la condițiile de mediu. În paragraful care urmează se descrie microfonul acustic cu condensator, pornind de la principiile sale de funcționare, continuând cu descrierea principalelor avantaje pe care acestea le oferă. În încheierea sa se menționează efectele nedorite care pot afecta calitatea achiziției semnalelor vibroacustice.

Principiul de funcționare al microfonului. Microfonul cu condensator (prezentat schematic în figura 4.4.1) funcționează pe același principiu cu cel al unui traductor capacitiv. Astfel energia acustică de intrare este transformată în energie electrică de ieșire. Microfonul cu condensator necesită alimentarea cu energie din exterior pentru a face posibilă funcționarea lui și preamplificarea semnalelor. Semnalul electric produs de acest tip de microfon este mai puternic ca cel produs de un microfon dinamic cu bobină. Alte avantaje oferite de microfonul cu condensator sunt sensibilitatea și răspunsul superioare microfoanelor dinamice, fiind astfel microfonul cel mai potrivit pentru înregistrări acustice de înaltă fidelitate.

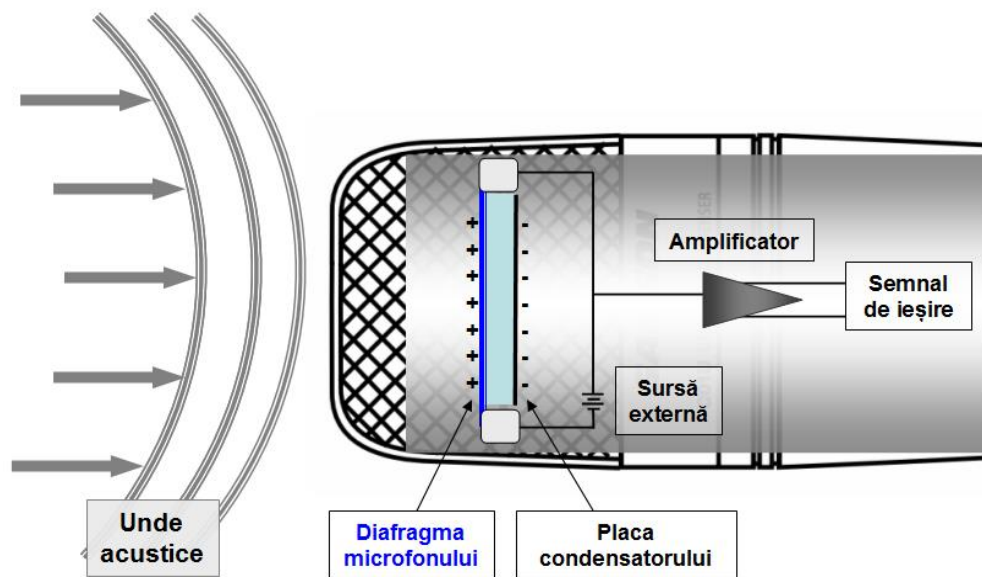


Figura 5.6 Schema de funcționare a microfonului cu condensator

Un traductor capacitiv este construit din două plăci paralele, plăci care sunt tot timpul sub o tensiune electrică. Microfonul cu condensator, are una dintre cele două plăci construită dintr-un material ultra-ușor, care are rol de diafragmă. Această diafragmă vibrează sub acțiunea undelor sonore, și prin modificarea continuă a distanței dintre aceasta și cealaltă placă a condensatorului se modifică capacitatea acestuia, crescând sau scăzând. Această variație dă naștere unor curenți de sarcină, care reprezintă semnalul electric de ieșire. Prin prelucrări ulterioare ale semnalului, se pot obține informații referitoare la fenomenul fizic investigat.

Direcționalitatea microfonului. Prin **caracteristica de direcționalitate** a microfonului se înțelege variația sensibilității sale în funcție de unghiul de incidență al undelor sonore. Aceasta este o caracteristică a designului microfonului. Direcționalitatea se poate reprezenta sub formă de diagramă polară.

În funcție de caracteristica de direcționalitate, microfoanele pot face parte din una dintre următoarele 4 categorii:

- **Omnidirecționale:** au aceeași sensibilitate indiferent de direcția din care vin undele sonore;

- **Cardioide:** au o sensibilitate crescută pentru sunetele care vin dinspre față și din lateral, și sunt insensibile la sunetele care vin din spre partea din spate a microfonului;
- **Supercardioide:** au o sensibilitate crescută pentru sunetele venite din față, și mai mică decât cele cardioide pentru cele venite din partea laterală;
- **Hipercardioide:** au o sensibilitate ridicată pentru sunetele care vin dinspre față și atenuează foarte bine sunetele venite din lateral.

Răspunsul în frecvență. Răspunsul în frecvență se definește ca variația funcție de frecvență a raportului dintre nivelul de zgomot al microfonului și tensiunea de ieșire. Un răspuns în frecvență ideal se traduce printr-o sensibilitate a microfonului pentru întreaga bandă de frecvență.

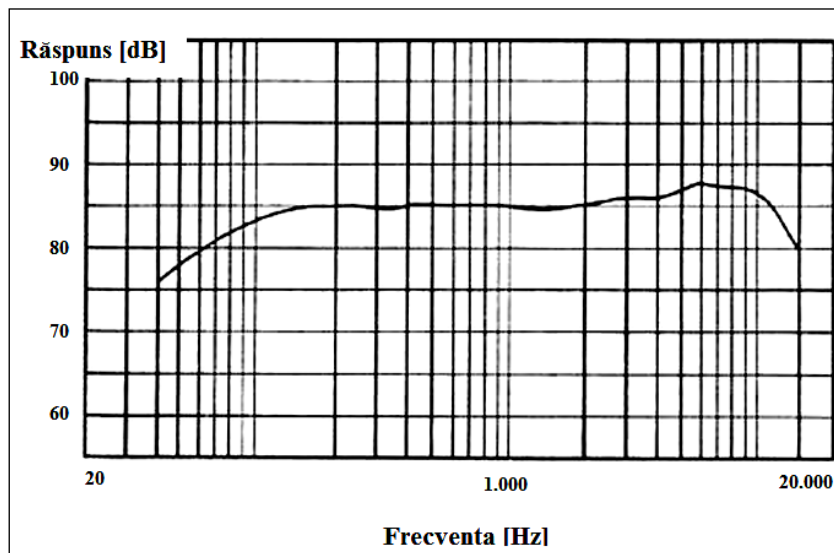


Figura 5.7 Exemplu de curbă de răspuns în frecvență

Sensibilitatea microfonului. Se definește **sensibilitatea microfonului** ca fiind raportul între tensiunea la borne U_b și presiunea acustică P_{ac} în condiții normale de lucru. Sensibilitatea se notează cu E_m și se măsoară în V/Pa.

$$E_m = \frac{U_b}{P_{ac}} \quad (5.16)$$

În decibeli, sensibilitatea microfonului se va raporta la sensibilitatea de referință $E_{ref} = 1\text{mV}/1\mu\text{bar}$ folosind următoarea relație:

$$E_m(\text{dB}) = 20\log\frac{E_m}{E_{ref}}. \quad (5.17)$$

Efectul de proximitate. Efectul de proximitate apare la microfoanele supercardioide și hipercardioide, adică acele microfoane care sunt sensibile la sunetele care vin dinspre față. Efectul de proximitate constă în amplificarea frecvențelor joase atunci când microfonul este poziționat foarte aproape de către sursa sonoră.

Se poate concluziona că Ț măsurători acustice. **Factorii care pot afecta calitatea înregistrărilor acustice.** Cei mai cunoscuți factori care pot afecta calitatea înregistrării, și care trebuie avuți în vedere atunci când se înregistrează semnale acustice sunt:

- Zgomotul ambiental (sau de fond);
- Poziționarea greșită a microfonului față de sursa acustică;
- Vântul atunci când lovește în mod direct diafragma microfonului.

Efectul vântului se poate diminua dacă microfonul este îmbrăcat în spumă poliuretanică.

6 REALIZAREA PROBELOR ȘI ANALIZA NUMERICĂ A COMPORTĂRII DINAMICE

Comportarea dinamică a unui corp sau a unui sistem mecanic poate fi descrisă printr-o serie infinită de mișcări periodice, fiecareia corespunzându-i o formă proprie și o frecvență proprie. Cele două elemente constituie un mod propriu. Prin urmare, mișcarea dinamică a unui corp constituie o suprapunere de moduri proprii. Analiza care permite studierea mișcării mecanice ca o însumare de mișcări particulare periodice se numește Analiză Modală (AM). AM are la bază teoria analizei Fourier, care permite descompunerea unei funcții continue și derivabile într-o sumă infinită de termeni periodici. În unele aplicații tehnice se pot considera unele părți componente ale sistemelor mecanice având o rigiditate foarte mare (rigide) legate între ele cu elemente flexibile. În general aceste probleme conduc la un studiu cu un număr mic de grade de libertate. Din punct de vedere practic, pentru un sistem mecanic cu un număr finit de grade de libertate, AM se reduce la o problemă de valori proprii și vectori proprii. În acest caz sistemul mecanic este modelat ca un sistem discret. Pentru structuri complexe, mai ales în cazul în care structura se consideră elastică în ansamblul ei, această metodă nu mai poate fi folosită. În acest caz sistemul mecanic este privit ca un sistem continuu, problema AM conduce la determinarea valorilor proprii și a funcțiilor proprii. Din aceste motive s-a trecut la discretizarea structurii în elemente foarte mici, conectate între ele, numite elemente finite. Prima lucrare, precursora Metodei Elementului Finit (MEF), a apărut în anii 1940, din nevoia de a rezolva probleme complexe de elasticitate cât și de a efectua analize structurale [85]. Abordarea riguroasă, cunoscută în zilele noastre, a fost definitivată în anul 1973 de către Strang și Fix [86]. Această metodă este folosită la scară largă [87] în cele mai diverse domenii cum ar fi: vibrații mecanice, electromagnetism, dinamica fluidelor și până la analize acustice.

O structură mecanică poate fi identificată în mod unic prin parametrii săi modali. În prezenta lucrare, parametrii modali sunt reprezentați de frecvențele proprii și formele modurilor proprii. Acești parametri sunt funcții de caracteristicile mecanice ale structurii sau componentelor structurale, precum și de dimensiunile și formele geometrice ale structurii [88]. Răspunsul structurii în domeniul frecvență este o funcție care depinde în mod unic de parametrii modali. Prin urmare, așa cum s-a arătat în capitolul 3, unde s-au pus bazele analizei analitice a comportării dinamice a unor corpuri de tip bară, frecvențele proprii depind de caracteristicile mecanice de material, dar și de forma lor geometrică. Atât caracteristicile mecanice cât și forma geometrică a structurii au influență asupra rigidității structurii. De aici și posibilitatea determinării, din răspunsul în frecvență, fie a caracteristicilor de material fie apariția unor crăpături, fisuri, delaminări ale materialelor compozite sau defecte de sudură. [89].

Studii ale modificării parametrilor modali [90] sau testări la vibrații existente în literatura de specialitate, au fost efectuate folosind specimene standard [91], bare [92], plăci compozite [93], structuri sudate [94-96] sau poduri rutiere [97].

În acest capitol sunt analizate două probleme importante ale prezentei lucrări. Prima parte este destinată atât alegerii materialelor pentru realizarea probelor ce urmează a fi investigate numeric și experimental, cât și prezentării

procedeelor prin care au fost realizate aceste probe. În cea de-a doua parte, probele obținute sunt studiate din punctul de vedere al comportării dinamice, folosind analiza numerică dată MEF și AM.

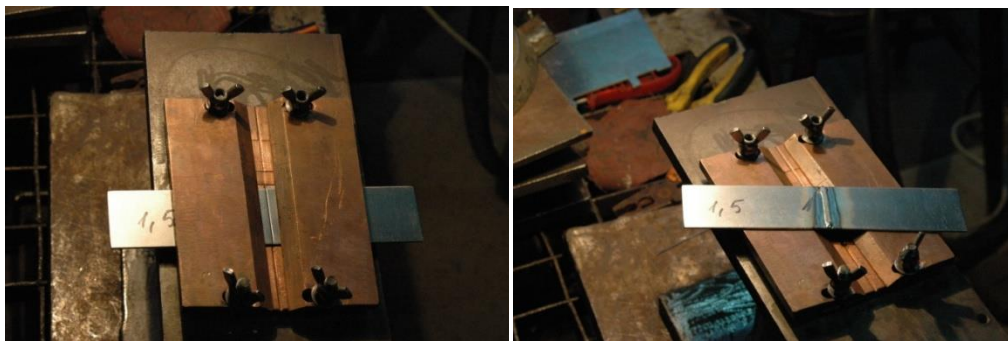
6.1 Realizarea probelor

Probele utilizate pentru analiza numerică a comportării dinamice cât și pentru încercările experimentale au fost realizate din următoarele materiale: tablă decapată de oțel de uz general S 235 JR de diferite grosimi, tablă de oțel inoxidabil de diferite grosimi, tablă oțel acoperită cu oxid de zinc, tablă zincată și tablă din aluminiu de diferite grosimi.

6.1.1 Realizarea probelor din tablă decapată din oțel S 235 JR

Pentru realizarea probelor din tablă decapată din oțel de uz general S 235 JR (OL 37) s-a ales pentru îmbinare procedeul de sudare WIG, prezentat în detaliu la paragraful 2.3.5. Având în vedere faptul că probele sudate sunt făcute din tablă subțire din oțel S 235 JR, cu grosimi cuprinse între 0,8 mm și 2,5 mm, există pericolul deformării acestora. Deformațiile cauzate de procesul de sudare pot să fie interioare sau exterioare. Pentru probele realizate în vederea efectuării acestui studiu, deformațiile exterioare, care sunt puse în evidență prin schimbarea formei geometrice sau a dimensiunilor structurii sudate sunt cele mai importante. Fenomenul de deformare exterioară se datorează încălzirii locale din timpul sudării, când atât cusătura cât și materialul de bază sunt dilatate, iar în urma răcirii acestea se contractă. Din acest motiv sudarea materialului de bază s-a făcut pe suport de Cu, știindu-se faptul că acest metal are o capacitate calorică foarte mare, prin urmare transferul termic de căldură este rapid.

Pentru sudare s-a ales instalația Magic Wave 300 (Fronius), materialul de bază a fost tabla decapată din oțel S 235 JR de diferite grosimi. Gazul de protecție a fost Ar 100% (4.6) produs de LINDE GAZ, iar debitul acestuia a fost $Q = 8\text{l/min}$. Tipul electrodului nefuzibil ales a fost EWCE 20. Diametrul electrodului de W a fost $d_{ew} = 1,6\text{mm}$. Sudarea s-a făcut în curent continuu cu polaritatea directă, adică CC⁺.



a) pregătirea probei

b) proba realizată

Figura 6.1 Sudarea probelor din S 235 JR

În tabelul 6.1 sunt dați parametrii de sudare WIG utilizați pentru sudarea tablelor decapate din oțel S 235 JR, în procesul de realizare a probelor, figura 6.1.

Tabelul 6.1. Parametrii de sudare WIG pentru sudarea tablelor subțiri din oțel S 235 JR

Grosimea tablei s [mm]	0,8	1	1,5	2	2,5
Curentul de sudare [A]	60	70	95	105	130
Tensiunea arcului U_a [V]	10,5	11,0	12,0	12,5	13,0
Viteza de sudare v_s [mm/s]	4,0	3,0	2,5	2,5	2,0
Diametrul vergelei d_v [mm]	1	1	1,2	2	2

6.1.2 Realizarea probelor din oțel inoxidabil

În tabelul 6.2 sunt dați parametrii de sudare WIG utilizați pentru sudarea tablelor din oțel inox, în procesul de realizare a probelor.



a) pregătirea probei

b) proba realizată

Figura 6.2 Sudarea probelor din oțel inoxidabil

Tabelul 6.2. Parametrii de sudare WIG pentru sudarea tablelor subțiri din oțel INOX

Grosimea tablei s [mm]	0,8	1	1,2	1,5	2	3
Curentul de sudare [A]	35	37	42	50	70	120
Tensiunea arcului U_a [V]	9,5	9,7	10,0	10,3	11,0	12,8
Diametrul vergelei d_v [mm]	1	1	1,2	1,2	1,6	2
Viteza de sudare V_s [mm/s]	4,5	4,0	4,0	3,0	3,0	2,5
Deschiderea rostului [mm]	0	0	01	1,0	1,5	2

6.1.3 Realizarea probelor din aluminiu

În tabelul 6.3 sunt dați parametrii de sudare WIG utilizați pentru sudarea tablelor din aluminiu, în procesul de realizare a probelor.

Tabelul 6.3. Parametrii de sudare WIG utilizați pentru sudarea tablelor de aluminiu

Grosimea tablei s [mm]	0,8	1	1,5	2	2,5
Curentul de bază [A]	35,0	45,0	60,0	90,0	105
Tensiunea arcului U_a [V]	10,0	10,5	11,5	12,0	13,0
Diametrul vergelei d_v [mm]	1,6	1,6	2,0	2,0	2,5
Viteza de sudare V_s [mm/s]	3,5	3,0	2,5	2,0	1,5

6.1.4 Realizarea probelor din tablă zincată

Zincarea este un procedeu de acoperire prin galvanizare a unor metale, sau aliaje, în special al oțelurilor, descris în paragraful 2.1.5. Zincarea este cel mai larg răspândit procedeu, iar dintre toate oțelurile acoperite cu diferite straturi metalice ponderea cea mai mare o are acoperirea cu Zn. Tocmai din aceste motive în cadrul acestei lucrări s-a urmărit determinarea modului în care influențează acoperirea cu Zn asupra caracteristicilor mecanice ale noului produs. Prin urmare s-au realizat probe din tabla nezincată, respectiv din tablă zincată. Aceste epruvete au fost apoi supuse unor teste de vibrații.

6.2 Modelarea cu Elemente Finite și Analiza Modală

În acest subcapitol se investighează numeric ansamblurile de plăci sudate sau acoperite prin diferite procedee prezentate în subcapitolele precedente. Modelul numeric (figura 6.3.b) reprezintă o modelare a unei structuri reale, prezentat în figura 6.3.a. Modelarea numerică se face cu ajutorul programului de elemente finite ANSYS folosind APDL.

Analizei numerice din prezentul subcapitol are două obiective:

- primul obiectiv îl constituie identificarea tipurilor de moduri proprii (de încovoiere sau de torsiune), în ordinea crescătoare a frecvențelor proprii, identificare necesară pentru determinarea, pe cale experimentală, prin analiza semnalelor vibroacustice sau analiza semnalelor de vibrații obținute de la un Vibrometru Laser, a modulului de elasticitate longitudinal, respectiv a modulului de elasticitate transversal (de forfecare) și a coeficientului de contracție (coeficientul lui Poisson);
- al doilea obiectiv îl constituie analiza modificării frecvențelor proprii ale unei structuri sudate funcție de mărimea defectului și stabilirea unui indicator pe baza căruia să se poată monitoriza și detecta un defect în structură. Prezența defectelor într-o structură sudată

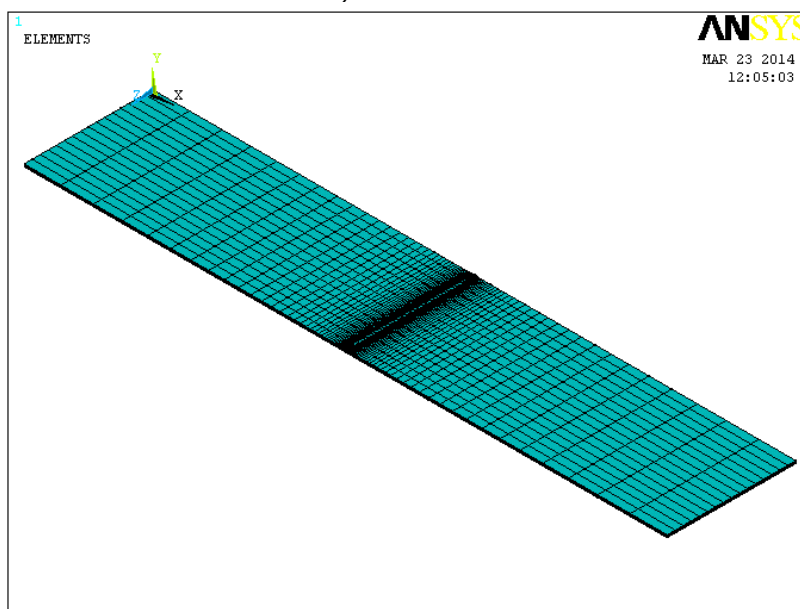
produce nu numai modificări în frecvențele proprii, dar și modificări în forma modurilor de vibrații. Urmărire modificărilor în formele modale de vibrații, în funcție de mărimea defectului, constituie partea finală a acestui obiectiv.

6.2.1 Descrierea modelului numeric. Analiza cu Elemente Finite

Modelarea a pornit de la modelul fizic al ansamblului de plăci sudate din figura 6.3.a. Plăcile ansamblului au o grosime de 1,5[mm], presupus uniformă pe toată suprafața lor. Ansamblul are dimensiunile prezentate schematic în figura 5.2.1.b). Materialul din care sunt realizate cele două plăci este inox cu modului de elasticitate $E=2 \cdot 10^{11}$ [Pa], coeficientul lui Poisson 0.3[-] și o densitate de material de 7900 [kg/m³]. Greutatea acestuia este de 0.398 [kg], care este foarte apropiată de greutatea modelului fizic (diferența sub 1%). Defectul este modelat fizic printr-o tăietură la distanța de [mm], adică la mijlocul ansamblului.



a) modelul fizic



b) modelul numeric

Figura 6.3 Ansamblul de plăci sudate transversal

6.2.2 Analiza cu Elemente Finite

Pentru un sistem cu n grade de libertate, discretizat prin MEF, ecuația diferențială a mișcării poate fi pusă sub formă matriceală, după cum urmează:

$$[M]\{\ddot{q}\} + [C]\{\dot{q}\} + [K]\{q\} = \{Q(t)\}, \quad (6.1)$$

unde $\{q\}$ este vectorul deplasărilor nodale, $\{Q(t)\}$ este vectorul forțelor perturbatoare generalizate, iar $[M]$, $[C]$ și $[K]$ sunt matricele de inerție, de amortizare și de rigiditate.

În cele ce urmează, structura mecanică este modelată ca o structură cu amortizare de tip Rayleigh, ceea ce presupune o matrice de amortizare $[C]$ proporțională cu matricele $[M]$ și $[K]$.

Problema de valori proprii și vectori proprii se obține plecând de la ecuația vibrațiilor libere, ecuație care se obține din (6.1), în lipsa forțelor perturbatoare, adică pentru $\{Q(t)\} = 0$ și luând soluții de forma $\{q\} = \{X\}e^{\lambda t}$:

$$([M]\lambda^2 + [C]\lambda + [K])\{X\} = \{0\} \quad (6.2)$$

Rezolvând ecuația caracteristică:

$$\det([M]\lambda^2 + [C]\lambda + [K]) = 0, \quad (6.3)$$

rădăcinile acestei ecuații se numesc valori proprii și sunt de forma :

$$\lambda_r = -\sigma_r + ip_r; \quad \lambda_r^* = -\sigma_r - ip_r; \quad r=1,2,\dots,n, \quad (6.4)$$

unde σ_r este factorul de amortizare, p_r este pseudopulsăția. Acești doi parametri se obțin prin AM utilizând programul ANSYS. Tot prin acest program se obțin și vectorii proprii $\{X\}_r$ corespunzători valorilor proprii care dau formele modurilor proprii.

6.2.3 Modelarea unor defecte în sudură

Prezența unor defecte în sudură poate fi considerată ca fiind rezultatul unor mici modificări structurale. În acest caz matricea de inerție devine $[M] + [\Delta M]$, matricea de rigiditate devine $[K] + [\Delta K]$, iar matricea de amortizare devine $[C] + [\Delta C]$. În urma acestor modificări structurale, pseudopulsățiile se modifică și ele devenind $p_r + \Delta p_r$, iar factorii de amortizare devin $\sigma_r + \Delta\sigma_r$. În toate aceste modificări prin semnul Δ s-au notat modificări foarte mici ale mărimii pe care o precede. În cazul unor defecte structurale de genul crăpăturilor sau fisurilor se poate considera că masa structurii nu se modifică, deci matricea $[\Delta M]$ poate fi considerată nulă, iar cei doi parametri modali pseudopulsățiile și factorii de amortizare modali vor fi dați de următoarele formule [90]:

$$p_r' = p_r - \frac{1}{2p_r} \frac{\{X\}_r^T [\Delta K] \{X\}_r}{\{X\}_r^T [M] \{X\}_r} + \frac{\sigma_r}{2p_r} \frac{\{X\}_r^T [\Delta C] \{X\}_r}{\{X\}_r^T [M] \{X\}_r}, \quad (6.5)$$

$$\sigma_r' = \sigma_r + \frac{1}{2} \frac{\{X\}_r^T [\Delta C] \{X\}_r}{\{X\}_r^T [M] \{X\}_r}. \quad (6.6)$$

Cele două formule arată modul în care se modifică cei doi parametri modali odată cu apariția unui defect în sudură. Din ecuația (6.5) se constată că prezența defectului duce la micșorarea rigidității structurii și prin urmare la micșorarea pseudopulsățiilor.

Neglijând amortizările interne ale structurii, ceea ce este posibil pentru structurile investigate, așa cum se va constata din rezultatele experimentale, atunci relația (6.6) devine:

$$P_r = P_r - \frac{1}{2p_r} \frac{\{X\}_r^T [\Delta K] \{X\}_r}{\{X\}_r^T [M] \{X\}_r} \quad (8)$$

Adică prezența defectelor duce la micșorarea frecvențelor naturale de vibrație. Micșorarea rigidității locale în zona unde apare o fisură duce la modificarea frecvențelor proprii[99]. Astfel, frecvențele proprii modificându-și valoarea, și cunoscând faptul ca acestea au doar o dependență liniară cu radicalul de ordinul doi din rigiditate, este necesar a se folosi metode de testare cu grad bun de precizie care trebuie să confere de asemenea erori minime, pentru a putea detecta prezența defectelor.

Sesizarea modificării frecvențelor proprii este de cele mai multe ori primul pas în implementarea unor algoritmi pentru detectarea de defecte. O lucrare de sinteză care prezintă metode de identificare a defectelor folosind modificări ale frecvențelor proprii este publicată de către Salawu[98]. În baza informațiilor din lucrarea sa, coroborate cu informații din alte studii actuale, se pot forma opinii asupra folosirii variației frecvențelor proprii pentru detectarea defectelor, atât pozitive (care raportează corelări bune) [93, 95], cât și moderate (dar care raportează totuși corelări satisfăcătoare)[95-101].

Există și opinii distincte, cum sunt cele ale lui Lu[102] și ale lui Lam[101], care sugerează în studiile lor că modurile proprii care nu sunt sensibile la apariția defectelor să nu fie luate în considerare atunci când sunt implementați algoritmi pentru detectare de defecte.

Defectele structurale induc nu numai modificări ale frecvențelor proprii ci și modificări ale vectorilor proprii sau în Funcția de Răspuns în Frecvență (FRF). Funcția de Răspuns în Frecvență (FRF) reprezintă legătura între excitația aplicată structurii într-un loc și răspunsul acesteia măsurat în alt loc. În contextul Analizei Modale, FRF reprezintă legătura dintre parametrii modali[103].

În domeniul analizei modale, avantajul folosirii FRF este reprezentat de reducerea timpului alocat testării[104]. Aparatura necesară unui testări modale în laborator este una minimală, fiind nevoie de: ciocan modal, accelerometre sau microfoane, sistem de achiziții de date, și de un sistem de calcul pentru procesarea datelor achiziționate. Pe de altă parte, datorită erorilor specifice testării modale, calitatea măsurătorilor poate fi afectată[91, 105, 106]. Desigur, pentru testări modale in-situ (pentru poduri, aeronave, structuri mecanice cu dimensiuni mari), excitarea structurii implică o logistică specială care este și costisitoare. În literatura de specialitate sunt raportate câteva metode pentru a detecta defectele, luând în considerare funcțiile de răspuns în frecvență în două stări ale structurii, intactă și alterată:

- Derivata de ordinul doi a curbei FRF[104-108]
- Criteriul FDAC[109]
- Curba FRF[110]

Modificarea formei modurilor proprii ca urmare a unor defecte structurale a fost folosită, la început, în Analiza Modală în scopul verificării ortogonalității vectorilor modali obținuți din analiza modală experimentală[120]. Apoi s-au dezvoltat două ramuri ale cercetării formei modurilor proprii pentru identificarea de defecte: una care utiliza forma modurilor proprii ca atare[120], și cea de-a doua care folosea derivata de ordinul doi a formei modurilor proprii[111].

Maia [107, 108], Silva [109] și Duarte [113] au observat că derivata de ordinul doi a vectorului modului propriu este mai sensibilă la apariția defectului decât vectorul respectiv al modului propriu. Metoda a fost validată pe bare de oțel încastrate la un capăt, cât și libere la ambele capete, oferind o sensibilitate satisfăcătoare. Allemang a dezvoltat o metodă pentru a compara perechi de moduri proprii obținute experimental și analitic, cu ajutorul unei matrice de indici, denumită MAC (Modal Assurance Criterion) [120]. Pentru a detecta defecte medii sau severe, West[114] a utilizat pentru prima oară, în anul 1984, metoda MAC. Pentru a detecta defecte cu un grad mai mic de severitate, Lieven și Ewins au propus o nouă metodă COMAC[115]. Această metodă este considerată mai sensibilă decât MAC, dacă numărul de puncte măsurate în testarea modală este mic[116]. Alte studii[97, 100, 116-118] arată că prezența defectelor induce modificări ale formei modurilor proprii. Se folosesc și metode combinate[119].

6.3 Rezultate numerice ale modelării cu elemente finite și analizei modale

Programul care creează modelul numeric și pentru setarea parametrilor de Analiza Modală (AM) în mediul ANSYS este oferit integral în **Anexa-1**. Fiecare comandă folosită în acest fișier de intrare ANSYS APDL este comentată în detaliu. Rezultatele obținute în urma simulării sunt prezentate în subcapitolul următor. Analiza cu elemente finite este setată pentru calcularea modurilor proprii până la frecvențe de 20 kHz, folosind un algoritm Block-Lanczos. Rezultatul analizei este tipărit într-un fișier de ieșire al cărui conținut va fi afișat pe monitorul calculatorului.

6.3.2 Rezultatele AM pentru tablele din oțel S 235 JR

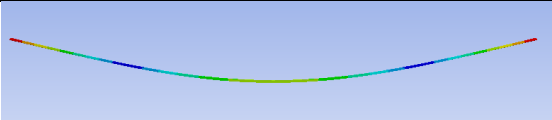
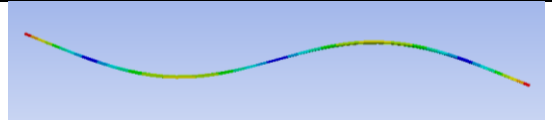
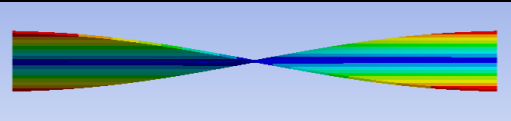
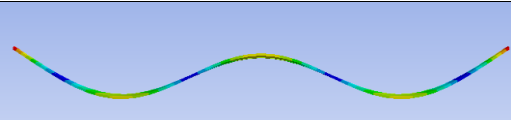
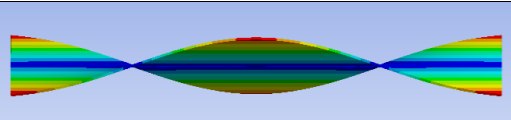
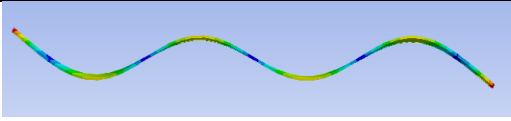
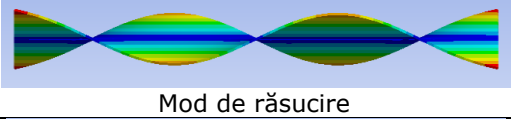

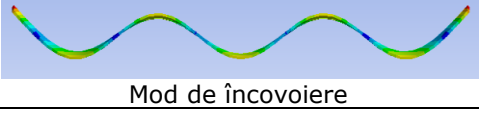
Pentru analiza comportării dinamice prin modelarea cu elemente finite a tablelor din oțel obișnuit de uz general S 235 JR (în standardul vechi OL 37) s-au realizat un număr de patru probe având dimensiunile date în Tabelul 6.4.

Tabelul 6.4. Dimensiunile probelor din oțel de uz general S235 JR analizate prin programul ANSYS

Nr.crt	Lungimea [mm]	Lățimea [mm]	Grosimea [mm]	Materialul de bază
1	200	40	0.8	S 235 JR
2	201	40.5	1	S 235 JR
3	201	40	1.5	S 235 JR
4	202.4	40	2.5	S 235 JR


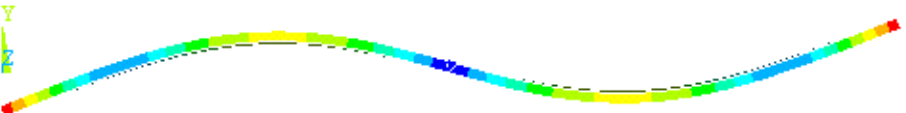



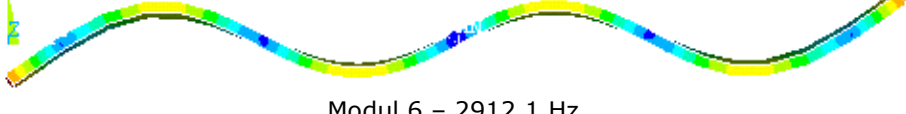
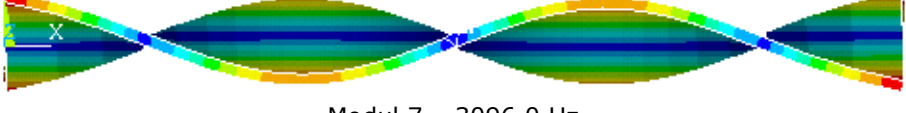
Pentru proba nr.1 din Tabelul 6.4. se prezintă, în cele ce urmează, datele cu privire la frecvențele proprii corespunzătoare modurilor proprii, precum și forma, respectiv natura modurilor de vibrații.

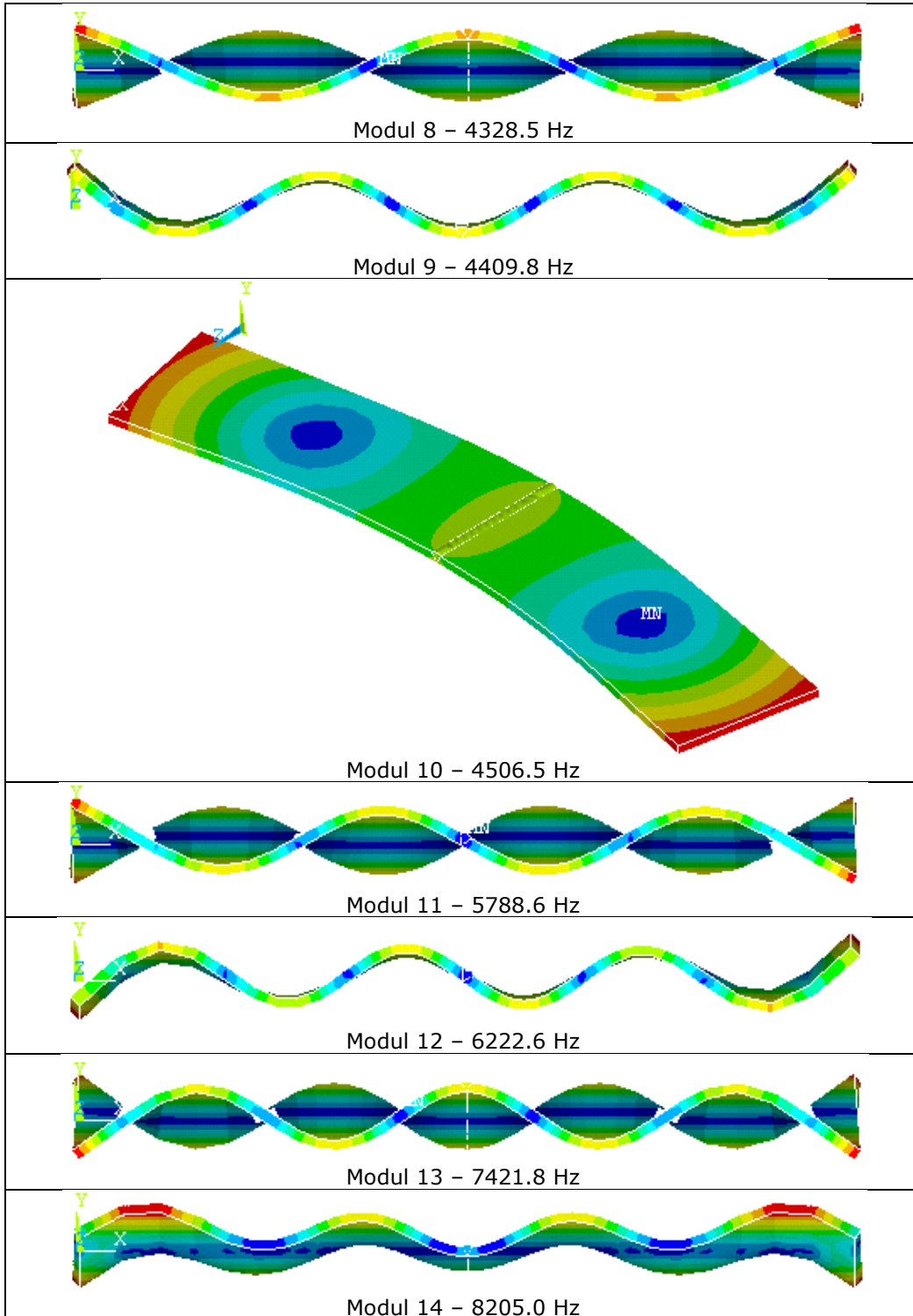
Tabelul 6.5. Primele 9 moduri naturale și frecvențele corespunzătoare pentru proba din oțel de uz general S 235 JR având grosimea de 0,8 mm

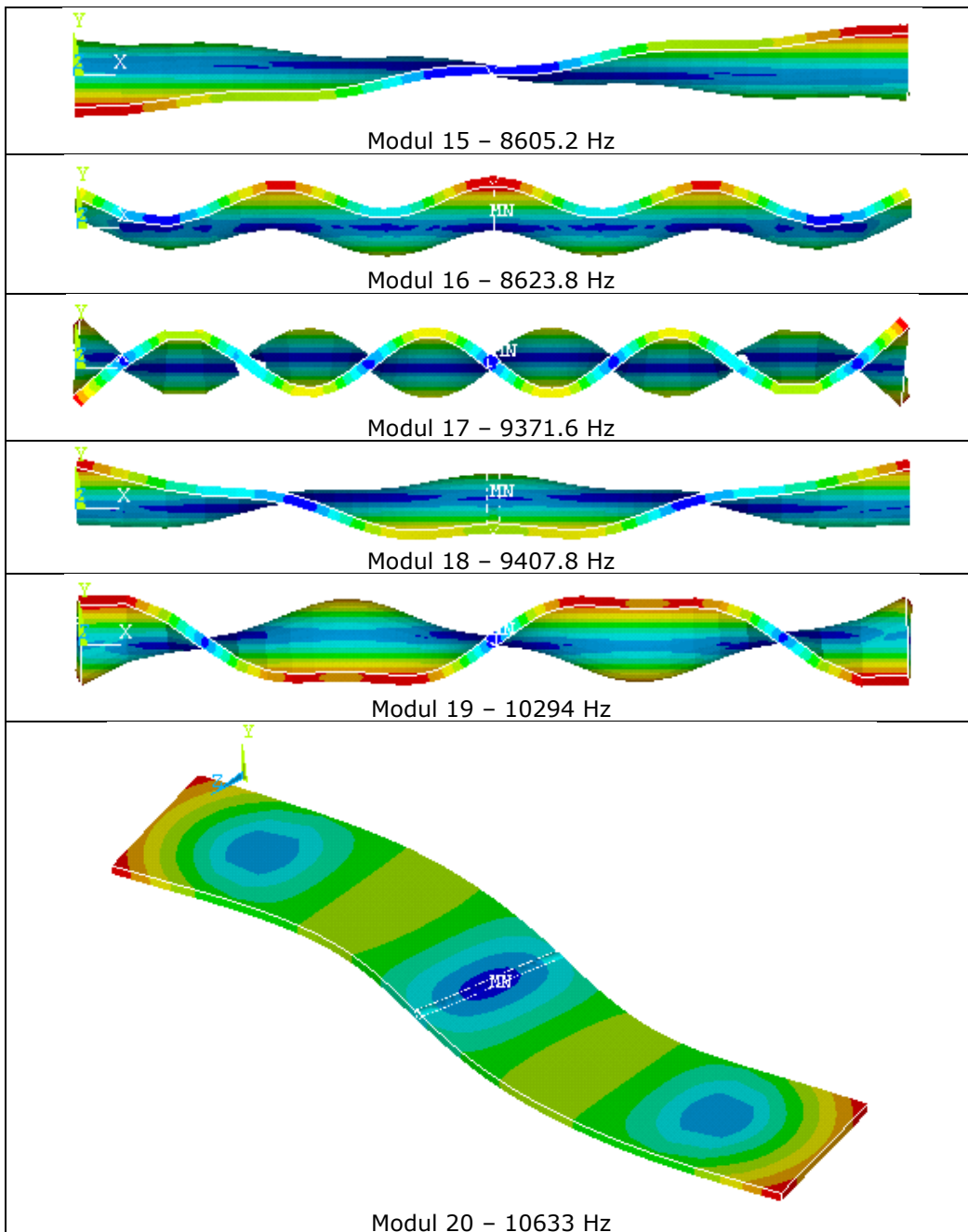
Nr.mod	Frecvența [Hz]	Forma și natura modului/ Capetele LL
1	104.25	 Mod de încovoiere
2	288.71	 Mod de încovoiere
3	314.45	 Mod de răsucire
4	568.84	 Mod de încovoiere
5	644.98	 Mod de răsucire
6	944.78	 Mod de încovoiere
7	1006.4	 Mod de răsucire
8	1412.1	 Mod de răsucire
9	1417.1	 Mod de încovoiere

Pentru proba nr.4, din oțel de uz general S 235 JR sudată transversal, din Tabelul 6.4. se prezintă, în cele ce urmează, datele cu privire la frecvențele proprii corespunzătoare modurilor proprii, precum și forma, respectiv natura modurilor de vibrații.

Tabelul 6.6. Primele 20 de moduri naturale și frecvențele corespunzătoare pentru proba din oțel de uz general S 235 JR având grosimea de 2,5 mm

Nr.crt	Lungimea [mm]	Lățimea [mm]	Grosimea [mm]	Materialul de bază/ capetele4 LL
4	202.4	40	2.5	S 235 JR
 Modul 1 – 318.36 Hz				
 Modul 2 – 880.62 Hz				
 Modul 3 – 965.65 Hz				
 Modul 4 – 1745.2 Hz				
 Modul 5 – 1968.0 Hz				
 Modul 6 – 2912.1 Hz				
 Modul 7 – 3096.0 Hz				





Pentru probele nr.2 și nr. 3 din Tabelul 6.4 rezultatele analizei modale sunt prezentate în Anexa 3.

6.3.3 Rezultatele AM pentru tablele din oțel inoxidabil EN X5 CrNi 18-10

Pentru analiza comportării dinamice prin modelarea cu elemente finite a tablelor din oțel inoxidabil EN-X5 CrNi 18-10, sudate transversal, prin procedeul WIG, s-au realizat un număr de cinci probe având dimensiunile date în Tabelul 6.7. Caracteristicile principale ale acestui tip de oțel sunt: este un oțel inoxidabil austenitic crom-nichel; este cel mai utilizat material rezistent la coroziune; are sudabilitate bună și prelucrabilitate la rece bună; are o rezistență foarte ridicată la temperaturi scăzute; polișare și poansonare ușoară; rezistență garantată până la 300 °C, la temperaturi mai mari este recomandată folosirea materialelor stabilizate cu titan de calitate 1.4541; este indicată prelucrarea acestora cu scule din oțeluri înalt aliat sau oțeluri dure – OSC (din cauza tendinței de durificare); proprietăți de rezistență inter-cristalină, dar după sudare rezistența poate deveni instabilă; are bune proprietăți rezistență la coroziune (în primul rând în mediul natural); este rezistent la acid azotic de 52%, la acizi organici diluați la rece, la soluții alcaline și soluții de sare (altele decât clorura; sulfat și sulfat).


Principalele aplicații ale îmbinărilor prin sudare ale tablelor din oțeluri inoxidabile sunt în: industria chimică; alimentară (brânză, lapte, vin, oțet, etc.); industria farmaceutică; industria petrochimică; hârtiei; industria textilă; articole de uz casnic; design interior; industria automobilelor; schimbătoare de căldură; fabricarea conductelor pentru cazane.

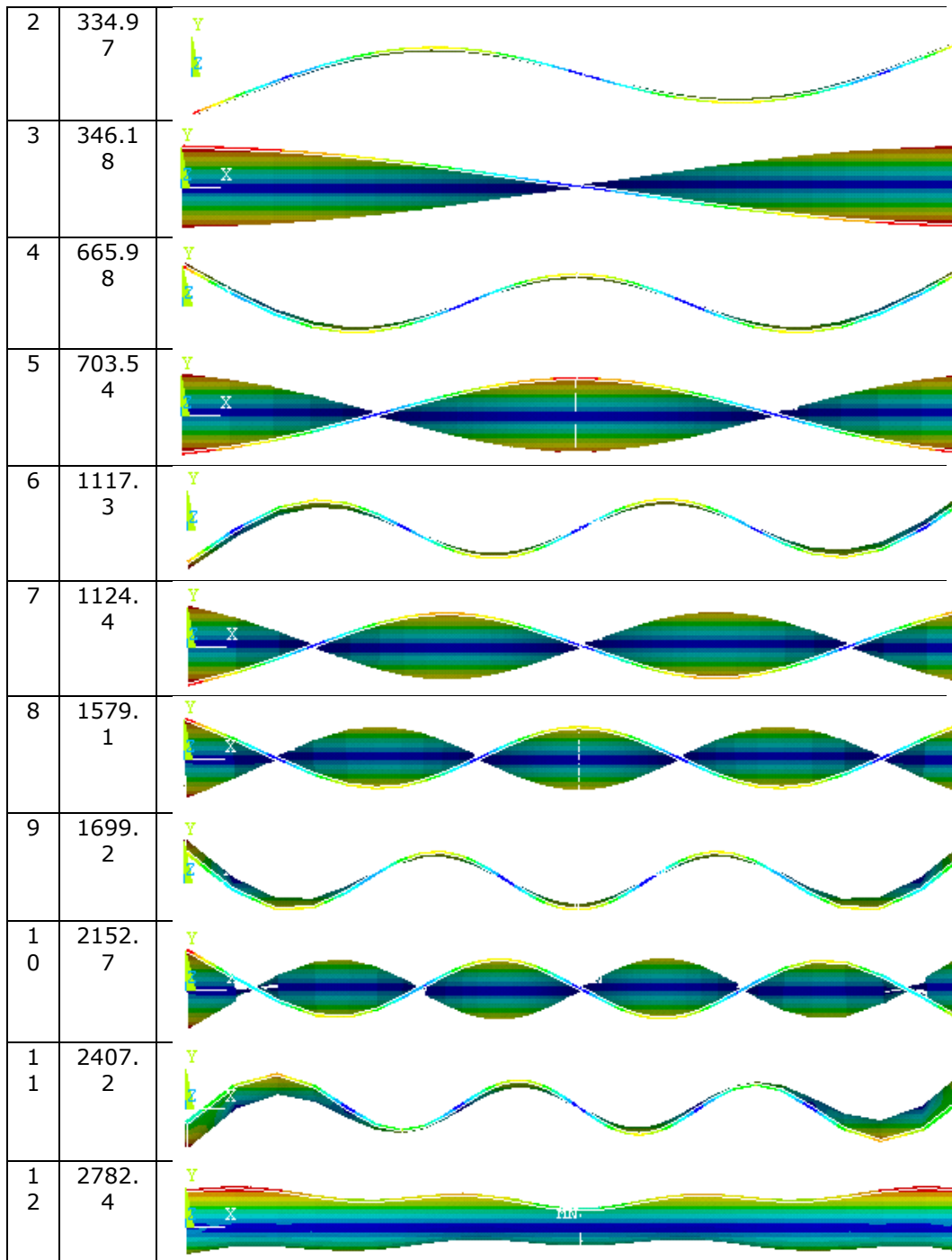
Tabelul 6.7. Dimensiunile probelor din oțel inoxidabil EN X5 CrNi 18-10 analizate prin programul ANSYS

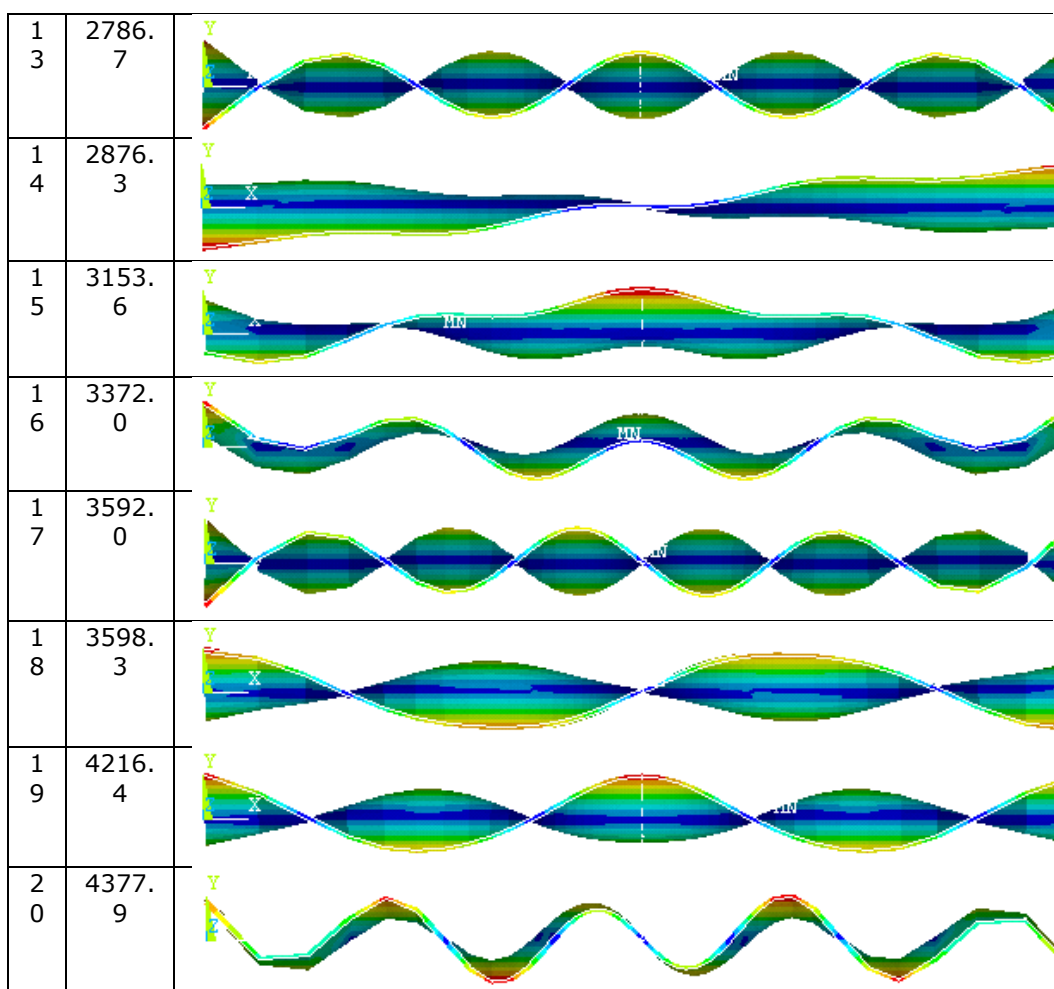
Nr.crt	Lungimea [mm]	Lățimea [mm]	Grosimea [mm]	Materialul de bază
1	185	39.5	0.8	oțel inoxidabil EN X5 CrNi 18-10
2	197.5	41	1	oțel inoxidabil EN X5 CrNi 18-10
3	199.5	40	1.2	oțel inoxidabil EN X5 CrNi 18-10
4	201	39	2	oțel inoxidabil EN X5 CrNi 18-10
5	201.5	31	3	oțel inoxidabil EN X5 CrNi 18-10

Pentru proba nr.1 din Tabelul 6.7. se prezintă, în cele ce urmează, (Tabelul 6.8) datele cu privire la frecvențele proprii corespunzătoare modurilor proprii, precum și forma, respectiv natura modurilor de vibrații.

Tabelul 6.8.Primele 20 de moduri naturale și frecvențele corespunzătoare pentru proba din oțel inoxidabil EN X5 CrNi 18-10, având grosimea de 0.8 mm

Nr	Frecv. [Hz]	Forma modului
1	120.68	





Pentru probele nr.2, 3, 4 și 5 din Tabelul 6.7, rezultatele analizei modale sunt prezentate în Anexa 3 și Anexa 4.

6.3.4 Rezultatele AM pentru tablele din aluminiu laminat la rece

Popularitatea aluminiului și a aliajelor sale, derivă în primul rând din proprietățile excelente mecanice: greutatea specifică scăzută (o treime față de oțel), sudabilitate foarte bună, proprietăți de anticorodare și nu în ultimul rând din proprietatea sa de reciclare.

Cele mai uzuale domenii de utilizare sunt: în primul rând construcția de mașini, industria auto, industria alimentară, industria chimică, în construcții civile, industria navală și aeronautică, în industria transporturilor feroviare, domenii unde, folosirea aluminiului este substanțială.

În procesul comercial, acest material este denumit și "aluminiu nealiat". El este foarte ușor prelucrabil, are proprietăți anticorozive foarte bune, se poate eloxa și vopsi, se poate lăcui. Are de asemenea proprietăți de îndoire excelente,

proprietăți de sudabilitate foarte bune. Se folosește la diverse suprafețe în producția publicitară, sau se folosește frecvent și la placări uzuale ale suprafețelor.

În folosirea aluminiului nealiat, principalul aspect ce se are în vedere este ca în procesul de corodare, suprafața să nu devină mată. Acest material se poate eloxa foarte bine în stare naturală sau în stare vopsită. Tablele eloxate nu numai că arată mult mai bine din punct de vedere estetic, dar prezintă și caracteristici anticorozive și proprietăți de erodare mult mai bune față de aluminiul natur; se pot întreține și curăța mult mai ușor.

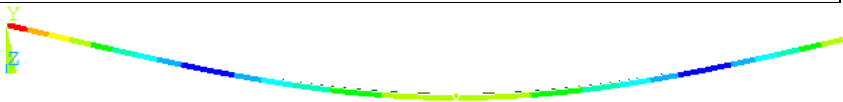
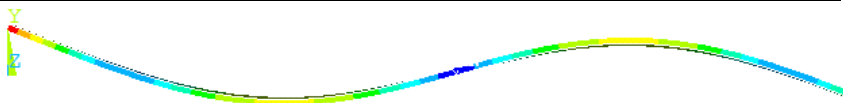
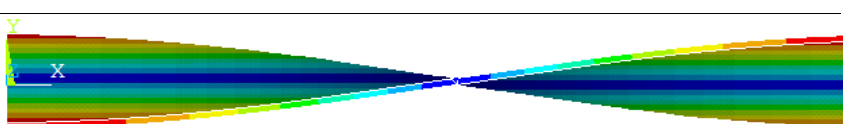
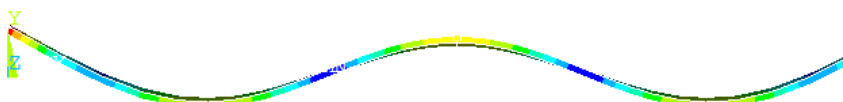
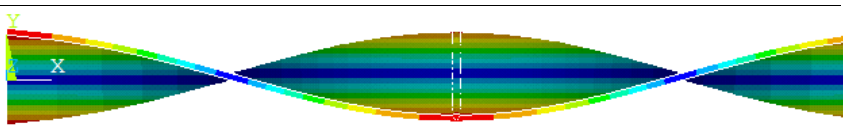
Aluminiul are caracteristici de prelucrabilitate mărită: poate fi excelent prelucrat prin strunjire și are o sudabilitate bună (cu proceduri MIG/WIG). În construcții civile este folosit pentru placări interioare și exterioare, este un material preferabil pentru desig-neri ca și elemente decorative.

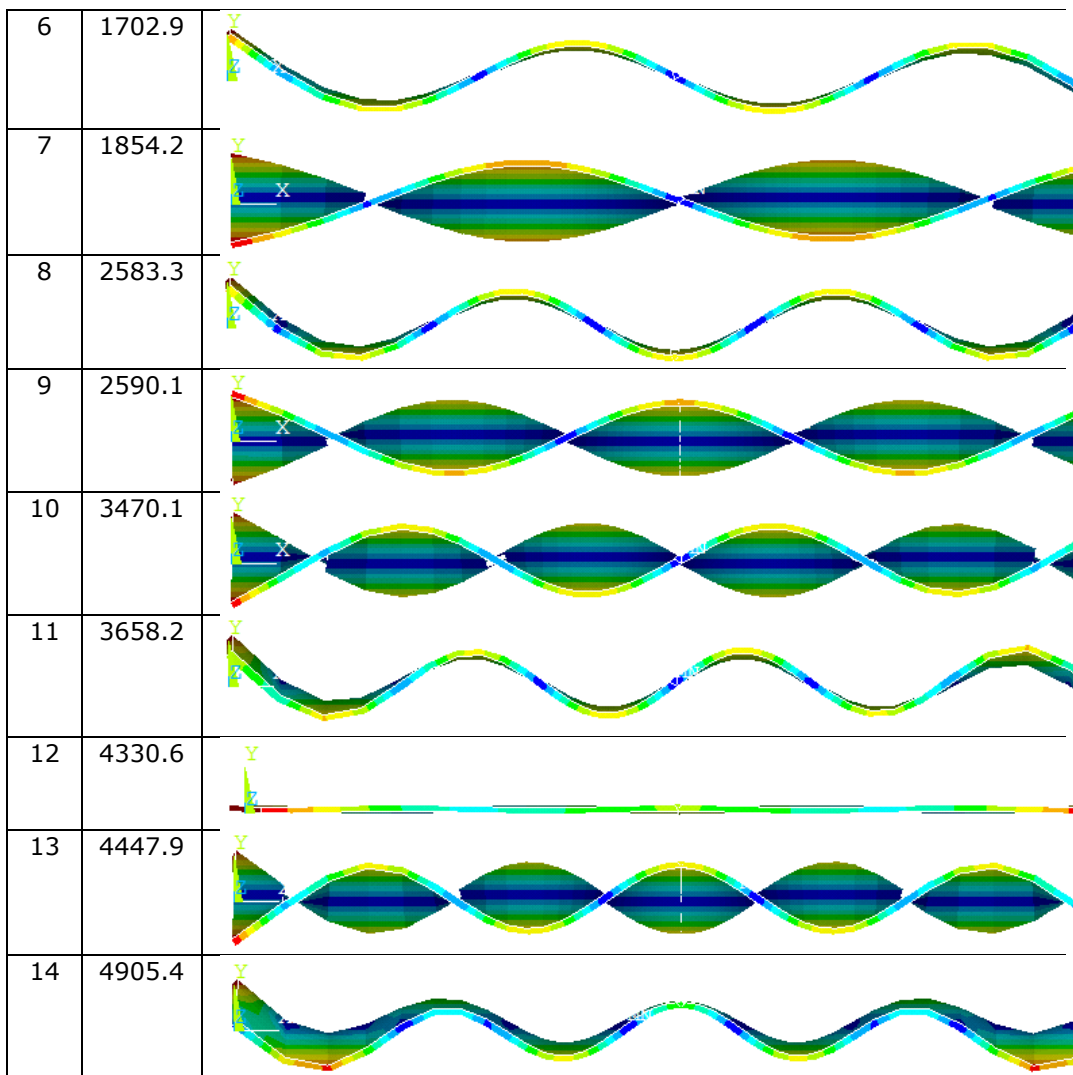
Pentru analiza comportării dinamice prin modelarea cu elemente finite a tablelor din aluminiu laminat, sudate transversal, prin procedeul WIG, s-au realizat un număr de trei probe, având dimensiunile date în Tabelul 6.9..

Tabelul 6.9. Dimensiunile probelor din aluminiu laminat analizate prin programul ANSYS

Nr.crt	Lungimea [mm]	Lățimea [mm]	Grosimea [mm]	Materialul de bază
1	154.5	75	3	Aluminiu laminat la rece
2	155.5	75	3	Aluminiu laminat la rece
3	206	39.5	1.5	Aluminiu laminat la rece

Tabelul 6.10. Primele 14 moduri naturale și frecvențele corespunzătoare pentru proba din tablă aluminiu laminat de grosime 1.5 mm

Nr	Frecv. [Hz]	Forma modului
1	184.97	
2	512.80	
3	578.18	
4	1017.7	
5	1176.9	



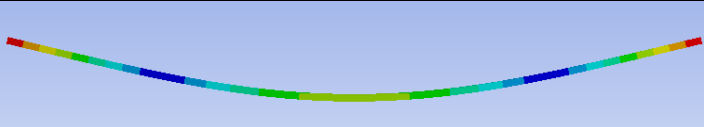
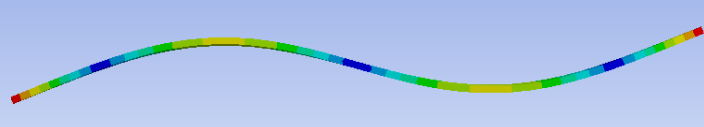
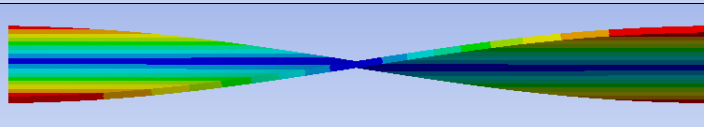
6.3.5 Rezultatele AM pentru tablele din oțel S 235 JR acoperite prin zincare și prin pulverizare metalică

Pentru analiza modificării comportării dinamice, prin modelarea cu elemente finite, a tablelor din oțel de uz general S 235 JR, în urma acoperirii prin zincare sau prin pulverizare metalică s-au ales două probe, având dimensiunile din Tabelul 6.11.

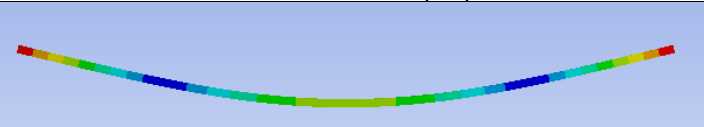
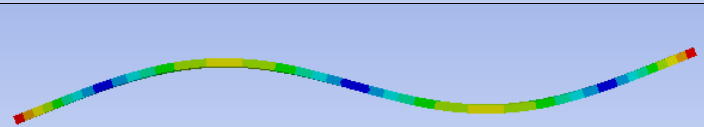
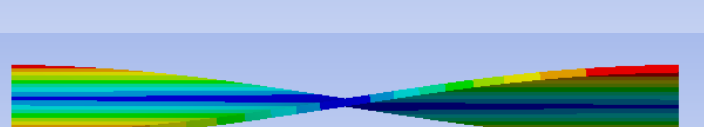
Tabelul 6.11. Dimensiunile probelor din oțel S 235 JR, acoperite prin zincare sau cu pulberi metalice, analizate prin programul ANSYS

Nr.crt	Lungimea [mm]	Lățimea [mm]	Grosimea [mm]	Grosimea stratului de acoperire [mm]	Materialul de bază /Material de acoperire
1	210	40	2	0,2	S 235 JR/ Zn
2	155.5	75	3	0,5	S 235 JR/ ZnO


Tabelul 6.12. Primele 3 moduri naturale și frecvențele corespunzătoare pentru proba 1 din Tabelul 6.11, înainte de zincare

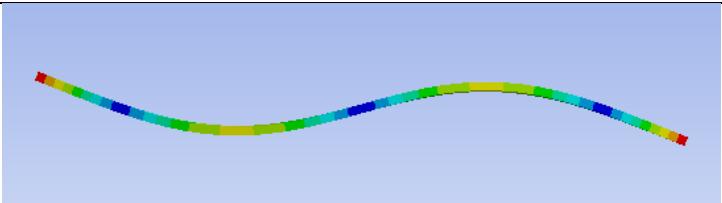
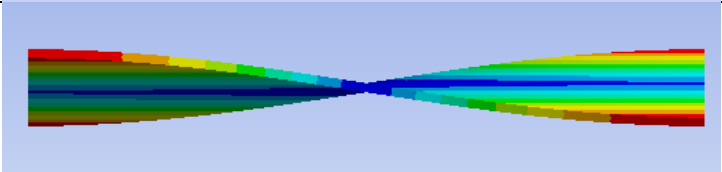
Mod	Frecvența [Hz]	Forma modului propriu
1	249.68	
2	674.03	
3	762.73	

Tabelul 6.13. Primele 3 moduri naturale și frecvențele corespunzătoare pentru proba 1 din Tabelul 6.11, după zincare

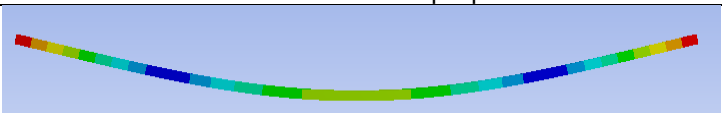
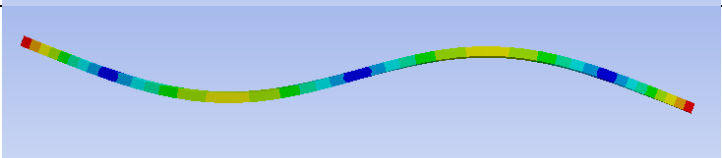
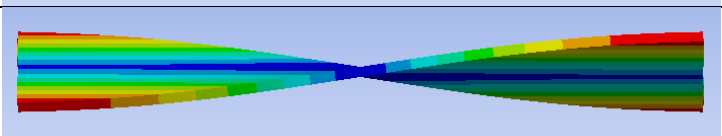
Mod	Frecvența	Forma modurilor proprii
1	267.08	
2	702.82	
3	902.3	

Tabelul 6.14. Primele 3 moduri naturale și frecvențele corespunzătoare pentru proba 2 din Tabelul 6.11, înainte de pulverizare metalică

Mod	Frecvența	Forma
1	261.96	

2	723.94	
3	930.37	

Tabelul 6.15. Primele 3 moduri naturale și frecvențele corespunzătoare pentru proba 1 din Tabelul 6.11, după pulverizare metalică

Mod	Frecvența	Forma modurilor proprii
1	291.73	
2	862.52	
3	961.51	

6.3.6. Discuții și concluzii preliminare

Din analiza tuturor rezultatelor obținute pe baza MEF implementate în programul ANSYS se poate constata că Metoda Analizei Modale (MAM) dă informații foarte utile pentru etapa următoare cea a determinărilor experimentale. Pe baza acestei metode putem să stabilim ordinea modurilor proprii. Acestea sunt prezentate în ordinea crescătoare a frecvențelor proprii. De asemenea, această metodă arată forma modurilor proprii și natura acestora. Se constată că nu există o succesiune riguroasă : un mod propriu de încovoiere urmat de un mod propriu de răsucire. Ba mai mult, la frecvențe proprii mari apar moduri proprii de încovoiere în planul orizontal, nu numai moduri proprii de încovoiere în plan vertical.

O altă observație care se desprinde din această AM se referă la faptul că odată cu creșterea raportului dintre grosimea plăcilor și lățimea lor, probele din table sudate nu se mai comportă ca o bară, decât pentru primele frecvențe proprii (frecvențe joase), iar odată cu creșterea frecvențelor modurilor acestea se comportă ca o placă. Modurile proprii nu mai sunt de încovoiere pură sau de răsucire pură. Prin urmare, nu mai este valabilă teoria vibrațiilor de încovoiere a barelor (Euler –

Bernoulli) și nici teoria vibrațiilor de răsucire și ca o consecință nici formulele date de ecuațiile (7.1) și (7.2) nu mai sunt valabile.

O primă concluzie care se desprinde din observația de mai sus este faptul că pentru a determina, pe cale experimentală, atât modulul de elasticitate longitudinal E cât și modulul de elasticitate transversal G , dintr-o analiză spectrală (o singură măsurătoare) trebuie reținute frecvențele primelor moduri de vibrații, până la inclusiv primul mod de răsucire.

Pentru plăcile din oțel general S 235 JR acoperite prin zincare se constată o creștere a frecvențelor proprii, deși în procesul de acoperire are loc și o depunere de material. Prin urmare are loc atât o modificare masică cât și una de rigiditate.

Aceeași observație se poate face și în legătură cu acoperirea tablelor de oțel S 235 JR cu pulberi metalice. Mai mult, din determinările experimentale făcute pe bara neacoperită cu pulberi metalice și bara acoperită cu pulberi metalice se pot determina caracteristicile mecanice ale materialului de acoperire.

7 TEHNICI EXPERIMENTALE ȘI REZULTATE EXPERIMENTALE

Pentru validarea pe cale experimentală a metodelor vibroacustice propuse pentru determinarea atât a caracteristicilor mecanice de material a unor table subțiri rezultate prin tehnici de acoperire metalică, prin lipire, respectiv sudare sau sudobrazare, cât și pentru detectarea unor defecte de îmbinare s-au conceput și realizat două standuri experimentale, corespunzătoare celor două tipuri de experimente :

- Investigarea experimentală bazată pe măsurarea, înregistrarea și prelucrarea semnalelor vibroacustice date de un microfon condensator, folosind următoarele tipuri de probe:
 - Table din oțel nealiat de uz general pentru construcții, S 235 JR (OL 37 în standardul vechi) acoperite prin pulverizare mecanică cu oxid de Zn;
 - Table din oțel de uz general S 235 JR acoperite prin zincare;
 - Table din oțel de uz general S 235 JR sudate transversal;
 - Table de oțel inoxidabil sudate transversal;
 - Table de aluminiu sudate transversal;
- Investigarea experimentală bazată pe măsurarea, înregistrarea și prelucrarea semnalelor vitezelor de vibrație date de un interferomeru laser VQ-400-A, folosind următoarele tipuri probe:
 - Table din oțel nealiat de uz general pentru construcții, S 235 JR (OL 37 în standardul vechi) acoperite prin pulverizare mecanică cu oxid de Zn;
 - Table din oțel de uz general S 235 JR acoperite prin zincare;
 - Table din oțel de uz general S 235 JR sudate transversal;
 - Table de oțel inoxidabil sudate transversal;
 - Table de aluminiu sudate transversal;

În continuare se vor prezenta cele două standuri experimentale utilizate pentru fiecare dintre cele două tipuri de experimente enunțate anterior, apoi se vor descrie pe rând experimentele realizate și se vor prezenta rezultatele obținute experimental pentru modulul de elasticitate Young, modulul de elasticitate de forfecare și coeficientul lui Poisson. Se va prezenta și sensibilitatea unui indicator la modificările frecvențelor proprii odată cu mărirea defectului într-o structură sudată. La final se vor discuta rezultatele obținute.

7.1 Investigarea vibroacustică a structurilor mecanice

Standul experimental (figura 7.1) realizat în vederea măsurătorilor vibroacustice ale probelor propuse pentru investigații experimentale se compune din structura mecanică de investigat 1, care este suspendată de suportii metalici 3 cu ajutorul unor legături elastice 4. Structura analizată poate fi excitată cu ajutorul unui ciocan modal cu vârf tare (care poate excita și frecvențele înalte ale structurii, frecvențe care nu fac obiectul acestor investigații), iar în lipsa acestuia și prin intermediul unui ciocănel dintr-un material de plastic durificat, dispozitiv folosit pentru xilofoane 2. Semnalul vibroacustic este înregistrat cu ajutorul unui microfon supercardioid 5. Acesta are avantajul că are sensibilitate mărită pentru undele

acustice care vin din fața microfonului, și o sensibilitate atenuată pentru undele acustice care vin din lateral. Semnalul dat de microfon este amplificat și apoi achiziționat printr-un port USB de către programul de achiziții Cakewalk instalat pe calculatorul 6.

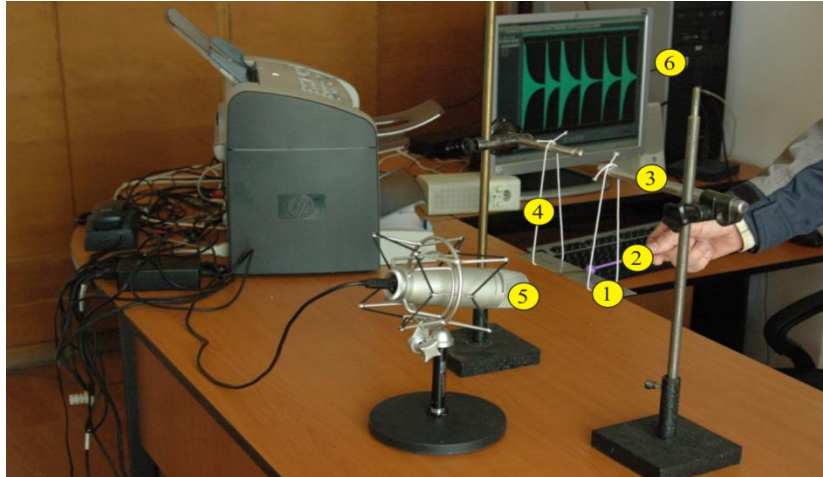


Figura 7.1 Stand experimental pentru măsurători vibroacustice ale structurilor mecanice suspendate elastic

Standul a fost conceput în două variante, astfel încât să poată fi făcute măsurători experimentale pe probe realizate în condițiile de frontieră considerate ca fiind cu capetele libere (Figura 7.1) și în condițiile în de frontieră cu un capăt încastrat. Pentru realizarea standului, structura 1, supusă experimentărilor s-a încastrat la un capăt într-o menhină 2. Microfonul 3 s-a fixat de suportul metalic 4, iar semnalul dat de acesta a fost amplificat de amplificatorul de semnal 5 și introdus în calculatorul 6.

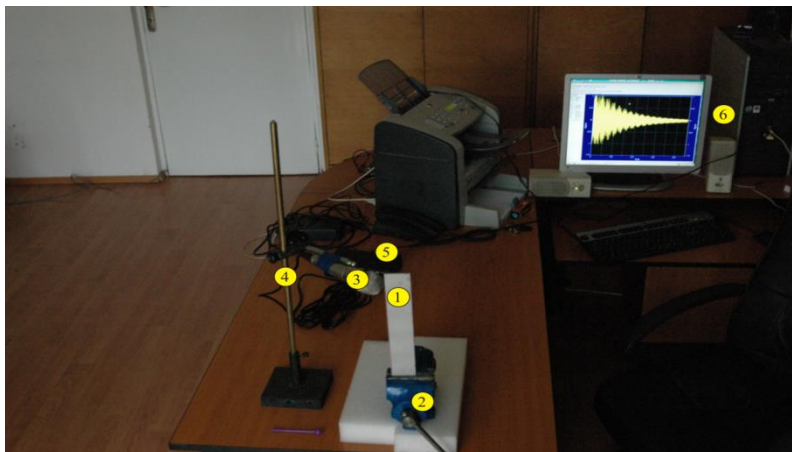


Figura 7.2 Stand experimental pentru măsurători vibroacustice ale unor probe încastrate la un capăt

7.2 Rezultate experimentale obținute prin măsurători vibroacustice

7.2.1 Determinarea caracteristicilor mecanice ale tablelor din oțel de uz general S 235 JR sudate transversal. Rezultate obținute

Pe standul din figura 7.1 s-au efectuat măsurători de vibrații pentru un număr de 4 probe din oțel de uz general S 235 JR, probe care au fost analizate din punct de vedere al comportării dinamice prin Metoda Analizei Modale în capitolul precedent. Semnalul vibroacustic este preluat de un microfon de tip condensator de bună calitate. Apoi, semnalul este transmis sub forma unei tensiuni electrice spre o placă de achiziții de semnale, care este de fapt placa de sunet a calculatorului, și amplificat de un amplificator de microfon situat pe această placă. Placa de achiziție este și convertor analog digital al semnalului dat de microfon, având posibilitatea reglării frecvenței de eșantionare. Semnalele au fost discretizate cu o frecvență de eșantionare de 44,1 kHz, având astfel, posibilitatea analizei spectrale, conform teoremei Shenon, până la o frecvență de 22 kHz, adică în spectrul audibil.

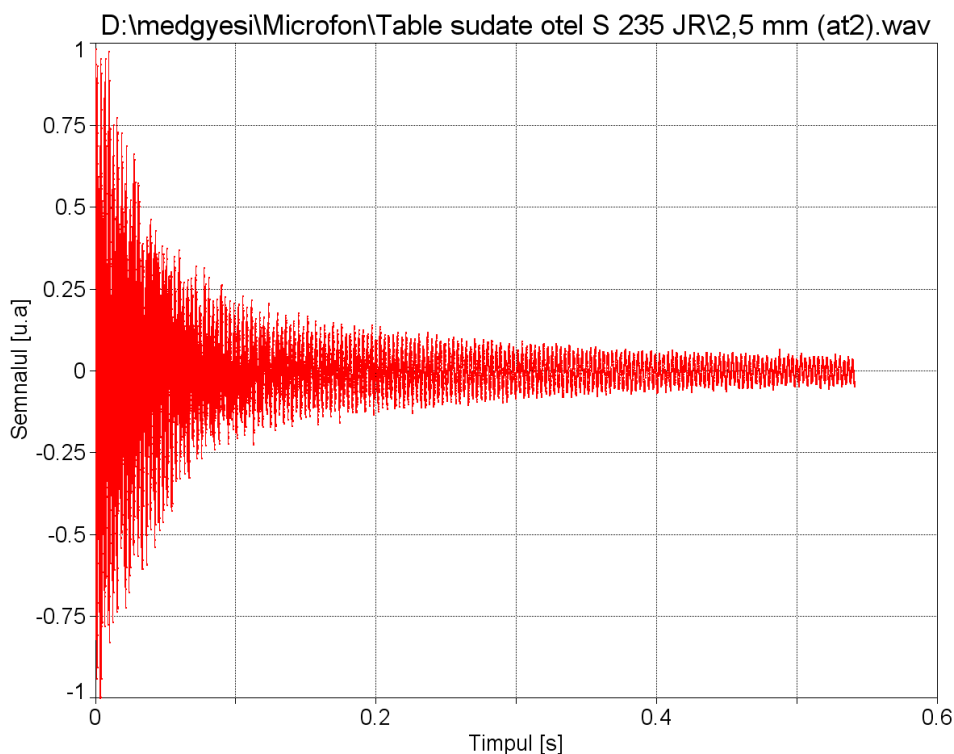


Figura 7.3 Semnalul înregistrat cu microfonul, de la proba nr.4 din oțel S 235 JR

Semnalele discretizate au fost achiziționate prin programul CoolEdit 2 profesional sub forma unor fișiere cu extensia wav. Pentru prelucrarea (analiza) semnalelor discretizate, stocate în fișierele wav, s-a folosit programul MATLAB [132]. În figura 7.3 se prezintă semnalul înregistrat de la proba de oțel S 235 JR.

Pentru fiecare probă au fost înregistrate mai multe semnale cărora li s-a făcut o analiză spectrală folosind TFR și o analiză pe baza metodei seriilor Prony.

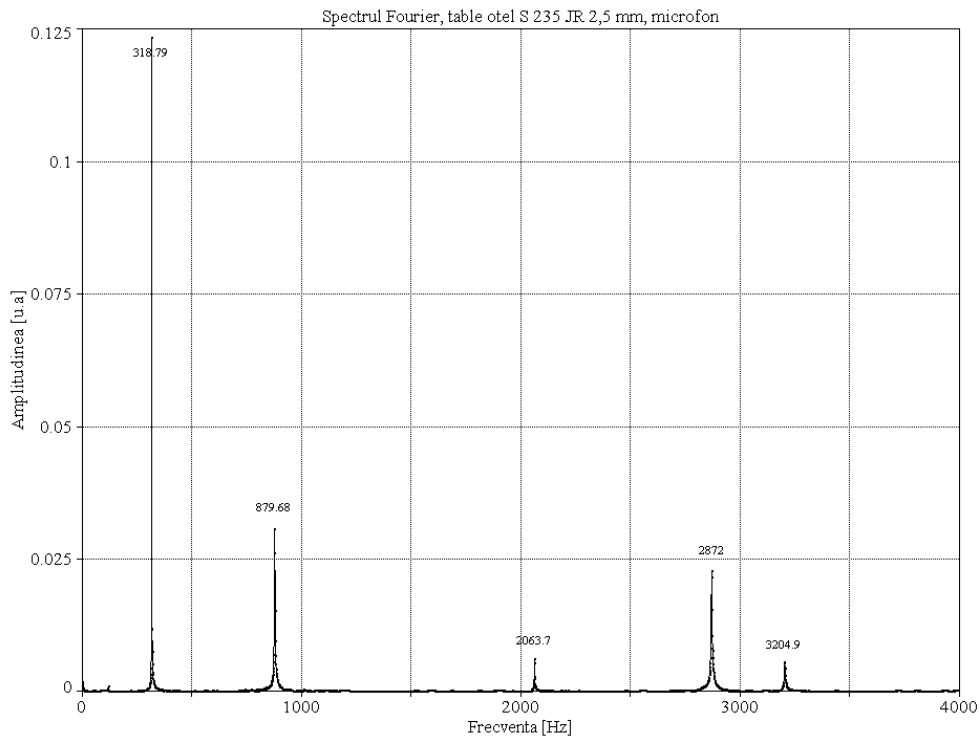


Figura 7.4 Spectrul Fourier a semnalului obținut de la proba 4 din oțel S 235 JR

Frecvențele obținute prin TFR în toate spectrele celor 4 probe sunt comparate cu frecvențele obținute prin Metoda Analizei Modale. Totodată, prin această comparație se poate determina și natura modului căruia îi corespunde fiecare frecvență din spectru. Pe cale experimentală se poate determina doar compoziția spectrală a semnalului, nu și natura modului de vibrație la care corespunde (ANEXA 5).

Modulul de elasticitate longitudinal se determină pe cale experimentală, pentru fiecare frecvență din tabelul 7.1, pe baza formulei (3.64). Această ecuație poate fi scrisă sub o altă formă, având în vedere faptul că deplasarea de încovoiere are loc în planul Oxz. În acest caz momentul de inerție geometric față de axa Oy este $I_y = bH^3/12$, iar aria secțiunii transversale $A = bH$. Cu b s-a notat lățimea barei, iar cu H grosimea. Înlocuind aceste mărimi în (3.64), se obține ecuația care dă valorile modulul de elasticitate longitudinal pentru frecvențele considerate din spectrul analizat, sub forma:

$$E = \frac{\rho_r^2 L^4 \rho A}{X_r^4 I} = \frac{4n^2 f_r^2 L^4 \rho A}{X_r^4 I} = \frac{48\rho n^2 f_r^2 L^4}{X_r^4 H^2}. \quad (7.1)$$

În acest tabel și în toate cele care vor urma valoare modulul de elasticitate teoretic longitudinal, E_r , adică cel folosit în Modelarea cu Elemente Finite, se va înmulți cu 10^{11} . Același lucru este valabil și pentru valorile modurilor de elasticitate determinați pe cale experimentală, pentru frecvențele proprii, E_r ; $r=1,2,3,4$.

Tabelul 7.1 Rezultatele experimentale ale determinării modulului de elasticitate longitudinal pentru table sudate din oțel S 235 JR

Nr probei	E_t N/m ²	f_1 Hz	E_1 N/m ²	f_2 Hz	E_2 N/m ²	f_3 Hz	E_3 N/m ²	f_4 Hz	E_4 N/m ²
1	2	111.68	2.31	292.24	2.08	591.58	2.226	979.3	2.23
2	2	130.84	2.07	355.38	2.01	695.07	2.00	1160.9	2.04
3	2	199.03	2.14	550.68	2.15	1083	2.16	1800.7	2.19
4	2	318.52	2.02	879.35	2.03	1759	2.11	2872	2.06

Pentru determinarea modulului de elasticitate transversal G , ecuația (3.16), cuplată cu soluția ecuației caracteristice din tabelul 3.1, pentru cazul barei libere la capete (L-L), ținând cont de faptul că secțiunea transversală este dreptunghiulară, devine:

$$G = \frac{4\rho f_r^2 L^2 K_r}{r^2} = \frac{4\rho f_r^2 L^2}{r^2} \frac{\frac{b}{H} + \frac{H}{b}}{4\left(\frac{H}{b}\right) - 2.52\left(\frac{H}{b}\right)^2 + 0.21\left(\frac{H}{b}\right)^6} \quad (7.2)$$

Tabelul 7.2 Rezultatele experimentale ale determinării modulului de elasticitate transversal pentru table sudate din oțel S 235 JR

Nr probei	G_t N/m ²	f_1 Hz	G_1 N/m ²	f_2 Hz	G_2 N/m ²	f_3 Hz	G_3 N/m ²	f_4 Hz	G_4 N/m ²
1	7.69	324	8.34	702.8	9.82	1044.1	9.63	1451	10.47
2	7.69	417.1	9.19	809.6	8.66	1300	9.92	1737	9.97
3	7.69	546	6.89	1212	8.49	1901	9.28	2672	10.32
4	7.69	1011	8.79	2063	9.15	3061	8.95	4347	10.16

În acest tabel și în toate tabelele în care apare modulul de elasticitate transversal teoretic, G_t , adică cel folosit în MEF, cifrele din tabel trebuie înmulțite cu 10^{10} . Acest fapt este valabil și pentru modulii de elasticitate transversali determinați pe cale experimentală, G_r ; $r=1,2,3,4$.

Valorile frecvențelor folosite în formulele (7.1) și (7.2) sunt extrase din spectrele date în ANEXA 5, iar cele care nu apar în spectrul considerat au fost citite în timpul prelucrării rezultatelor. Citirea frecvențelor corespunzătoare tuturor vârfurilor (componentelor de rezonanță) fiind posibilă.

Pentru determinarea coeficientului lui Poisson se folosește relația de legătură dintre cei trei moduli, știindu-se faptul că aceștia nu sunt independenți,

$$\nu = \frac{E}{2G} - 1. \quad (7.3)$$

7.2.2 Determinarea caracteristicilor mecanice ale tablelor din oțel inoxidabil EN X5 Cr Ni 18-10, sudate transversal. Rezultate obținute

Pentru determinarea experimentală a caracteristicilor mecanice ale tablelor de oțel inoxidabil EN X5 CrNi 18-10, sudate transversal, se folosesc spectrele Fourier date în ANEXA6, cuplate cu rezultatele din ANEXA 3.

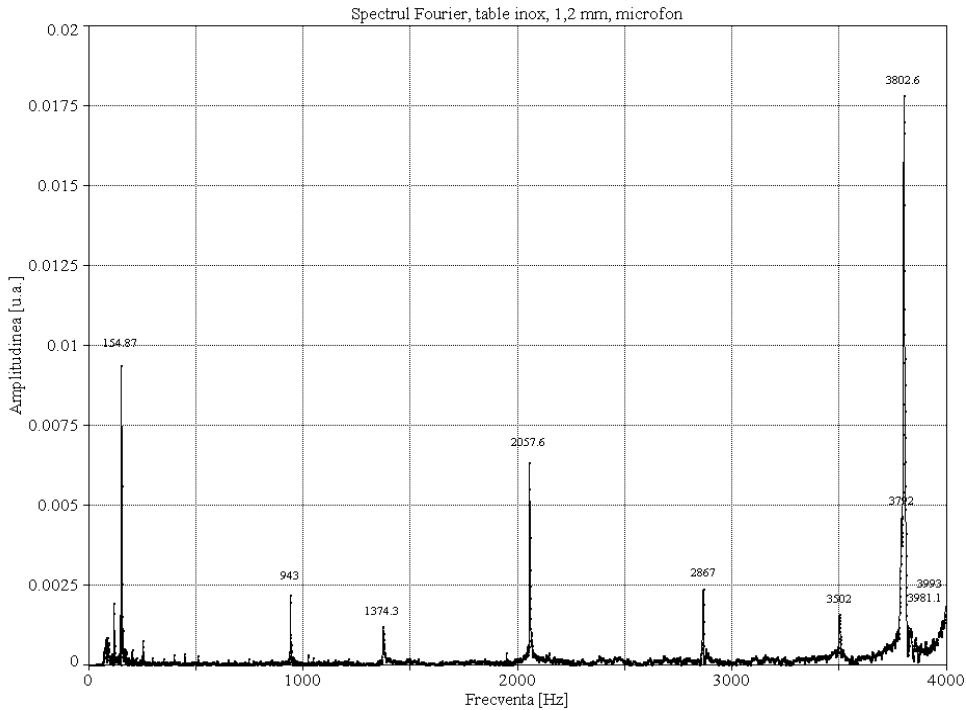


Figura 7.5 Spectrul Fourier a semnalului de la proba din oțel INOX de 1.2mm

Tabelul 7.3 Rezultatele experimentale ale determinării modului de elasticitate longitudinal pentru table sudate din oțel inoxidabil

Nr probei	E_t N/m ²	f_1 Hz	E_1 N/m ²	f_2 Hz	E_2 N/m ²	f_3 Hz	E_3 N/m ²	f_4 Hz	E_4 N/m ²
1	1.93	122.9	2.02	336.74	2.00	674	2.08	1089.2	1.99
2	1.93	137.26	2.10	370.7	2.01	761	2.21	1249.6	2.18
3	1.93	154.87	1.93	429.39	1.95	853.62	2.01	1374.3	1.91
4	1.93	248.38	1.84	687.65	1.86	1437.2	2.11	2371.4	2.11
5	1.93	394.72	2.12	1079.5	2.09	2128.9	2.11	3458	2.01

Calculul valorilor din tabellele 7.3 și 7.4 s-au făcut cu formulele (7.1) și (7.2). Coeficientul lui Poisson se va determina pe baza formulei (7.3) în paragraful 8.2.

Tabelul 7.4 Rezultatele experimentale ale determinării modului de elasticitate transversal pentru table sudate din oțel inoxidabil

Nr probei	G_t N/m ²	f_1 Hz	G_1 N/m ²	f_2 Hz	G_2 N/m ²	f_3 Hz	G_3 N/m ²	f_4 Hz	G_4 N/m ²
1	7.366	349	7.98	712.9	8.32	1145.8	9.55	1611	10.63
2	7.366	400.3	8.27	797	8.20	1306.1	9.78	1771	10.12
3	7.366	502.1	8.81	943	7.77	1526	9.04	2130	9.91
4	7.366	791	7.71	1611	8.00	2383	7.78	3529	9.60
5	7.366	1470	7.80	2951	7.86	4621	8.56	6288	8.92

7.2.3 Determinarea caracteristicilor mecanice ale tablelor din aluminiu laminat, sudate transversal. Rezultate obținute

Pentru determinarea experimentală a modului de elasticitate longitudinal și modului de elasticitate transversal pentru tablele din aluminiu laminat la rece s-au utilizat spectrele din ANEXA 7 cuplate cu rezultatele din ANEXA 4.

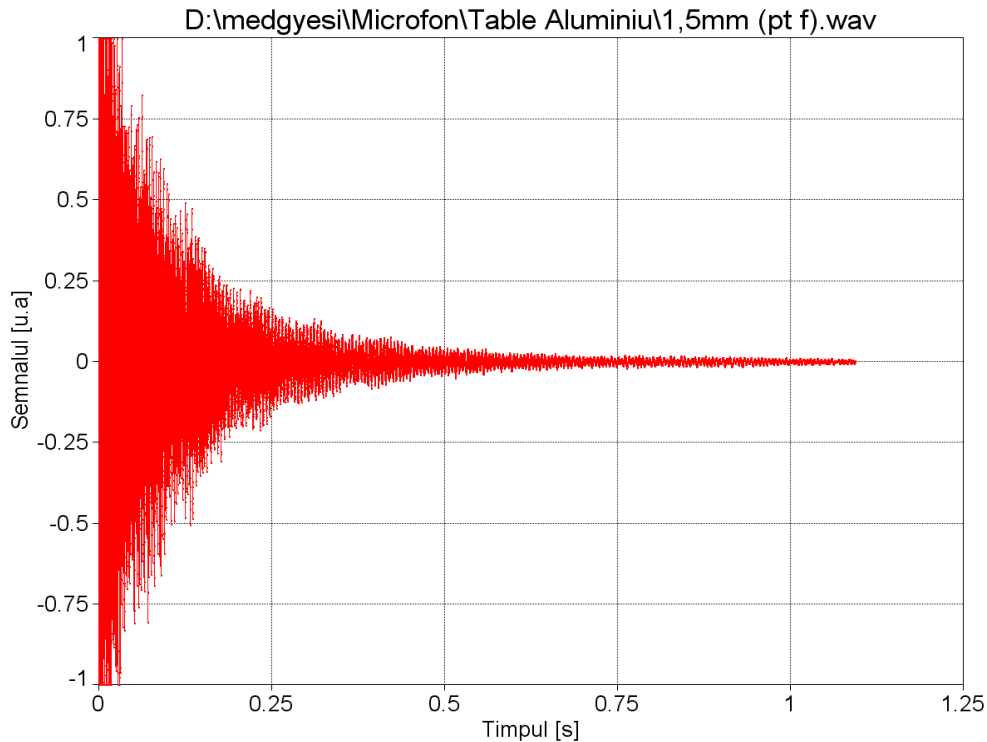


Figura 7.6 Semnalul înregistrat cu microfonul, de la proba nr.1 din aluminiu

Pentru determinarea valorilor experimentale ale modului de elasticitate longitudinal, E , corespunzătoare primelor patru frecvențe ale modurilor de vibrație de încovoiere se folosește formula (7.1), iar frecvențele sunt obținute din spectrele din ANEXA 7.

Tabelul 7.5 Rezultatele experimentale ale determinării modului de elasticitate longitudinal pentru table sudate din aluminiu

Nr probei	E_t N/m ²	f_1 Hz	E_1 N/m ²	f_2 Hz	E_2 N/m ²	f_3 Hz	E_3 N/m ²	f_4 Hz	E_4 N/m ²
1	7.1	197.9	8.22	516.08	7.35	1049.7	7.91	1683.9	7.46
2	7.1	707.45	8.30	1924.8	8.09	3051.5	5.29	3758.6	2.94
3	7.1	679.99	7.87	1860.2	7.75	2921	4.97	3686.7	2.90

Determinarea modului de elasticitate transversal G , pentru probele de aluminiu se aplică formula (7.2), iar frecvențele primelor patru moduri de răsucire se identifică pe baza AM și valorilor din spectrele date în ANEXA 7.

Tabelul 7.6 Rezultatele experimentale ale determinării modului de elasticitate transversal pentru table sudate din aluminiu

Nr probei	G_t N/m ²	f_1 Hz	G_1 N/m ²	f_2 Hz	G_2 N/m ²	f_3 Hz	G_3 N/m ²	f_4 Hz	G_4 N/m ²
1	2.669	601	3.02	1108.2	2.56	1911	3.39	2615	3.57
2	2.669	880	3.28	1863.9	3.68	3198	4.82	3440	3.14
3	2.669	859.3	3.17	1883.4	3.81	3166.7	4.79	3373.3	3.05

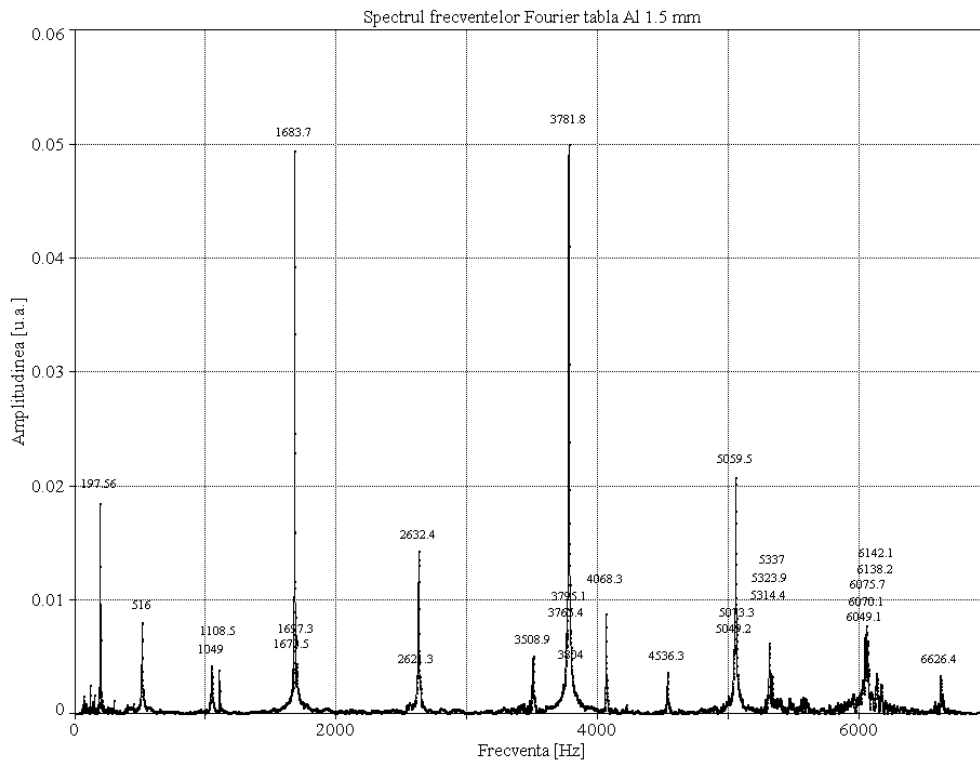


Figura 7.7 Spectrul Fourier a semnalului de la proba din aluminiu 1.5mm

7.2.4 Modificarea caracteristicilor mecanice ale tablelor din oțel de uz general S 235 JR, prin zincare

Pentru a arăta modul în care influențează caracteristicile mecanice, procedeul de acoperire galvanică prin zincare, cel mai ușor este a folosi formula (3.63) care dă dependența frecvențelor de rezonanță în funcție de densitatea probei, dimensiunile lui și o caracteristică dată de produsul EI, numit și rigiditate. Dacă se notează cu f_0 una dintre frecvențele de rezonanță ale probei din oțel S 235 JR înainte de zincare, cu μ_0 masa unității de lungime a acesteia, iar cu $(EI)_0$ rigiditatea acesteia. Această ecuație se poate pune sub forma :

$$f_0 = \frac{X_T^2}{2\pi} \sqrt{\frac{(EI)_0}{\mu_0}} \quad (7.4)$$

Dacă se notează cu f_c frecvența corespunzătoare pentru placa acoperire prin zincare (deci a ansamblului), cu $(EI)_c$ rigiditatea probei zincate, iar cu μ_c masa unității de

lungime a acestuia se poate scrie o relație de forma (7.4). Făcând raportul acestor două relații se obține:

$$\frac{f_C^2}{f_0^2} = \frac{(EI)_C \mu_0}{(EI)_0 \mu_C} \quad (7.5)$$

Prin achiziția unui semnal dintr-o probă de oțel S 235 JR înainte de zincare și analiza spectrală a acestui semnal, apoi achiziția unui semnal pentru proba zincată și analiza spectrală a acestui semnal, se obțin cele două frecvențe din relația (7.5). Din această relație se deduce rigiditatea probei zincate:

$$(EI)_C = (EI)_0 \frac{f_C^2}{f_0^2} \frac{\mu_C}{\mu_0} \quad (7.6)$$

Se poate face o observație, având în vedere faptul că prin zincare grosimea stratului de acoperire este de ordinul a 50-70 μm , masa unității de lungime este foarte puțin modificată, deci se poate face aproximația:

$$(EI)_C = (EI)_0 \frac{f_C^2}{f_0^2} \quad (7.7)$$

Adică rigiditatea se modifică cu pătratul raportului frecvențelor de rezonanță. În ANEXA 8 sunt date rezultatele obținute prin prelucrarea semnalelor obținute de la proba din oțel S235 JR înainte și după zincare. Se constată că frecvența primului mod se modifică de la 261, 206 Hz, înainte de zincare la 265,994 după zincare, iar rigiditatea crește cu 3,7%.

7.2.5. Determinarea caracteristicilor mecanice ale stratului de oxid de Zn folosit la acoperirea tablelor din oțel de uz general

Problema pusă în paragraful precedent poate fi modificată, în sensul că în acest paragraf să se urmărească determinarea caracteristicilor mecanice ale materialului de acoperire. În cazul experiențelor efectuate s-au utilizat probe din oțel S 235 JR care apoi au fost acoperite prin pulverizare metalică cu un oxid de zinc

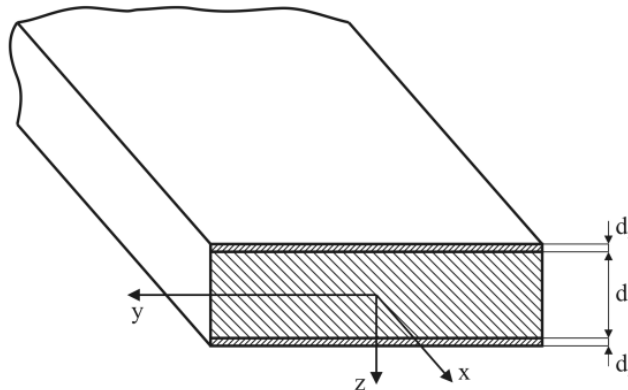


Figura 7.8 Probă din S 235 JR după acoperire prin pulverizare metalică

Pornind de relația (7.6), înlocuind valorile momentelor de inerție geometrică pentru table cu secțiune dreptunghiulară, notând E_a modulul de elasticitate longitudinal al materialului de acoperire, iar cu d_1 și d_2 sunt notate grosimile tablei de bază, respectiv materialului de acoperire. După efectuarea calculelor se obține:

$$\frac{f_C^2 - f_0^2}{2f_0^2} = \left(\frac{3E_a}{E_0} - \frac{\rho_a}{\rho_0} \right) \frac{d_2}{d_1} \quad (7.8)$$

După cum se poate constata, din ecuația (7.8) poate fi determinat modulul de elasticitate al materialului de acoperire, adică E_a . Acesta poate fi determinat din două măsurători de semnale de vibrații, prima pentru materialul de bază, adică oțelul, iar a doua pentru întreg ansamblul: materialul de bază acoperit prin pulverizare metalică. Din ecuația (7.8) se obține:

$$E_a = \frac{E_0}{3} \left(\frac{f_c^2 - f_0^2}{2f_0^2} \frac{d_1}{d_2} + \frac{\rho_a}{\rho_0} \right) \quad (7.9)$$

În ANEXA 8 sunt date rezultatele obținute prin prelucrarea semnalelor obținute de la proba din oțel S 235 JR înainte de acoperire cu oxid de zinc și după acoperire. Pentru proba considerată se cunosc următoarele date : $d_1 = 2 \text{ mm}$, $d_2 = 0.3 \text{ mm}$, $E_0 = 2 \cdot 10^{11} \text{ N/m}^2$, $\rho_0 = 7850 \text{ kg/m}^3$, $\rho_a = 5650 \text{ kg/m}^3$. Pentru analiza semnalului s-a folosit metoda seriilor Prony. Se constată că frecvența primului mod de încovoiere, înainte de acoperire cu pulberi metalice, adică a probei de oțel, este $f_0 = 266,34 \text{ Hz}$, iar după acoperirea cu ZnO frecvența primului mod este $f_c = 268,85 \text{ Hz}$. Modulul de elasticitate longitudinal, determinat pe baza formulei (7.9), pentru oxidul de zinc, este $E_a = 1,16 \cdot 10^{11} \text{ N/m}^2$.

7.3 Stand experimental pentru măsurători cu vibrometrul laser

Standul experimental folosit pentru măsurarea fără contact a vitezelor vibrațiilor unor suprafețe, este prezentat în figura 7.3 și este compus din:

1. vibrometrul VQ-400-A care constituie un senzor optic de măsurat vibrații pentru aplicații industriale;
2. structura mecanică de analizat;
3. firele elastice pentru susținerea structurii în condiții de frontieră cu capetele libere;
4. suportii de susținere a structurii mecanice (probei);
5. calculatorul care are înglobată și placa de achiziții.

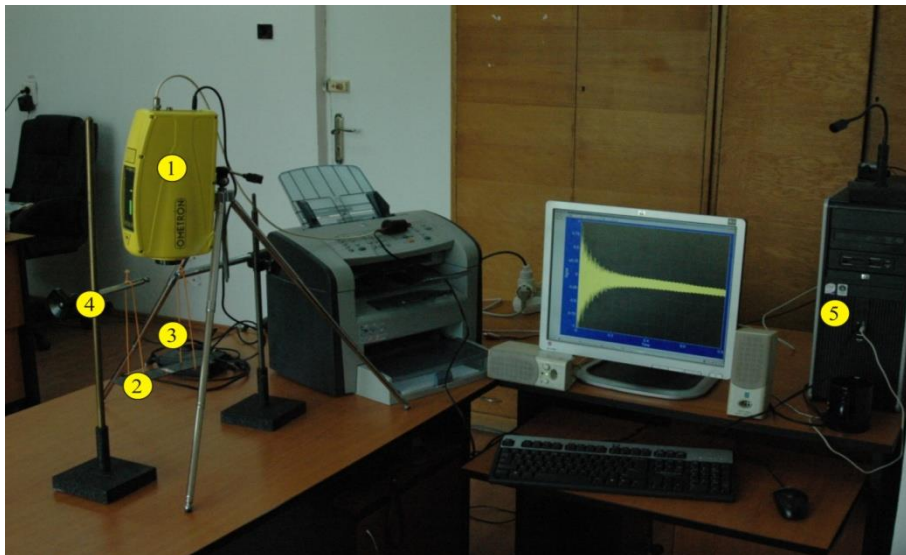


Figura 7.9 Stand experimental pentru măsurători cu vibrometrul laser ale probelor suspendate elastic

Ca și în cazul măsurătorilor vibroacustice și în cazul măsurătorilor de vibrații cu vibrometrul laser standul din figura 7.9 s-a modificat într-unul prezentat în figura 7.10 pentru a putea face măsurători și în condițiile de frontieră în care probele au un capăt încadrat în menghină și se compune din:

1. vibrometrul VQ-400-A care constituie un senzor optic de măsurat vibrații pentru aplicații industriale;
2. structura mecanică de analizat;
3. menghina pentru realizarea încadrării probelor;
4. lumina laser incidentă pe placa analizată;
5. calculatorul care are înglobată și placa de achiziții.

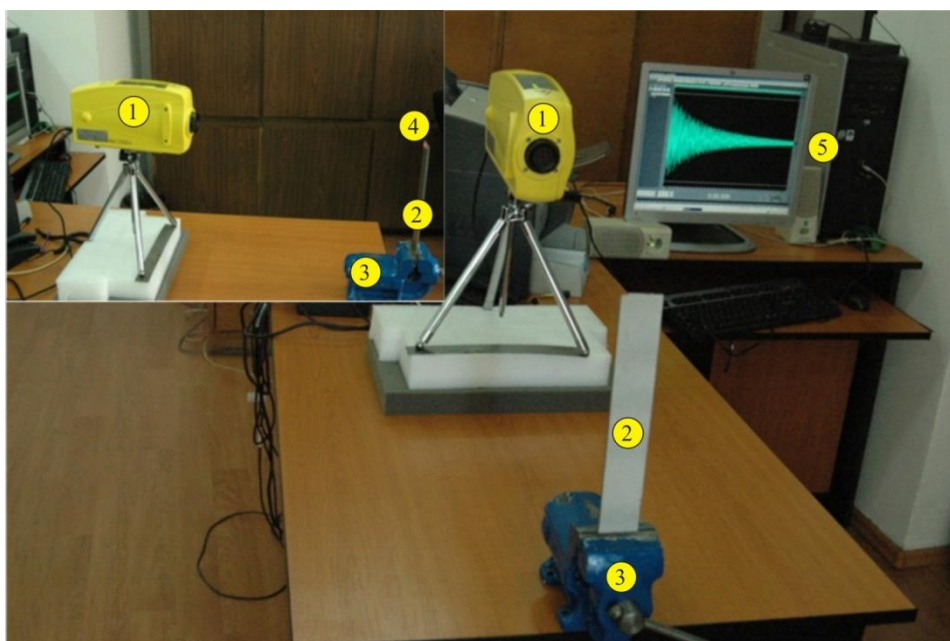


Figura 7.10 Stand experimental pentru măsurători cu vibrometrul laser ale probelor încadrate

7.3.1 Principiul de măsurare cu vibrometrul laser

Vibrometrul laser VQ-400-A este un instrument optic capabil să măsoare viteza unui obiect aflat în mișcare pe baza fenomenului Doppler folosind diferența în frecvență dintre unda laser incidentă și unda laser reflectată. În această situație unda de lumină laser este emisă de o sursă fixă (vibrometru) și este transmisă spre un obiect aflat în mișcare (proba), care apoi o retransmite (deci obiectul devine o sursă în mișcare) spre un observator (receptor) staționar care este tocmai vibrometrul. Această combinație, care poate fi considerată ca un „dublu efect Doppler” poate fi înțeleasă dacă propagarea undei laser este împărțită în două etape: în prima etapă, există o sursă fixă și un observator în mișcare (care este tocmai proba investigată) și în a doua etapă, proba se comportă ca o sursă mișcare, reflectând la receptor lumina incidentă.

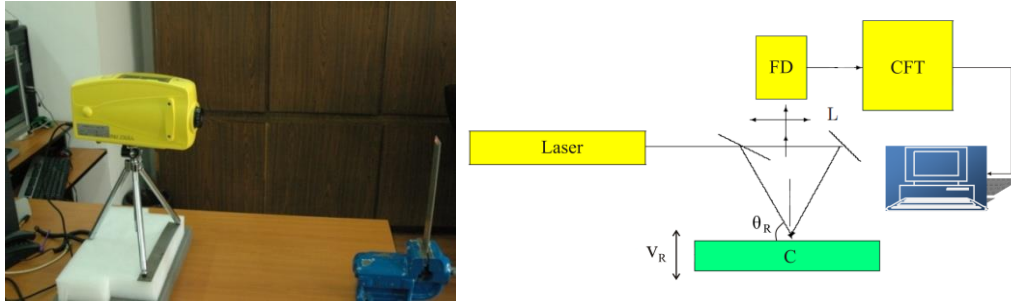


Figura 7.11. Velocimetrul Doppler Laser

Combinând aceste două etape, relația (4.66) care dă frecvența undei reflectate, prin schimbarea receptorului în sursă, se transformă, și se obține:

$$f = \frac{v + v_R \cos \theta_R}{v - v_R \cos \theta_R} f_0 = \frac{\lambda_0 f_0 + v_R \cos \theta_R}{\lambda_0 f_0 - v_R \cos \theta_R} f_0, \quad (7.10)$$

unde cu v_R s-a notat viteza receptorului, cu θ_R s-a notat unghiul pe care îl face raza laser cu receptorul (proba de investigat), iar λ_0 și f_0 sunt lungimea de undă, respectiv frecvența undei laser. Frecvența Doppler este dată ca diferența dintre frecvența undei incidente și frecvența undei reflectate și se obține din relația următoare:

$$f_D = |f_0 - f| = \left(1 - \frac{\lambda_0 f_0 + v_R \cos \theta_R}{\lambda_0 f_0 - v_R \cos \theta_R}\right) f_0 = \frac{2 v_R \cos \theta_R}{\lambda_0 f_0 - v_R \cos \theta_R} f_0. \quad (7.11)$$

Deoarece viteza luminii razei laser dată de produsul $\lambda_0 f_0$ este mult mai mare decât viteza receptorului (probei) înmulțită prin cosinusul unghiului dintre raza incidentă și placă, termenul $v_R \cos \theta_R$ de la numitorul relației (7.11) poate fi neglijat.

Măsurarea vitezei efectuate prin intermediul unui Velocimetru Doppler Laser (LDV) exploatează principiul fizic ilustrat mai sus, în care sursa de undă este un laser și receptor este un fotodetector care măsoară viteza suprafeței plăcii, viteză legată de schimbarea frecvenței f_D prin relația :

$$f_D = \frac{2 v_R \cos \theta_R}{\lambda_0}. \quad (7.12)$$

Deci, viteza obiectului (probei receptor) aflat în mișcare este dată de formula:

$$v_R = \frac{\lambda_0 f_D}{2 \cos \theta_R}. \quad (7.13)$$

Având în vedere faptul că în experimentele realizate unda incidentă, deci și unda reflectată, este perpendiculară pe suprafața probei investigate, unghiul $\theta_R = 0$, iar relația de mai sus devine:

$$v_R = \frac{\lambda_0 f_D}{2}. \quad (7.14)$$

O schemă foarte simplificată a unui LDV este dată în figura 7.11. Fasciculul laser este trimis cu două lame semitransparente pe suprafața corpului C, a cărui viteză v_R se dorește să se măsoare. Datorită deplasării în frecvență a radiației reflectate de corp, în fasciculul apare fenomenul de bătăi, fotodetectorul DF va înregistra o radiație luminoasă a cărei intensitate este modulată cu frecvența f_D . Unghiul θ_R reprezintă unghiul de incidență al fasciculului la suprafață, iar λ_0 reprezintă lungimea de undă a fasciculului laser.

Dacă semnalul amplificat de fotodetector este trimis la un convertor frecvență-tensiune (CFT), la ieșirea acestuia se obține o tensiune proporțională cu viteza receptorului, adică:

$$u(t) = k_L \cdot v_R(t), \quad (7.15)$$

unde k_L este o constantă a aparatului.

Semnalul de tensiune este achiziționat printr-o placă de achiziție, care printr-un convertor analog digital este transmis prin intermediul unui portal, către un calculator pe care se rulează programul AutoSignal.

7.4 Rezultate experimentale obținute prin măsurători cu vibrometrul laser

Măsurările cu vibrometrul laser au fost făcute având în vedere câteva aspecte ale tipului de măsurătoare. O primă problemă a fost legată de aplicarea benzii reflectorizante. Aceasta a trebuit să fie lipită pe probe astfel încât să fie evitate, pe cât posibil, lipirea ei în noduri. De asemenea, pentru a avea un semnal care să conțină și componentele vibrațiilor de răsucire, trebuie evitată linia mediană a probelor, aceasta fiind, pentru acest tip de vibrații, o linie nodală.

7.4.1 Determinarea caracteristicilor mecanice ale tablelor din oțel S 235 JR, sudate transversal. Rezultate obținute

Pentru determinarea valorilor experimentale, pentru modulul de elasticitate longitudinal și a modulului de elasticitate transversal, s-au folosit frecvențele date de spectrele Fourier obținute din semnalele achiziționate de la vibrometrul laser și preluate din ANEXA 10. Pentru calculul acestora s-au folosit ecuațiile (7.1) și (7.2).

Tabelul 7.7 Rezultatele experimentale ale determinării modulului de elasticitate longitudinal pentru table sudate din oțel S 235 JR

Nr probei	E_t N/m ²	f_1 Hz	E_1 N/m ²	f_2 Hz	E_2 N/m ²	f_3 Hz	E_3 N/m ²	f_4 Hz	E_4 N/m ²
1	2	111.7	2.31	269.2	1.77	587.5	2.19	992	2.29
2	2	130.2	2.05	342.8	1.87	749.5	2.33	1218	2.25
3	2	199.7	2.15	549.1	2.13	1083	2.16	1819.5	2.23
4	2	319	2.03	880.9	2.03	1734.7	2.05	2879.5	2.07

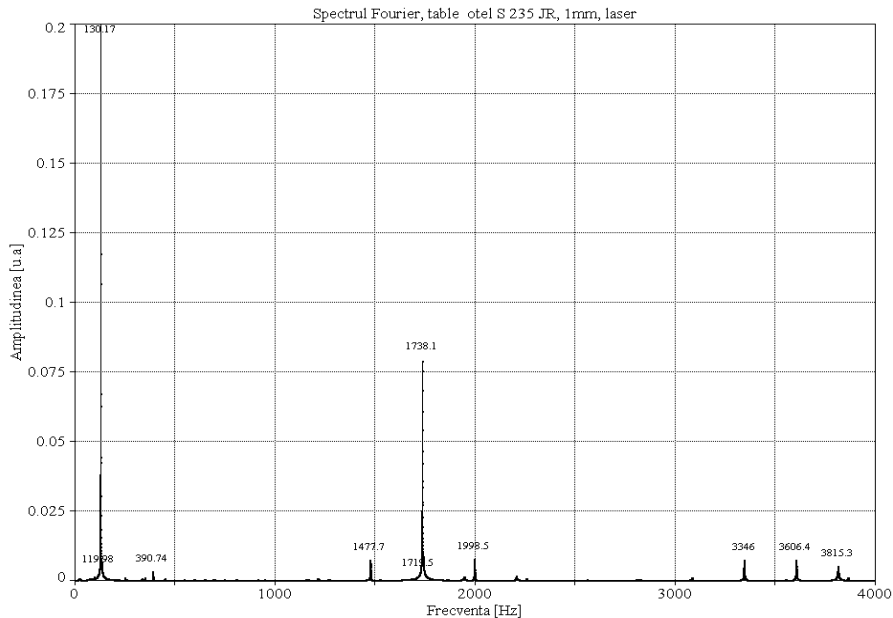


Figura 7.12 Spectrul Fourier a semnalului de la proba din oțel S 235 JR ,1mm

Tabelul 7.8 Rezultatele experimentale ale determinării modului de elasticitate transversal pentru table sudate din oțel S 235 JR

Nr probei	G_t N/m ²	f_1 Hz	G_1 N/m ²	f_2 Hz	G_2 N/m ²	f_3 Hz	G_3 N/m ²	f_4 Hz	G_4 N/m ²
1	7.69	349	9.68	702.9	9.82	1088.1	10.46	1418	9.99
2	7.69	390.7	7.96	809.9	8.56	1270	9.35	1738.1	9.85
3	7.69	598.8	8.29	1272	9.35	1894.9	9.22	2702	10.55
4	7.69	950.5	7.773	2064	9.163	3149	9.479	4315.7	10.02

7.4.2 Determinarea caracteristicilor mecanice ale tablelor din oțel inoxidabil sudate transversal. Rezultate obținute

Pentru determinarea valorilor experimentale a modului de elasticitate longitudinal și a modului de elasticitate transversal a probelor din oțel inoxidabil s-au folosit datele din ANEXA 11.

Tabelul 7.9 Rezultatele experimentale ale determinării modului de elasticitate longitudinal pentru table sudate din oțel inoxidabil

Nr probei	E_t N/m ²	f_1 Hz	E_1 N/m ²	f_2 Hz	E_2 N/m ²	f_3 Hz	E_3 N/m ²	f_4 Hz	E_4 N/m ²
1	1.93	123.78	2.05	371.31	2.43	712.37	2.33	1165.1	2.28
2	1.93	137.19	2.10	411.61	2.48	685.7	1.79	1235.3	2.13
3	1.93	155	1.93	464.9	2.29	774.86	1.65	1438	2.09
4	1.93	250.25	1.87	745.22	2.18	1536.3	2.41	2343	2.06
5	1.93	394.79	2.09	1080.1	2.06	2127.7	2.08	3509.5	2.07

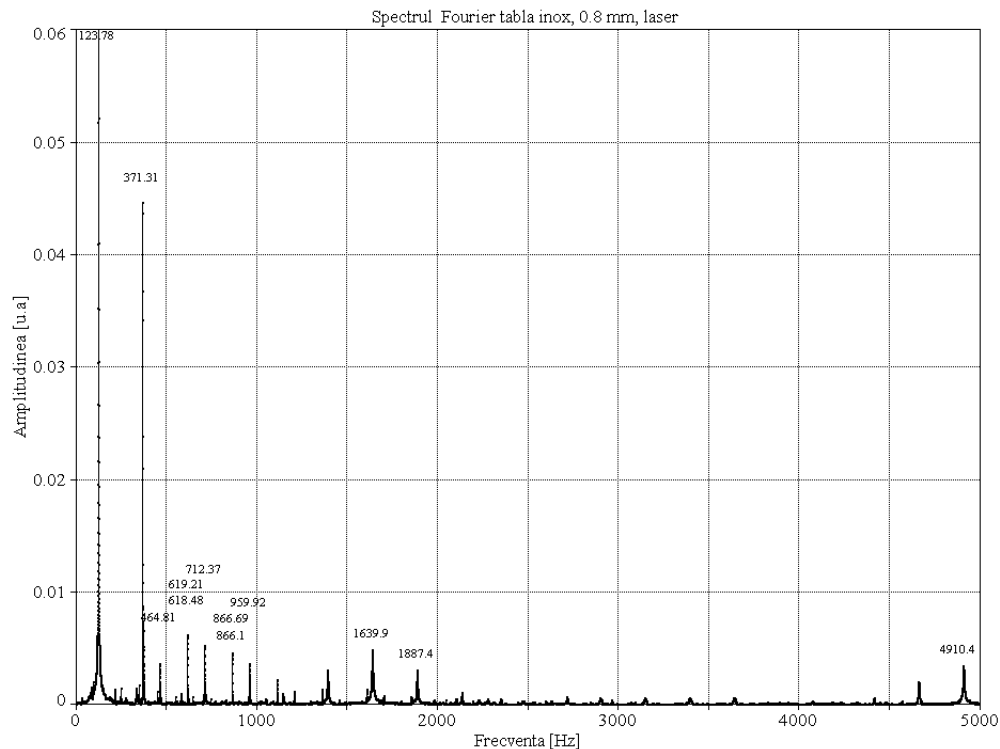


Figura 7.13 Spectrul Fourier a semnalului de la proba din oțel INOX de 0,8mm

Tabelul 7.10 Rezultatele experimentale ale determinării modului de elasticitate transversal pentru table sudate din oțel inoxidabil

Nr probei	G_t N/m ²	f_1 Hz	G_1 N/m ²	f_2 Hz	G_2 N/m ²	f_3 Hz	G_3 N/m ²	f_4 Hz	G_4 N/m ²
1	7.366	364.8	8.72	743.5	9.056	1165.1	9.883	1639	11
2	7.366	407.4	8.57	801	8.28	1267	9.21	1772.5	10.14
3	7.366	538	10.12	942	7.756	1740	11.76	2057.7	9.253
4	7.366	850	8.91	1758	9.53	2529	8.76	3612	10.06
5	7.366	1438	7.46	2931	7.75	4570.9	8.38	6225	8.75

7.4.3 Determinarea caracteristicilor mecanice ale tablelor aluminiu îmbinate prin sudare. Rezultate obținute

Pentru determinarea valorilor experimentale, pentru modulul de elasticitate longitudinal și a modului de elasticitate transversal a probelor din aluminiu s-au folosit frecvențele date de spectrele Fourier obținute din semnalele achiziționate de la vibrometrul laser și preluate din ANEXA 12. Pentru calculul acestora s-au folosit ecuațiile (7.1) și (7.2).

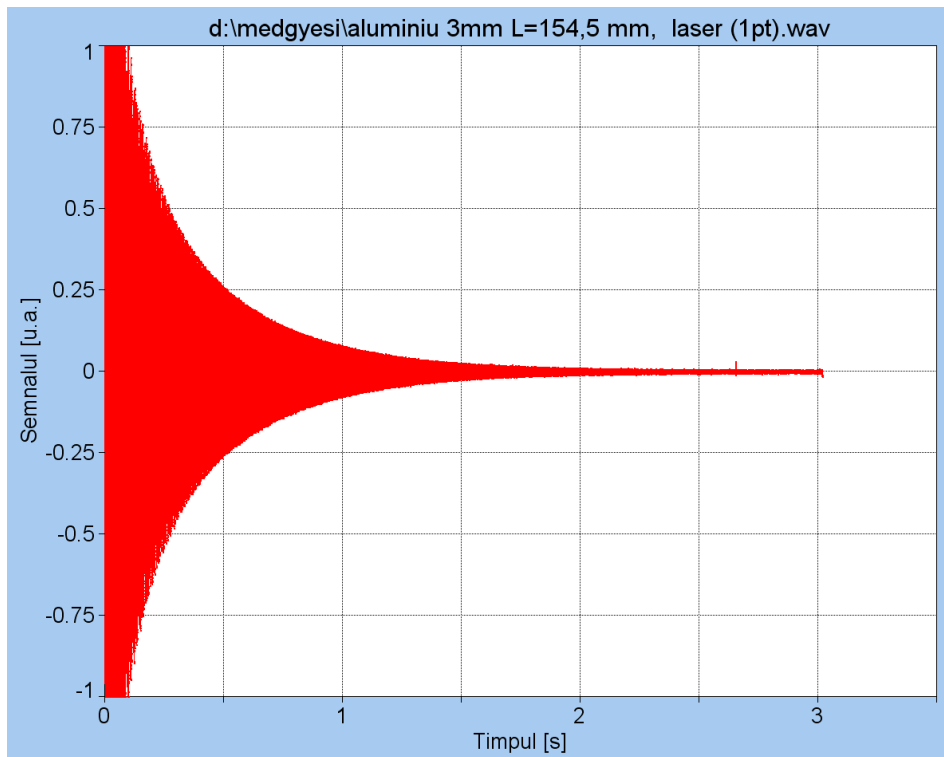


Figura 7.14 Semnalul înregistrat de la proba din aluminiu, 3mm, laser

Tabelul 7.11 Rezultatele experimentale ale determinării modului de elasticitate longitudinal pentru table sudate din aluminiu

Nr probei	E_t N/m ²	f_1 Hz	E_1 N/m ²	f_2 Hz	E_2 N/m ²	f_3 Hz	E_3 N/m ²	f_4 Hz	E_4 N/m ²
1	7.1	197.6	8.19	517.86	7.40	1032.7	7.66	1703.7	7.63
2	7.1	706.6	8.28	1835.6	7.36	2846.9	4.60	3752.5	2.93
3	7.1	679.1	7.85	1861	7.76	2856	4.75	3680	2.89

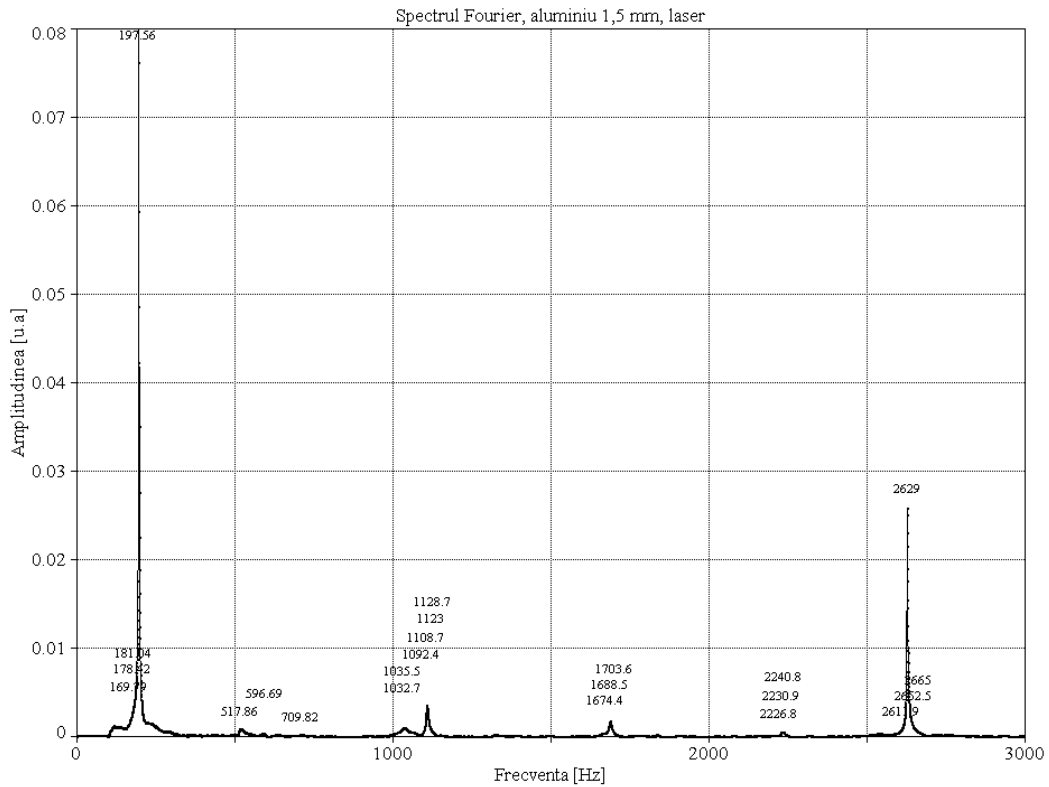


Figura 7.15 Spectrul Fourier a semnalului de la proba din aluminiu 1,5mm

Tabelul 7.12 Rezultatele experimentale ale determinării modului de elasticitate transversal pentru table sudate din aluminiu

Nr probei	G_t N/m ²	f_1 Hz	G_1 N/m ²	f_2 Hz	G_2 N/m ²	f_3 Hz	G_3 N/m ²	f_4 Hz	G_4 N/m ²
1	2.669	596.7	2.97	1128.7	2.66	1844.9	3.16	2612	3.56
2	2.669	799	2.71	1803	3.45	3189.9	4.80	3354	2.98
3	2.669	845.7	3.07	1837	3.62	2856	3.89	3395.8	3.1

8 DISEMINAREA REZULTATELOR, CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII

În acest capitolul se vor disemina principalele rezultate obținute pe calea analizei numerice, în urma modelării prin MEF a probelor realizate pentru investigațiile experimentale, și date prin programul ANSYS, dar și rezultatele obținute în urma investigațiilor experimentale. În primul subcapitol sunt prezentate rezultatele obținute în urma aplicării Metodei Analizei Modale în studiul comportării dinamice a probelor realizate. În cel de-al doilea subcapitol sunt diseminate rezultatele investigațiilor experimentale. În subcapitolul al treilea sunt prezentate concluziile finale ale studiilor efectuate în prezenta lucrare. Capitolul se încheie cu un paragraf în care sunt prezentate principalele contribuții personale.

8.1 Diseminarea rezultatelor analizei numerice

Despre importanța modelării dinamice prin Metoda Analizei Modale, a probelor destinate experimentărilor, s-a discutat și în paragraful 6.2. Trebuie subliniat faptul că analiza rezultatelor computaționale se poate integra cu analiza spectrală a semnalelor obținute pe cale experimentală, ducând, astfel, la posibilitatea identificării naturii modurilor de vibrații corespunzătoare fiecărei frecvențe din spectru. De asemenea, această analiză dă informații asupra comportării probei, mai exact, dă informații asupra validității aplicării formulelor de calcul ale modurilor de elasticitate, formule bazate pe modelul de bară Euler-Bernoulli.

8.2 Diseminarea rezultatelor investigațiilor experimentale

În decursul dezvoltării ingineriei materialelor s-au depus mari eforturi pentru crearea de metodologii pentru caracterizarea elastică a materialelor. Astfel de metodologii sunt de obicei clasificate în două categorii: abordări bazate pe teste statice și abordări bazate pe teste dinamice. Abordările statice sunt în mare parte bazate pe măsurarea directă a tensiunilor și a deformațiilor suferite de probe standardizate și care corespund numai pentru anumite încercări mecanice (tracțiune, compresie, îndoire, torsiune, etc.). Modulul de elasticitate longitudinal (Young) și modulul de elasticitate de forfecare (transversal) sunt determinați din panta liniară a zonei din curba de tensiune-deformație, în timp ce coeficientul lui Poisson este obținut prin măsurarea ariei transversale ale probei în timpul unei îndoiri sau a unui test de tracțiune. Proprietățile elastice ale materialelor izotrope se determină pe baza unor norme, iar aceste norme recomandă utilizarea de specimene de dimensiuni și formă standardizate. În cazul unor materiale compozite, determinarea caracteristicilor mecanice implică analiza unui număr mare de exemplare și, în consecință, obositoare și consumatoare de timp. Cu toate acestea, rezultatele obținute dau, adesea, rezultate slabe pentru anumite proprietăți, cum ar

fi modulul de forfecare. Metodologiile mai sus-menționate necesită, de obicei, o gamă semnificativă de date tensiune-deformație și determinarea valorilor medii utile pentru determinarea caracteristicilor mecanice amintite. Aceasta implică în mod necesar încercări distructive, astfel că deformarea probei trebuie făcută și măsurată până când eşuează, adică până când se deformează plastic sau se rupe. În orice caz, proba este distrusă și nu mai poate fi disponibilă pentru testare sau alte scopuri suplimentare. În comparație cu abordările statice, abordările dinamice au avantajul de a permite utilizarea unor probe cu o varietate mare de forme și dimensiuni și furnizează, prin metode nedistructive, măsurători foarte precise. Abordările dinamice pot fi clasificate în două grupe: metode bazate pe propagarea undelor și metode bazate pe teste de vibrații (sau de rezonanță).

Pentru cercetarea la nivel mondial, există un mare interes în domeniul măsurării proprietăților elastice ale materialelor, în special în ceea ce privește materialele noi și complexe pentru care metodele clasice de determinare sunt consumatoare de timp, costisitoare de resurse și, în unele cazuri, nepotrivite.

În această lucrare s-a introdus o abordare nouă, de integrare a calculului computațional, bazat pe Analiza Modală, cu analiza spectrală a semnalelor de vibrații, integrare care poate fi folosită pentru determinarea proprietăților materialelor izotrope sau anizotrope. În această abordare identificarea tuturor constantelor elastice poate avea loc simultan, cu un singur experiment, și fără a deteriora proba.

Rezultatele obținute din determinările experimentale, pentru câteva probe, sunt discutate în cele ce urmează. Pentru celelalte probe, rezultatele sunt date în ANEXA 13 și ANEXA 14.

În figura 8.1 sunt reprezentate grafic valorile modulului de elasticitate longitudinal E , calculate pentru frecvențele primelor cinci moduri de vibrații de încovoiere, determinate pe baza analizei spectrale. Prin E-EB s-a notat modulul de elasticitate E determinat cu frecvențele din AM aplicând formula dedusă pe baza modelului de bara Euler Bernoulli. Prin E-M s-a notat modulul de elasticitate E determinat pe baza frecvențelor obținute din Spectrul Fourier a semnalului înregistrat cu microfonul, iar cu E-L s-a notat modulul de elasticitate E determinat pe baza frecvențelor obținute din Spectrul Fourier a semnalului înregistrat cu Vibrometrul Laser aplicând formula (7.1). Proba este din oțel S 235 JR cu grosime 0,8 mm.

În figura 8.2 sunt reprezentate abaterile (variațiile) valorilor E-EB, E-M și E-L față de valoarea E_t cu care s-a făcut modelarea dinamică prin MAM.

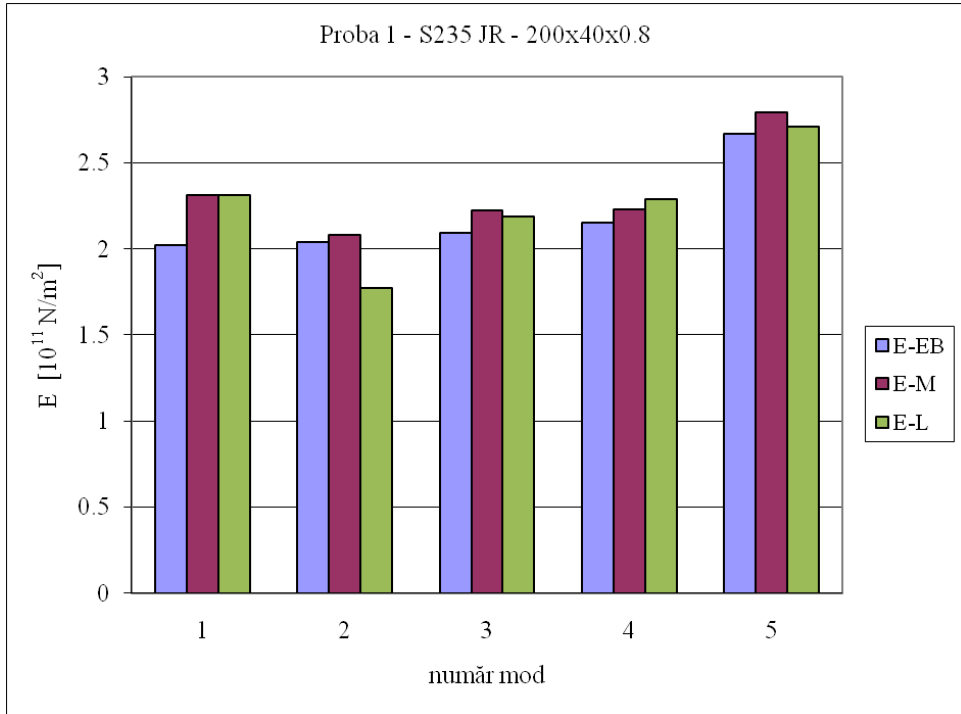


Figura 8.1. Modulul de elasticitate E pentru primele 5 moduri de încovoiere

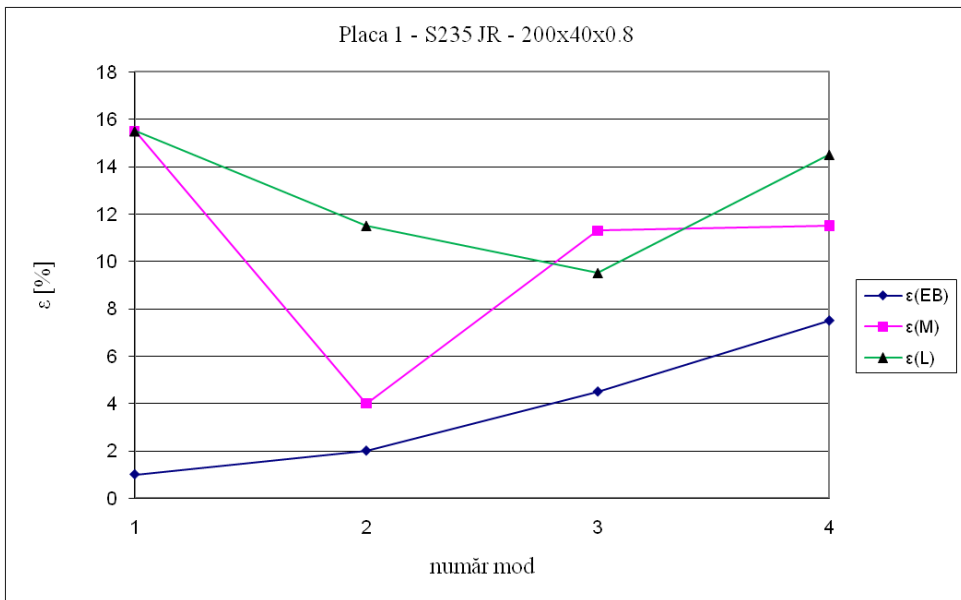


Figura 8.2 Abaterile valorilor experimentale ale modulului de elasticitate E pentru proba 1 din oțel S 235 JR

În figura 8.3 sunt reprezentate valorile E-EB, E-M și E-L pentru proba din oțel S 235 JR de grosime 2.5 mm, dar numai pentru primele 4 moduri.

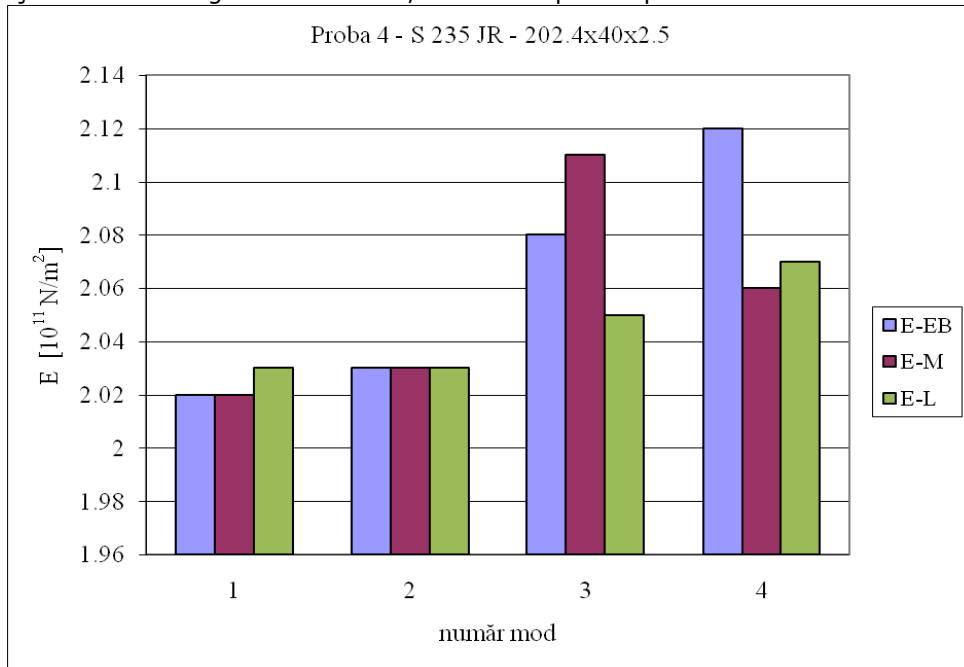


Figura 8.3. Modulul de elasticitate E pentru primele 4 moduri de încovoiere

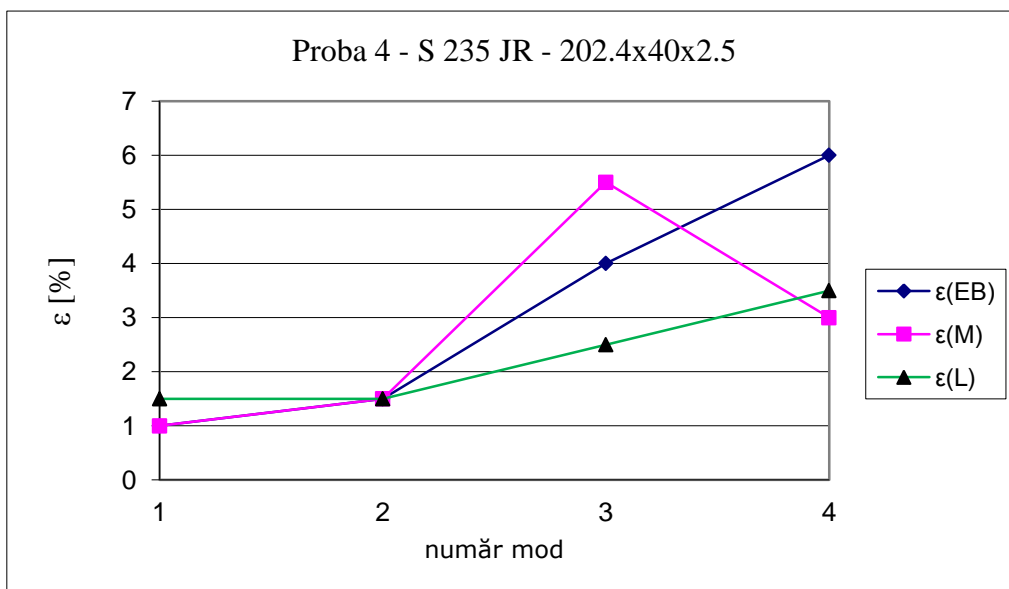


Figura 8.4 Abaterile valorilor experimentale ale modulului de elasticitate E pentru proba 4 din oțel S235 JR

În figura 8.5 sunt reprezentate valorile modurilor E-EB, E-M și E-L calculate pentru frecvențele primelor patru moduri de încovoiere ale unei probe din oțel inoxidabil EN-X5CrNi 18-20 cu grosimea de 0.8 mm.

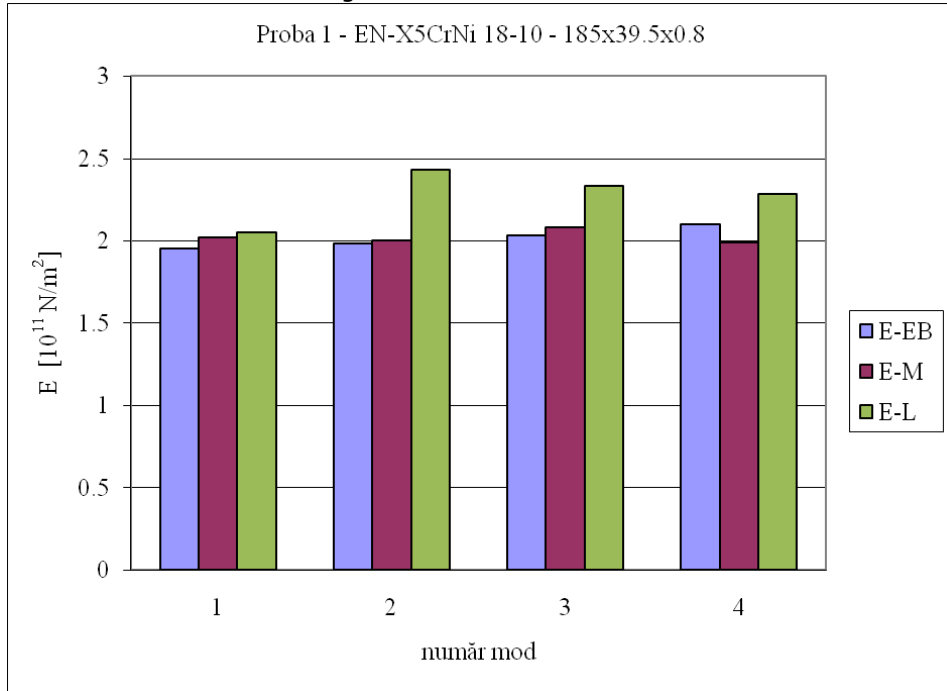


Figura 8.5. Modulul de elasticitate E pentru primele 4 moduri de încovoiere

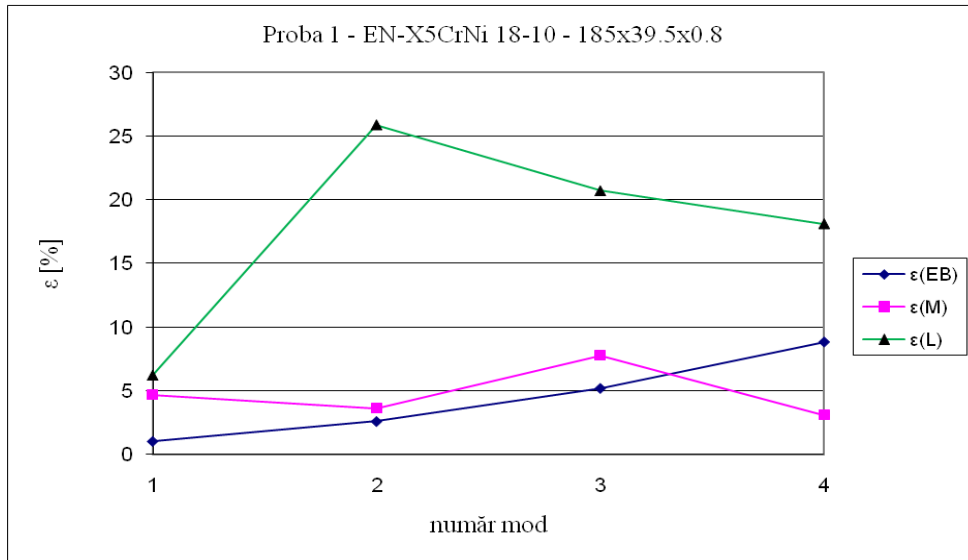


Figura 8.6 Abaterile valorilor experimentale ale modulului de elasticitate E pentru oțel inoxidabil EN-X5CrNi 18-20 cu grosimea de 0.8 mm

În figura 8.7 sunt reprezentate valorile modurilor de elasticitate E-EB, E-M și E-L calculați pentru primele 4 frecvențe ale modurilor de încovoiere ale unei probe de aluminiu.

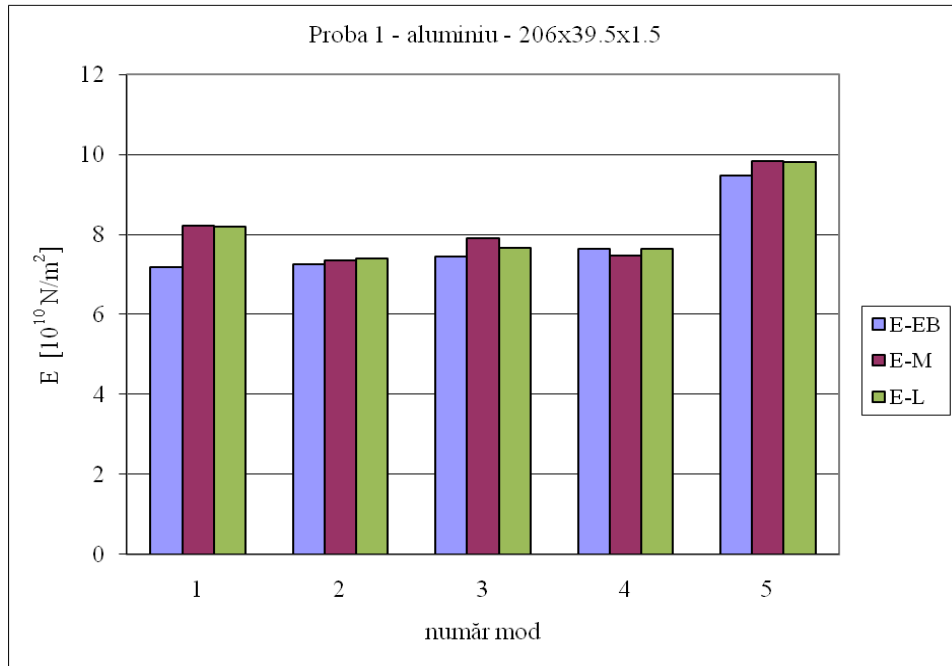


Figura 8.7. Modulul de elasticitate E pentru primele 4 moduri de încovoiere

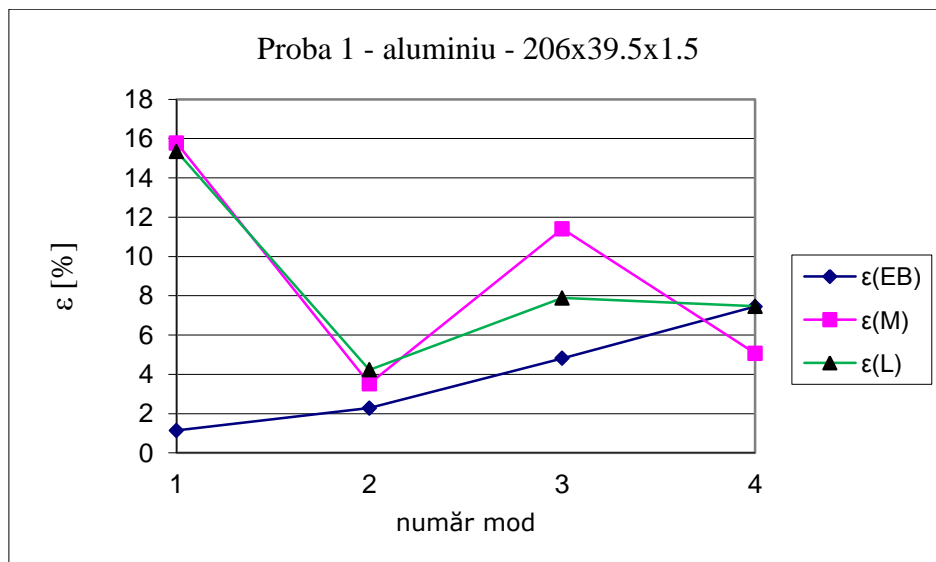


Figura 8.8 Abaterile valorilor experimentale ale modului de elasticitate E pentru proba din aluminiu de 1.5 mm grosime

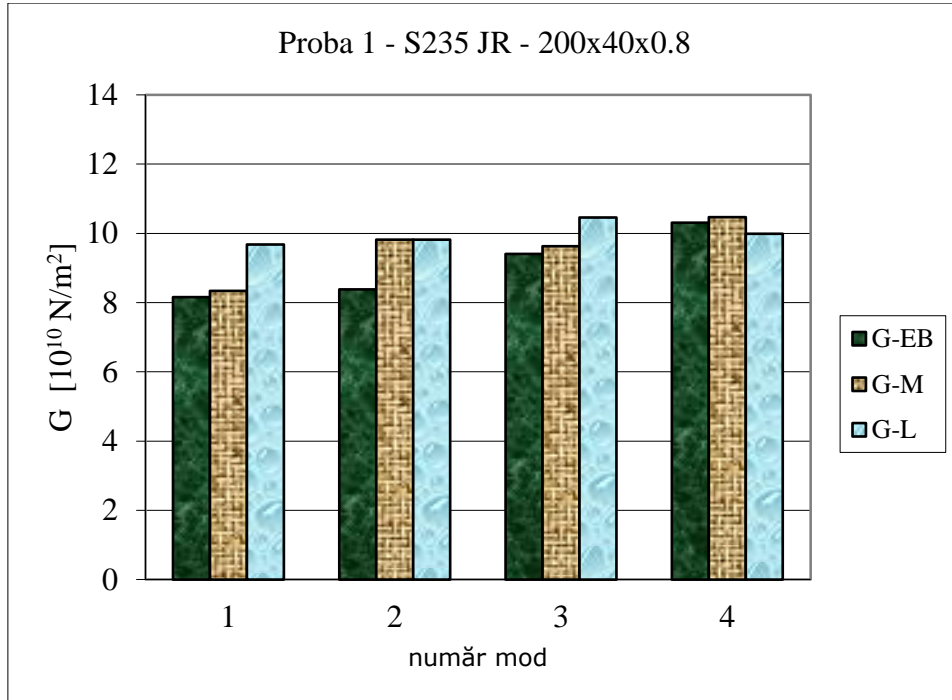


Figura 8.9. Modulul de elasticitate G pentru primele 4 moduri de torsiune

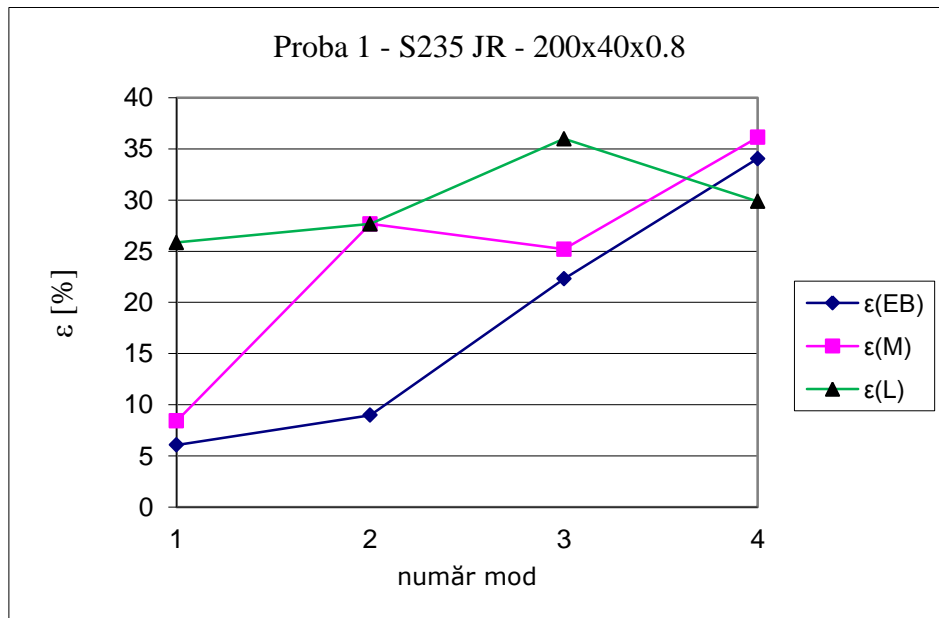


Figura 8.10 Abaterile valorilor experimentale ale modulului de elasticitate G pentru proba 1, S 235 JR de 0,8 mm grosime

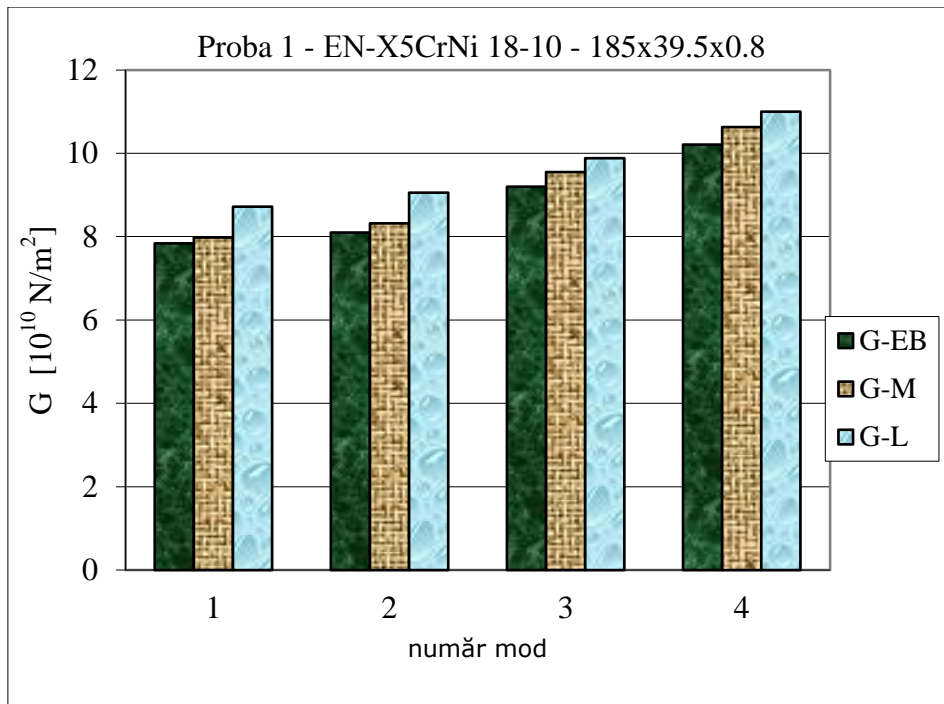


Figura 8.11. Modulul de elasticitate G pentru primele 4 moduri de torsiune

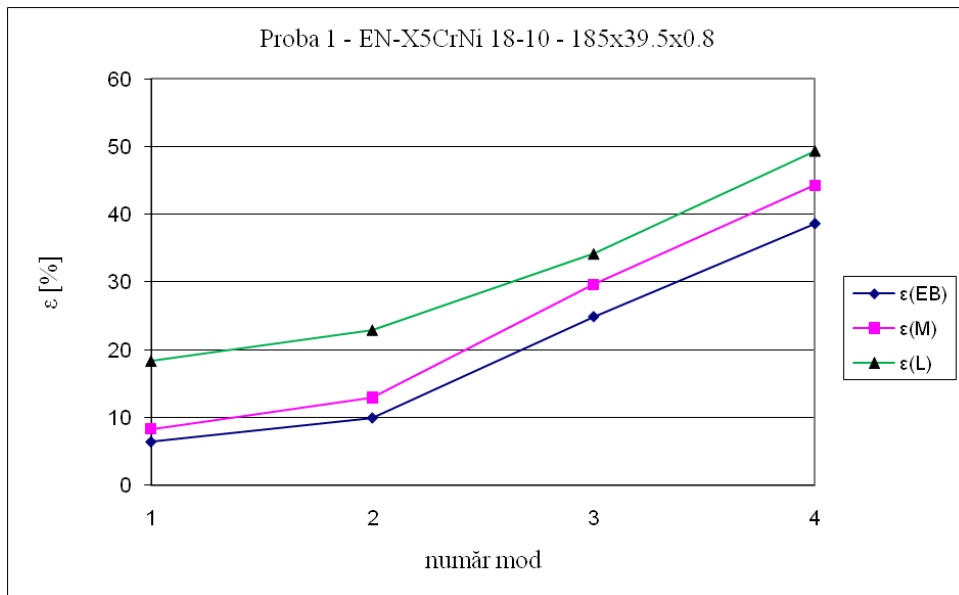


Figura 8.12 Abaterile valorilor experimentale ale modulului de elasticitate G pentru proba 1, inox, EN-X5CrNi 18-10 de 0,8 mm grosime

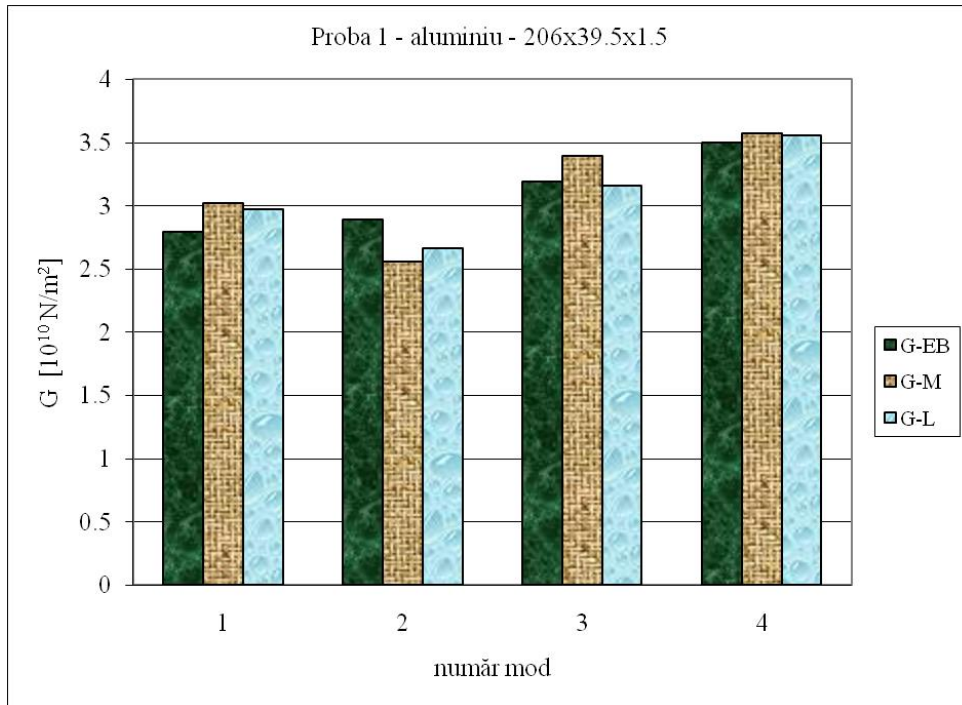


Figura 8.13. Modulul de elasticitate G pentru primele 4 moduri de torsiune

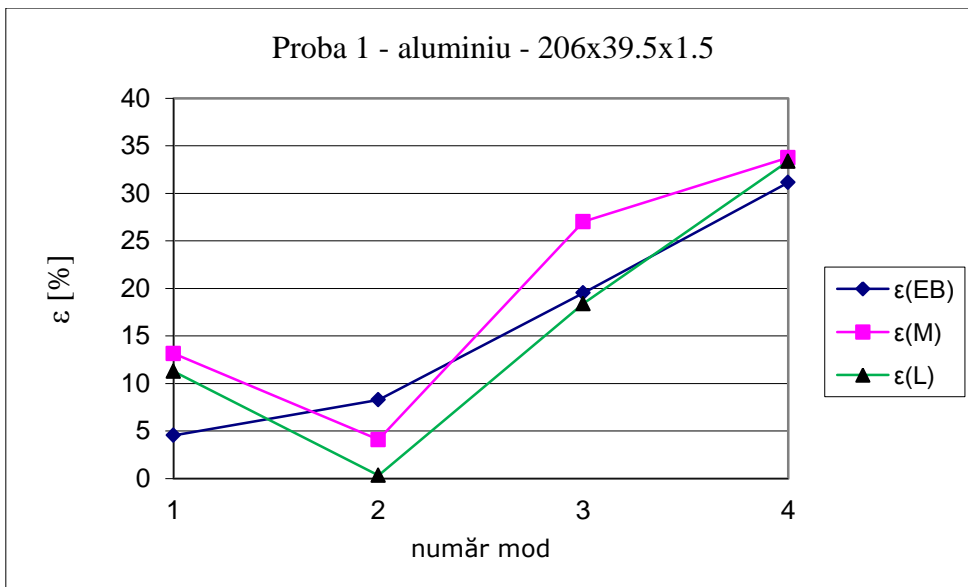


Figura 8.14 Abaterile valorilor experimentale ale modulului de elasticitate G pentru proba 1, aluminiu de 1,5 mm grosime

Determinarea coeficientului lui Poisson pentru probele de oțel S 235 JR, oțel inoxidabil EN-X5CrNi 18-10 - 201x39x2 și aluminiu laminat la rece, din spectrele obținute prin prelucrarea semnalelor înregistrate prin microfon s-a făcut aplicând formula (7.3). Valorile sunt date în tabelele ce urmează.

Tabelul 8.1. Valorile coeficientului lui Poisson pentru probe din oțel S 235 JR

Nr. mod	Proba 1			Proba 3			Proba 4		
	S 235 JR 200x40x0.8			S 235 JR 201x40x1.5			S 235 JR 202.4x40x2.5		
	Ex10 ¹¹	Gx10 ¹⁰	v	Ex10 ¹¹	Gx10 ¹⁰	v	Ex10 ¹¹	Gx10 ¹⁰	v
1	2.31	8.34	0.38	2.14	6.89	0.55	2.02	8.79	0.15
2	2.08	9.82	0.059	2.15	8.49	0.26	2.03	9.15	0.11
3	2.22	9.63	0.15	2.16	9.28	0.16	2.11	8.95	0.18
4	2.23	10.47	0.064	2.19	10.32	0.061	2.06	10.16	0.014

Tabelul 8.2. Valorile coeficientului lui Poisson pentru probe din oțel INOX

Nr. mod	Proba 1			Proba 2			Proba 4		
	EN-X5CrNi 18-10 - 185x39.5x0.8			EN-X5CrNi 18-10 - 197.5x41x1			EN-X5CrNi 18-10 - 201x39x2		
	Ex10 ¹¹	Gx10 ¹⁰	v	Ex10 ¹¹	Gx10 ¹⁰	v	Ex10 ¹¹	Gx10 ¹⁰	v
1	2.02	7.98	0.27	2.1	8.28	0.27	1.84	7.72	0.22
2	2	8.33	0.22	2.01	8.2	0.23	1.86	8.0	0.16
3	2.08	9.56	0.11	2.21	9.8	0.13	2.11	7.78	0.35
4	1.99	10.63	0.034	2.18	10.12	0.08	2.11	9.6	0.09

Tabelul 8.3. Valorile coeficientului lui Poisson pentru probe din aluminiu

Nr. mod	Proba 1			Proba 2			Proba 3		
	Aluminiu 206x39.5x1.5			Aluminiu 154.5x75x3			Aluminiu 155.5x75x3		
	Ex10 ¹⁰	Gx10 ¹⁰	v	Ex10 ¹⁰	Gx10 ¹⁰	v	Ex10 ¹⁰	Gx10 ¹⁰	v
1	8.22	3.02	0.36	8.3	3.28	0.26	7.87	3.17	0.24
2	7.35	2.56	0.43	8.09	3.68	0.09	7.75	3.81	0.02
3	7.91	3.39	0.16	5.29	4.82	0.45	4.97	4.79	0.48
4	7.46	3.57	0.04	2.94	3.14	0.53	2.9	3.05	0.53

Trebuie remarcat faptul că rezultatele sunt obținute în urma unui set de minimum trei măsurători consecutive, pentru fiecare probă și pentru fiecare tip de măsurătoare, oferind astfel o mediere necesară comparației (arătând caracterul repetitiv al măsurătorii). De asemenea, trebuie precizat faptul că cele două tipuri de măsurători au avut nevoie de două standuri compuse dintr-o aparatură minimală. Sunt ușor de manevrat și prin urmare putând fi transportate la locurile în care sunt necesare măsurătorile. Caracterul nedistructiv al acestor tipuri de măsurători, conferă posibilități repetitive ale acțiunii de măsurare. Rezultate parțiale ale acestor cercetări au fost publicate în lucrările [133] și [134].

8.3 Concluzii finale

S-a realizat un studiu bibliografic riguros și original pentru identificarea și înțelegerea limitărilor oferite de metodele noi pentru determinarea caracteristicilor mecanice ale unor table subțiri, acoperite prin galvanizare sau prin pulverizare mecanică sau îmbinate prin sudare.

Din analiza unui număr mare de standarde, în special cele date ASTM, pentru determinarea modurilor de elasticitate (modulul de elasticitate Young, modulul de elasticitate de forfecare și coeficientul lui Poisson) s-a concluzionat că toate aceste metode conduc la rezultate foarte bune folosind epruvete standardizate, ceea ce duce la risipă de timp și de materiale, chiar dacă măsurătorile au un caracter nedistructiv.

Un alt aspect sesizat în documentarea bibliografică, cu referire în mod special la metodele bazate pe teste de vibrații, este lipsa de informații cu privire la recunoaștere, dintr-un spectru de semnal analizat, a frecvențelor care corespund modurilor proprii de vibrații de încovoiere, respectiv modurilor proprii de vibrații de răsucire. Orice metodă de achiziție și de analiză a unui semnal va conține informații atât despre frecvențele de încovoiere cât și despre frecvențele de răsucire, cu atât mai mult dacă testele de vibrații sunt bazate pe excitații impulsive.

Tocmai din acest ultim motiv, în această lucrare s-au pus bazele determinării modulului de elasticitate Young, modulului de elasticitate de forfecare și coeficientului lui Poisson pe baza unei singure determinări experimentale. Acest fapt nu este de loc în contradicție cu verificarea repetabilității măsurătorilor, ci presupune folosirea aceluiași stand, aceeași probă, iar semnalul înregistrat este folosit pentru determinarea celor trei moduli.

Evident că în aceste condiții, trebuia găsită o modalitate prin care, în urma analizării spectrale a semnalului înregistrat, să se poată decela natura modului căruia îi corespunde fiecare frecvență din spectru.

Modelarea cu Metoda Elementelor Finite (MEF) a probelor pregătite pentru experimentare și aplicarea Metodei Analizei Modale (MAM), metodă implementată într-un pachet al softului ANSYS, dă posibilitatea determinării, nu numai a frecvențelor proprii ale acestor probe, dar și forma modurilor proprii ale acestora.

Desigur, modelarea și analiza dinamică prin metoda MAM presupune intrarea unor date în legătură cu caracteristicile mecanice care fac obiectul acestui studiu, dar și a datelor legate de forma geometrică a probelor. Trebuie subliniat faptul că datele cu privire la caracteristicile mecanice sunt introduse și utilizate în MAM doar pentru a obține informații în legătură cu forma modurilor proprii, natura acestora și ordinea în care se repetă.

Se constată faptul că modurile proprii de încovoiere și modurile proprii de răsucire nu sunt alternante succesiv, adică după un mod propriu de încovoiere nu urmează întotdeauna un mod propriu de răsucire, și invers, după un mod propriu de răsucire nu urmează întotdeauna un mod propriu de încovoiere.

Se constată, de asemenea, că această alternanță depinde mai degrabă de dimensiunile geometrice ale probelor decât de natura materialului. Ba, mai mult, pentru unele probe, de la o anumită frecvență proprie, apar și moduri de încovoiere în celălalt plan.

O altă concluzie desprinsă din analiza numerică a probelor realizate, prin MAM, este faptul că modelul de bară Euler Bernoulli este validat doar pentru primele moduri proprii și acestea corespunzătoare doar vibrațiilor de încovoiere. Concluzia este general valabilă și pentru alte tipuri de epruvete care pot fi asimilate barelor.

Se constată faptul că, pentru frecvențe mari, modurile proprii nu mai pot fi considerate ca fiind moduri de încovoiere sau moduri de răsucire, ci corespund unor moduri proprii de placă.

Din punctul de vedere al cercetărilor experimentale s-a constatat că pentru înregistrarea unui semnal vibratoriu, produs prin excitație impulsivă a probelor, cele două metode propuse – cea bazată pe achiziția semnalului vibroacustic printr-un microfon condensator și cea bazată pe achiziția unui semnal de vibrații prin

intermediul unui Vibrometru Laser, folosind efectul Doppler-, sunt metode foarte simple de implementat și nu necesită standuri complicate.

Rezultatele măsurătorilor sunt repetabile ceea ce demonstrează faptul că metodele alese pentru achiziția de semnale sunt bune.

În analiza rezultatelor obținute pentru determinarea modulului de elasticitate longitudinal, prin achiziția de semnale cu microfonul, se constată că acestea sunt bune și foarte bune pentru frecvențele corespunzătoare primelor moduri de vibrații de încovoiere (modurile joase). Pentru frecvențele înalte (moduri superioare), unde și formele modale sunt distorsionate și se transformă în moduri de placă, rezultatele nu sunt bune. Abaterile față de valorile teoretice sunt foarte mari.

Concluzii relevante s-ar putea obține dacă s-ar face o analiză a comportării reologice a oțelului S 235 JR, a oțelului inoxidabil EN-X5CrNi 18-10 - 201x39x2, sau a aluminiului laminat la rece, având în vedere că măsurătorile se fac în regim dinamic, și prin urmare, ar trebui calculați modulii de elasticitate dinamici. Desigur, comportarea, mai ales a oțelurilor, este elastică, amortizările sunt neglijabile, și această componentă nu este semnificativă.

Abateri mari ale modulii de elasticitate longitudinal determinat experimental față de valorile teoretice, pentru probele din oțel S 235 JR, probele din oțel inoxidabil și pentru probele de aluminiu, se obțin și pentru frecvențele modurilor joase. Aceste abateri se pot explica prin faptul că dimensiunile geometrice ale probelor nu au fost măsurate cu aparatură de mare precizie. Realizarea acestor probe s-au făcut în regim de laborator didactic. Materialul de adaos nu a fost luat în calcul, atunci când s-a folosit formula (7.1) sau (7.2). Caracteristicile mecanice teoretice, atât ale materialului de bază cât și ale materialului de adaos sunt estimative, luate în baza unor standarde, mai degrabă date de programul ANSYS.

Semnalele achiziționate prin microfon au conținut întotdeauna, în spectrele analizate, atât frecvențe ale modurilor de încovoiere cât și frecvențe ale modurilor de răsucire.

Semnalele achiziționate prin Vibrometrul Laser au fost deficitare în componentele spectrale corespunzătoare modurilor de răsucire. Acest fenomen a putut fi eliminat prin lipirea benzii reflectorizante la o distanță mai mare față de mijlocul probei dreptunghiulare, aceasta fiind o linie nodală, și prin urmare vitezele punctelor fiind nule, semnalul nu conținea informații relativ la deplasări de rotație.

Metodele dezvoltate în această lucrare sunt totuși sensibile, fapt ce a reieșit din rezultatele obținute prin analiza modificării rigidității mecanice a unei placi de oțel, prin zincare, dar și din aplicarea metodei de determinare a modulului de elasticitate longitudinal a unui material folosit pentru acoperirea prin pulverizare metalică a unei table din oțel.

Ca o concluzie finală se poate aprecia faptul că metodele propuse pentru investigarea caracteristicilor de material a unor table acoperite prin zincare, prin pulverizare metalică sau îmbinate prin sudare sunt bune, pot fi în continuare perfecționate, dar mai ales pot fi folosite în determinarea caracteristicilor amintite în domeniul materialelor noi.

8.4 Principalele contribuții personale

Lucrarea este dedicată unei tematici de actualitate și de mare importanță științifică, înscriindu-se în problematica ridicată de dezvoltarea spectaculoasă, din ultimii zeci de ani, în domeniul creării de noi tehnologii și materiale avansate.

Urmărind realizarea obiectivului general și a obiectivelor specifice rezultate din acesta, ca ținte în programul de desfășurare a cercetării doctorale, se pot menționa următoarele contribuții și realizări personale:

- Realizarea unor sinteze bibliografice cu referire la:
 - Proprietățile materialelor și a metodelor nedistructive pentru determinarea principalelor caracteristici de material;
 - Metode și procedee pentru obținerea îmbinărilor din table subțiri; o atenție specială fiind acordată procedeeelor de acoperire a tablelor subțiri, procedeeelor de lipire a tablelor subțiri, procedeeelor de sudare a tablelor subțiri și unui procedeu situat la limita dintre sudare și lipire denumit sudobrazare;
 - Abordarea legăturii matematice dintre mărimile ce caracterizează comportarea elastică a materialelor, în teoria clasică din rezistența materialelor, și rolul acelorași caracteristici de material în vibrațiile structurilor mecanice de tip bară;
 - Abordarea unitară a metodelor de analiză a semnalelor de vibrații, de la analiza prin serii Fourier a semnalelor continue periodice și până la analiza spectrală a semnalelor discrete pe baza Transformatei Fourier Rapidă (TFR), de la utilizarea efectului Doppler în achiziția semnalelor de vibrații și până la analiza spectrală a acestora utilizând metoda seriilor Prony;
- Sinteza bibliografică privind cele mai recente brevete și selectarea lor pe domeniul metodelor vibraționale privind caracterizarea elastică a materialelor izotrope;
- Realizarea probelor din table sudate din oțel de uz general S 235 RJ și probelor sudate din oțel inoxidabil EN-X5CrNi 18-10;
- Realizarea probelor din table de aluminiu, din table de oțel de uz general zincate și din table de oțel de uz general obținute prin acoperire cu pulberi metalice;
- Realizarea unui stand pentru teste și înregistrări de semnale vibroacustice având drept element sensibil (traductor) un microfon acustic cu condensator;
- Realizarea unui stand experimental pentru achiziția unor semnale de vibrații având drept traductor un vibrometru laser care are la baza fenomenul Doppler;
- Stabilirea unei metode noi pentru determinarea modulului de elasticitate longitudinal, modulului de elasticitate transversal și coeficientului lui Poisson care cuprinde următorii pași:
 - a) Modelarea cu MEF a probelor destinate măsurătorilor experimentale;
 - b) Analiza dinamică în ANSYS pentru determinarea frecvențelor proprii (de rezonanță) și a modurilor proprii;
 - c) Înregistrarea semnalului acustic sau semnalului de vibrație obținut prin achiziția prin intermediul unui microfon sau prin intermediul unui vibrometru laser;
 - d) Prelucrarea semnalului înregistrat utilizând Transformata Fourier Rapidă (TFR) și/sau metoda seriilor Prony pentru determinarea frecvențelor de rezonanță din semnalul înregistrat experimental;
 - e) Corelarea rezultatelor obținute în pașii b) și d) pentru a identifica natura modului de vibrație corespunzător fiecărei

frecvențe din semnal, știindu-se faptul că unui mod de vibrație de încovoiere îi corespunde modulul de elasticitate longitudinal, iar unui mod de vibrație de răsucire îi corespunde modulul de elasticitate transversal;

f) Calculul modulului de elasticitate longitudinal, a modulului de elasticitate transversal și a coeficientului lui Poisson pe baza unor formule deduse pentru acest scop.

- Stabilirea unei metode noi pentru determinarea modulului de elasticitate longitudinal, modulului de elasticitate transversal și coeficientului lui Poisson a unui material nou, cu caracteristici mecanice necunoscute, metodă bazată pe acoperirea cu acest material prin pulverizare (acoperire prin metalizare) a unei table dintr-un material cu caracteristici mecanice cunoscute, cele ale oțelului S 235 JR, folosind înregistrările unor semnale vibroacustice sau de vibrații, înainte de acoperire și după acoperire.

Rezultatele cercetărilor efectuate în perioada doctoranturii au fost valorificate într-un număr de 8 lucrări științifice publicate în volumele unor jurnale naționale sau internaționale sau în cadrul unor conferințe internaționale din țară și străinătate. Două lucrări au fost publicate în volumele unor conferințe internaționale cotate ISI Proceedings [133] și [134].

Concluziile și experiența acumulată pe parcursul stagiului de cercetări doctorale permit conturarea cercetărilor în următoarele direcții:

- Îmbunătățirea tehnicilor de achiziție și prelucrare a semnalelor de vibrații;
- Extinderea utilizării metodelor vibroacustice pentru determinarea caracteristicilor mecanice ale unor materiale noi, din următoarele categorii: materiale compozite; materiale inteligente; biomateriale; materiale din sinteza și procesarea pulberilor; materiale avansate cu proprietăți optice, electrice, magnetice termomecanice; materiale nanostructurate, micro și nanostructuri;
- Studii și cercetări privind determinarea caracteristicilor mecanice prin teste de vibrații sau vibroacustice asupra unor îmbinări obținute prin sudarea unor materiale disimilare.

BIBLIOGRAFIE

1. Ashby, M. F., and Jones, D. R. H., *Engineering Materials, An Introduction to Their Properties and Applications*, 3rd edition, Butterworth-Heinemann, Woburn, UK, 2005.
2. Askeland, D. R., and Phulé, P. P., *The Science and Engineering of Materials*, 5th edition, Nelson (a division of Thomson Canada), Toronto, 2006.
3. Baillie, C., and Vanasupa, L., *Navigating the Materials World*, Academic Press, San Diego, CA, 2003.
4. Flinn, R. A., and Trojan, P. K., *Engineering Materials and Their Applications*, 4th edition, John Wiley & Sons, New York, 1994.
5. Smith, W. F., and Hashemi, J., *Principles of Materials Science and Engineering*, 4th edition, McGraw-Hill Book Company, New York, 2006.
6. Ashby, M. F., Brechet, Y. J. M., Cebon, D., Salvo, L.,: Selection strategies for materials and processes, *Mater.Design* 25, 51–67 2004.
7. Groover, M. P.,: *Fundamentals of Modern Manufacturing* J.Wiley, New York 2002.
8. Saito, T., *Computational Materials Design*, Springer, Berlin, Heidelberg 1999.
9. Waterman, N. A., Ashby, M. F.,: *The Materials Selector*, 2nd edn. Chapman, London 1996.
10. M. Schwartz, M.,: *Encyclopedia of Smart Materials* J.,Wiley,New York 2002.
11. Britannica Editors: Materials. In: *Encyclopedia Britannica*, 2001 edn. (Britannica, Chicago 2001).
12. ASTM E1444-01 *Standard Practice for Magnetic Particle Examination*.
13. ASTM E309-95 *Standard Practice for Eddy-Current Examination*.
14. ASTM B594-02 *Standard Practice for Ultrasonic Inspection Examination*.
15. ASTM F1467-99 *Standard Guide for Use of an X-Ray Tester*.
16. ASTM E2001-98 *Standard Guide for Resonant Ultrasound Spectroscopy for Defect Detection*.
17. ASTM D4086-92a (1997) e1 *Standard Practice for Visual Evaluation*.
18. ASTM E165-02 *Standard Test Method for Liquid Penetrant Examination*.
19. Oprea, M., *Protecția anticorozivă*, Editura Eurostampa, Timișoara, 1998.
20. **Medgyesi, T.**, Popescu, M., Bereteu, L., Opreș, C., *Sustainable development problems for galvanized sheets and their joining*, *Annals of Oradea University*, 2011, Volume X, pp 4.92-4.97.
21. Magda, A. V., *Contribuții privind sudarea oțelurilor acoperite*, Editura Politehnica, Timișoara, 2009.
22. Bardac, D., Rânea, C., Paraschiv, D., *Tehnologii de procesare a suprafețelor*, Editura Junimea, Iași, 2005.
23. Mészár G. M., *Contribuții privind reducerea deformațiilor și tensiunilor la sudarea tablelor subțiri utilizate în construcția vagoanelor*, Editura Politehnica, Timișoara, 2010.
24. **Medgyesi, T.**, Popescu, M., Bereteu, L., Opreș, C., *Joining methods for thin sheets and coated thin sheets*, ModTech International Conference, Vadul lui Voda-Chisinau, Republic of Moldova, pp 633-636, 2011.

25. **Medgyesi, T.**, Popescu, M., Opris, C., Bran, I., Roşu, A., „*Problems when joining thin sheets*” Annals of the Oradea University, 2011, Volume X, pp 4.53-4.60.
26. Vişan, D., Tehnologii de sudare, Editura Universitas Galatiensis, Galaţi, 2008.
27. Burcă, M., Negoitescu, St., *Sudarea MIG/MAG*, Editura Sudura Timişoara, 2004.
28. Radu, D., Dietrich, M., *Tehnologia sudării electrice*, Litografia IPTV, Timişoara, 1980.
29. Gremesberger, G., ş.a. *Hegesztési kézikönyv*, Muszaki Könyvkiadó, Budapest, 1981.
30. Schorghuber, M., *Cold-Metal-Transfer Welding Process and Welding Installation*, US 2009/0026188 A1, Patent, 2009.
31. Talalaeva, R., Veinthala, R., Laansooa, A., and Sarkansb, M., *Cold metal transfer (CMT) welding of thin sheet metal products*, Estonian Journal of Engineering, 2012, 18, 3, pp. 243–250.
32. Zhang, C. Li. G., Gao, M., Yan, J., Zeng, X. Z., *Microstructure and process characterization of laser-cold metal transfer hybrid welding of AA6061 aluminum alloy*, Int J Adv Manuf Technol 2013, 68, pp. 1253–1260.
33. Trommer, G., *CMT (Cold Metal Transfer) and pulsed arc welding processes, separately used or in combination, in order to obtain an wide power range*, Sudura, 2010. XX: pp 25-29.
34. Rosado, T., Almeida, P., Pires, I., Miranda, R., and Quintino, L., *Innovations in Arc Welding*, 5º Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia, 2008, pp 1-18.
35. Hasselberg, T. P., *A Feasibility Study of “Cold Metal Transfer” – Gas Metal Arc Welding (CMT-GMAW) Nickel Base Superalloy Inconel 718™*, Master Thesis, Rensselaer Polytechnic Institute Hartford, Connecticut April 2009.
36. Kazmaier, J., Stieglbauer, W., and Egerland, S., “*CMT Advanced – An Arc Process Revolution*”, Sheet Metal Welding Conference XIV, Livonia, MI, May 11th -14th , 2010.
37. Hackl, H., and Himmelbauer, K., “*The CMT-Process– A Revolution in Welding Technology*”, IIW Doc. No. XII-1875-05, 2005,
38. ***** *Internal Investigation* FRONIUS International, Wels Austria (unpublished) 2010.
39. ******Controlled Gas Metal Arc Welding Processes an Assessment on Development*, PetroMinPipeliner, 2012, pp 34-49.
40. Bachorski, A., Painter, M. J., Smailes, A. J. and Wahab, M. A., *Finite element prediction of distortion during gas metal arc welding using the shrinkage volume approach*. J. Mater.Process. Technol., 1999, 92–93, 405–409.
41. Wu, C. S., Zhang, M. X., Li, K. H., and Zhang, Y. M., *Numerical analysis of double-electrode gas metal arc welding process*. Comput. Mater. Sci., 2007, **39**, 416–423.
42. Lancaster, J., F., *Metallurgy of welding, brazing and soldering*, George Allen & Unwin, London, 1970.
43. Kou, S., *Welding Metallurgy*, 2nd edition, New York, John Willy & Sons, Inc., 2002.
44. **Medgyesi, T.**, Popescu, M., Opris, C., Bereteu, L., Rosu, R., Micu, L., „*Making of flame brazed joints from the refrigeration mechanism of refrigerators used for food industry*”, 11 th International Conference

- „Research and Development in Mechanical Industry” RaDMI 2011 15-18 September, Sokobanja Serbia, 2011, pp 1162-1167.
45. **Medgyesi, T.**, Popescu, M., Bereteu, L., Rosu, R., Micu L., „Realizarea prin brazare a imbinarilor mecanismului de racire pentru instalatii de refrigerare pentru industria alimentara” Mecanizare in agricultura, Anul III, Nr. 3 (10), 2011, pp 126-133.
 46. **Medgyesi, T.**, Popescu, M., Opreș, C., *Difficulties encountered in performing dissimilar joints of sheets*, Annals of DAAAM, Vienna, Austria, Volume 22, ISSN 1726-967, 2011, pp 1243-1245.
 47. Czichos, H., Daum, W., *Measurement methods and sensors*. In: *Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau*, ed. by W. Beitz, K.-H. Grote Springer, Berlin, Heidelberg, 2004.
 48. *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, ed. by Buschow, K. H. J., Cahn, R. W., Flemings, M. C., Ilshner, B., Kramer, E. J., Mahajan, S., Elsevier, Amsterdam, 2001.
 49. Czichos H., (Ed.): *Materials*. In: *HÜTTE Das Ingenieurwissen* Springer, Berlin, Heidelberg, 2004.
 50. Bica, I., *Fizica solidului deformabil. Elasticitate și fotoelasticitate*, Tipografia Univ. din Timișoara ,1993.
 51. Pagnotta, L., “Recent progress in identification methods for the elastic characterization of materials,” *International Journal of Mechanics*, 2008, Vol. 2, n. 4, pp. 129-140.
 52. ASTM Standard E1876-09, “Standard test method for dynamic Young’s modulus, shear modulus, and Poisson’s ratio by impulse excitation of vibration,” ASTM International, West Conshohocken, PA, 2003, DOI: 10.1520/E1876-09, www.astm.org.
 53. Alfano, M., Pagnotta, L., “Determining the elastic properties of isotropic materials by modal vibration testing of rectangular thin plates,” *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 293, 2006, pp.426-439.
 54. Leissa, A. W., *Vibration of Plates* (NASA SP-160), US Government Printing Office, Washington, DC, 1969.
 55. Waller, M. D., *Vibration of free rectangular plates*. Proceedings of the Physical Society, London 72 (1949), pp. 277–285.
 56. Moussu, F., Nivoit, M., *Determination of Elastic Constants of Orthotropic Plates by a Modal Analysis/Method of Superposition*, *Journal of Sound and Vibration*, Volume 165, Issue 1, 22 July 1993, pp 149-163.
 57. Hwang, S. F., Chang, C. S., “Determination of elastic constants of materials by vibration testing,” *Composite Structures*, Vol. 49, 2000, pp 183-190.
 58. Deobald, L. R., Gibson, R. F., “Determination of elastic constants of orthotropic plates by modal analysis/Rayleigh-Ritz technique,” *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 124, 1988, pp. 269-283.
 59. SR EN ISO 6892-1:2010, *Materiale metalice. Încercarea la tracțiune. Partea 1: Metoda de încercare la temperatura ambiant*.
 60. Radeș, M., *Rezistența materialelor*, Editura Printech, București, 2004.
 61. Ashby, M., et al., *Materials: Engineering, Science, Processing and Design*, Elsevier, Amsterdam. 2007.
 62. Jenkins, C., and Khanna, S., *Mechanics of Materials*, Elsevier, Amsterdam, 2005.
 63. Meirovitch, L., *Fundamentals of Vibrations*, McGraw-Hill Book Company, New York, International Edition, McGraw-Hill International Editions, Singapore, 2003.

64. Meirovitch, L., *Principles and Techniques of Vibrations*, Prentice Hall, New Jersey, International Edition, Prentice-Hall International, London, 2000.
65. Meirovitch, L., *Dynamics and Control of Structures*, Wiley Interscience, New York, 1990.
66. Meirovitch, L., *Elements of Vibration Analysis*, Second Edition, McGraw-Hill Book Company, New York, International Student Edition 1986.
67. Rao, S. S., *Mechanical Vibrations*, 3rd ed., Addison Wesley, Reading, MA, 1995.
68. Thomson W. T., *Theory of Vibration with Applications*, Prentice-Hall Englewood Cliffs, NJ, 1972; 4th ed., Stanley Thornes Publ., Cheltenham, 1998.
69. Timoshenko, S., Young D. H., and Weaver, W., *Vibration Problems in Engineering*, 5th ed., Wiley, New York, NY 1990.
70. Ewins, D. J., *Modal Testing. Theory, Practice and Applications*, 2nd ed., Research Studies Press, Taunton, 2000.
71. Maia, N. M. M., and Silva, J. M. M., *Theoretical and Experimental Modal Analysis*, Research Studies Press, Taunton, 1997.
72. Radeş, M., *Vibrații mecanice*, Editura Printech, București, 2008.
73. Bereteu, L., Smicală, I., *Vibrații mecanice*, Editura Mirton, Timișoara 1998.
74. Cooley, J. W., and Tukey, J. W., *An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series*. *Mathematics of Computation*, 19:297-301, 1965.
75. Hauer, J. F., et al. *Initial Results in Prony Analysis of Power System Response Signals* IEEE Transactions on Power Systems, 1990, 5, 1, pp.80-89.
76. Baron de Prony, Gaspard-Clair-Francois-Marie Riche, *Essai experimental et analytique sur les lois de la Dilatabilite des fluides elastiques et sur celles de la Force expansive de la vapeur de l'eau et de la vapeur de l'alkool, `a differerentes temperatures.*, *J. de l'Ecole Polytechnique*, 1, 1795, pp. 24-76.
77. Stoica, P., Moses, R., *Introduction to Spectral Analysis*, Englewood Cliffs, NJ, Prentice Hall, 2000.
78. Batenkov, D., Sarg, N., Yomdin, Y., *Algebraic reconstruction of piecewise-smooth functions*, *Math. Comput.*81 (2012), pp. 277-318.
79. Batenkov D., and Yomdin, Y., *On the accuracy of solving confluent Prony systems*, preprint, 2012.
80. Martarelli M., *Exploiting the Laser Scanning Facility for Vibration Measurements*, Ph.D, University of London, 2001.
81. Uehan, F., *Development of Non-Contact Vibration Measuring System for Inspection of Seismic Damage to Railway Structures*, The 14th World Conference on Earthquake Engineering October 12-17, Beijing, China, 2008.
82. Corporation, M., *Microsoft Encarta 2006*, M. Corporation, Editor. 2006.
83. Cioara, T., G., Simoiu, D., Tocarciuc, A., Tirdea, A., Caplescu., C., *Resonant vibration induced in a flue structure with a heat exchanger. Case study*. *Scientific Bulletin of the "Politehnica" University of Timisoara*, 2005. 50(64): p. 255-258.
84. Cioara, T., G., Cires, I., Grama, A., Rosca, I., Simoiu, D., Tocarciuc, A., *In situ mass balancing method for store yielding machine with bucket wheel*. *Scientific Bulletin of the "Politehnica" University of Timisoara*, 2004.
85. Hrennikoff, A., *Solution of problems of elasticity by the Frame-Work Method*. *ASME Journal of Applied Mechanics*, 1941. 8: p. A619-A715.

86. Strang, G., Fix, G., *An Analysis of The Finite Element Method*, ed. P. Hall. 1973.
87. Zienkiewicz, O., C., Taylor, R., L., Zhu, J., Z. , *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*, ed. Butterworth-Heinemann. 2005.
88. Rao S.S., *The Finite Element Method in Engineering, Butterworth Heinemann in an imprint of Elsevier*, 2011.
89. Doebling, S., W., Farrar, C., R., Prime, M., B. , *A Summary Review of vibration-based damage identification methods*. 1998, Los Alamos National Laboratory under auspices of United States Department of Energy. p. 34.
90. Bereteu, L., Tocarciuc, A., Vigaru, C., *The effect of small structural modification on modal parameters*. Scientific Bulletin of the "Politehnica" University of Timisoara, 2005. 50(64): p. 41-46.
91. Damir, A., N., Elkhatib, A., Nassef, G., *Prediction of fatigue life using modal analysis for Grey and Ductile Cast Iron*. International Journal of Fatigue, 2007. 29: p. 499-507.
92. Gupta, A., Thakur, S., *Fatigue Life of Aluminum Beams Under Random Vibration*. Proceedings of 19th International Modal Analysis Conference, 2001: p. 1737-1741.
93. Bedewi, N., E., Kung, D., N. , *Effect of fatigue loading on the modal properties of composite structures and its utilization for prediction of residual life*. Composite Structures, 1997. 37(3/4): p. 357-371.
94. Johansen, S., *Vehicle Fatigue Life Estimation Based on Modal Analysis*. Proceedings of 12th International Modal Analysis Conference,, 1994: p. 1454-1460.
95. Shang, D., G., Barkley, M., E., Wang, Y., Lim, T.,C. , *Effect of fatigue damage on dynamic response frequency of spot-welded joints*. International Journal of Fatigue, 2003. 25: p. 311-316.
96. Simon, D., Golinval, J., C. , *Dynamic Stress and Fatigue Life Prediction Using Modal Testing and Model Correlation*. Proceedings of 14th International Modal Analysis Conference, 1996: p. 423-428.
97. Salawu, O., S., Williams, C., *Bridge assessment using forced-vibration testing*. Journal of Structures Engineering, 1995. 121(2): p. 161-173.
98. Salawu, O., S. , *Detection of Structural Damage Through Changes in Frequency. A Review*. Engineering Structures, 1998. 19((9)): p. 718-724.
99. Kessler, S., S., Spearing, S., M., Atalla, M., J., Cesnik, Soutis, C., E., S., *Damage detection in composite materials using frequency response methods*. Composites: Part B, 2002. 33: p. 87-95.
100. Alqaradawi, M., Y., Nicholson, D., Nayfeh, J., Moslehy, F., *Baseline formation for damage diagnosis in one dimensiona beam problems*. Proceedings of 20th International Modal Analysis Conference, 2002: p. 1299-1305.
101. Lam, H., F., Ko, J., M., Wong, C., W. , *Localization of damaged structural connexions based on experimental modal and sensitivity analysis*. Journal of Sound and Vibration, 1998. 200(1): p. 91-115.
102. Lu, Q., Ren, G., Zhao, Y., *Multiple damage location with flexibility curvature and relative frequency change for beam structures*. Journal of Sound and Vibration, 2002. 253(5): p. 1101-1114.
103. Messina, A., Contursi, T., Williams, E., J. , *Multiple damage evaluation using natural frequency changes*. Proceedings of 15th International Modal Analysis Conference, 1997: p. 658-664.

104. Harris, C., M., Piersol, A., G., *Harris' Shock and Vibration Handbooh - Fifth edition*. 2002: McGraw-Hill.
105. Zimmerman, D., C., Simmermacher, T., Kaouk, M., *Structural damage detection using frequency response functions*. Proceedings of 13th International Modal Analysis Conference, 1995: p. 179-184.
106. Smart, M., *Localization of damaged structural connexions based on experimental modal and sensitivity analysis*. Proceedings of 13th International Modal Analysis Conference, 1995: p. 1385-1390.
107. Maia, N., M., M., Silva, J., M., M., Ribeiro, A., M., R., Leitao, J., J., A., A., *On the possible application of fractional derivatives to modal analysis*. Proceedings of 14th International Modal Analysis Conference, 1996: p. 172-177.
108. Maia, N., M., M., Silva, J., M., M., Sampaio, R., P., C., *Localization of damage using curvature of the frequency-response-functions*. Proceedings of 15th International Modal Analysis Conference, 1997: p. 942-946.
109. Silva, J., M., M., Maia, N., M., M., Sampaio, R., P., C., *Localization of damage of using FRF's curvatures. Assessment and discussion in experimental cases*. Proceedings of 16th International Modal Analysis Conference, 1998: p. 1587-1590.
110. Davis, I., C., Wicks, A., L., *Sources of FRF variation in damage detection*. Proceedings of 21st International Modal Analysis Conference, 2003: p. 765-770.
111. Kim, H., Y., *Vibration-dased damage identification using reconstructed FRFs in composite structures*. Journal of Sound and Vibration, 2003. 259(5): p. 1131-1146.
112. Pandley, A., K., Biswas, M., Samman, M., M., *Damage detection from changes in curvature mode shapes*. Journal of Sound and Vibration, 1991. 145(2).
113. Duarte, M., L., M., Medeiros, E., B., Silva, R., L., Cypriano, R., R., S., Mansur, T., R., Palma, E., S., *Damage detection: Fatigue and structural parameters variations - Study methodology and problems faced*. Proceedings of 20th International Modal Analysis Conference, 2002: p. 1286-1291.
114. West, W., M., *Illustration of the use of modal assurance criterion to detect structural changes in an orbiter test specimen*. Proceedings of Air Force Conference on Aircraf Structural Integrity, 1984: p. 1-6.
115. Lieven, N., A., J., Ewins, D., J., *Spatial correlation of mode shapes, the Coordinate Modal Assurance Criterion - COMAC*. Proceedings of 6th International Modal Analysis Conference, 1988: p. 690-695.
116. Palacz, M., Krawczuk, M., *Vibration parameters for damage detection in structures*. Journal of Sound and Vibration, 2002. **249**(5): p. 999-1010.
117. Hoerst, B., C., Ratcliffe, P., C., *Damage detection in beams using Laplacian operators on experimental modal data*. Proceedings of 15th International Modal Analysis Conference, 1997: p. 1305-1311.
118. Holger Schlum, D., *Fatigue testing and crack analysis of resonating structures*. PhD thesis- Swiss Federal Institute of Technology Zurich, 2001.
119. Kisa, M., Brandon, J., Topcu, M., *Free vibration analysis of cracked beams by a combination of finite elements and component mode synthesis methods*. Computers and Structures, 1998. 67: p. 215-223.

120. Allemang, R., J. , *The Modal Assurance Criterion MAC: Twenty years of use and abuse*. Proceedings of 20th International Modal Analysis Conference, 2002: p. 397–405.
121. ASTM E1875–08, *Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Sonic Resonance*.
122. ASTM C215 *Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Resonant Frequencies of Concrete Specimens*.
123. ASTM C623 *Test Method for Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio for Glass and Glass-Ceramics by Resonance*.
124. ASTM C747 *Test Method for Moduli of Elasticity and Fundamental Frequencies of Carbon and Graphite Materials by Sonic Resonance*.
125. ASTM C1198 *Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio for Advanced Ceramics by Sonic Resonance*.
126. ASTM C848 *Test Method for Young's Modulus, Shear Modulus and Poisson's Ratio For Ceramic Whitewares by Resonance*.
127. ASTM C1259 *Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio for Advanced Ceramics by Impulse Excitation of Vibration*.
128. ASTM E6 *Terminology Relating to Methods of Mechanical Testing*.
129. ASTM E177 *Practice for Use of the Terms Precision and Bias in ASTM Test Methods*.
130. ASTM E691 *Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method*.
131. Arghir, M., Borza, D., Blaga, F., Vesseleny, T., Solea, G., Runcan, M., *Evaluation models for the noise diminution due to the phonique barrier walls*, 7th European Conference on Noise Control, 2008, pp 265-270..
132. Dukkipati, V. R., *Solving Vibration Analysis Problems Using MATLAB*, New Age International Ltd. New Delhi, 2007.
133. L. Bereteu, **T. Medgyesi**, M. Popescu, G. Draganescu, R. Rosu, D.Simoiu, „Vibration tests at thin stainless steel sheets joined by CMT pulse with CuSi3 filler materials for determination of the elasticity moduls”, *Structural Integrity of Welded Structures, ISCS 13*, (doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.) Vol. 814, pp 135-140, 2013.
134. R. Moisa, **T. Medgyesi**, L. Bereteu, G. Draganescu, D.Simoiu, M. Sava, „Vibration tests for determination of longitudinal elasticity modulus and shear modulus of some structures welded with tubular wire”, *Acoustics & Vibration of Mechanical Structures, AVMS 13*, (doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.) Vol. 430, pp 101-107, 2013.

ANEXE

ANEXA 1

```
/COM,Analiza Modala a unor placi din oțel S 235 JR, sudate transversal,  
/COM,  
/COM,Universitatea Politehnica din Timisoara  
/COM,Facultatea de Mecanica  
/COM,Laboratorul de Vibratii  
/COM, Departamentul de Mecanica si Rezistenta Materialelor  
/COM,  
/COM,Autor: MEDGYESI Tiberiu Adrian  
/COM, Nume prenume  
/COM  
! Titlul analizei  
!-----  
/TITLE, Analiza Modala a unui ansamblu de două placi din oțel S 235 JR, sudate  
transversal prin procedeul WIG,  
!-----  
! SETĂRI GENERALE  
!-----  
  
/UNITS,SI ! Se alege Sistemul International de Unitati [SI]  
/PREP7  
  
!-----  
! DEFINIREA PARAMETRILOR - ! In aceasta sectiune se definesc parametrii  
simularii.  
!----- ! APDL (Ansys Parametric Design Language) ajuta  
! utilizatorul sa obtina rezultate rapide la schimbarea  
!***** ! unuia dintre parametrii, totodata avand sub  
! Geometrie * ! control pasii pentru repetarea analizei in mod IDENTIC.  
!*****  
*SET, L,0.2 !Lungimea placii  
*SET, W,0.04 !Latimea placii  
*SET, T,0.0008 !Grosimea placilor. Se presupune ca ambele placi au aceeasi  
grosime  
!*****  
! Proprietati de Material *  
!*****  
*SET,Densitate, 7850 !Densitatea  
*SET,Modul_Elasticitate, 2e11 !Modulul de elasticitate longitudinal  
*SET,Coeficient_Poisson, 0.3 !Coefficientul lui Poisson  
!*****  
!-----  
! DEFINIREA MATERIALELOR -  
!-----  
MP,EX, 1, Modul_Elasticitate,,,, !Se definesc:  
MP,PRXY,1, Coeficient_Poisson,,,, ! proprietatile pentru Materialul cu numarul  
1
```

MP,DENS,1, Densitate,,,,

!-----

! MODELARE GEOMETRICA -

!-----

K,1,0,0,0

K,2,0,0,W

K,3,0,T,W

K,4,0,T,0

K,5,L/2,0,W

K,6,L/2-T/1.732,T,W

K,7,L/2+T/1.732,T,W

K,8,L,T,W

K,9,L,0,W

K,10,L,0,0

K,11,L,T,0

K,12,L/2+T/1.732,T,0

K,13,L/2,0,0

K,14,L/2-T/1.732,T,0

K,15,L/2,T*1.17,W

K,16,L/2,T*1.17,0

A,1,2,3,4

A,2,3,6,5

A,5,6,14,13

A,1,4,14,13

A,1,2,5,13

A,4,3,6,14

A,5,7,8,9

A,8,9,10,11

A,10,11,12,13

A,5,7,12,13

A,5,9,10,13

A,7,12,11,8

LARC,6,7,15

LARC,14,12,16

L,6,14

L,7,12

AL,8,23,24,25

AL,6,13,24

AL,9,21,25

VA,1,2,3,4,5,6

VA,7,8,9,10,11,12

VA,10,3,14,15,13

!-----

! DEFINITIA TIPULUI ELEMENTELOR -

!-----

ET,1,SOLID45 !Se alege tipul de element SOLID45

!-----

! CREAREA RETELEI DE DISCRETIZARE -

!-----

LSEL,S,LINE,,4

```
LSEL,A,LINE,,2
LSEL,A,LINE,,6
LSEL,A,LINE,,9
LESIZE,ALL,0.4E-3, , ,1, ,1,
LSEL,S,LINE,,1
LSEL,A,LINE,,3
LSEL,A,LINE,,10
LSEL,A,LINE,,8
LESIZE,ALL,2.6E-3, , ,1, ,1,
LSEL,S,LINE,,5
LSEL,A,LINE,,11
LESIZE,ALL,2.6E-3, , ,0.01,1, ,1,
LSEL,S,LINE,,7
LSEL,A,LINE,,12
LESIZE,ALL,2.6E-3, , ,100,1, ,1,
VMESH,1
LSEL,S,LINE,,15
LSEL,A,LINE,,18
LSEL,A,LINE,,13
LSEL,A,LINE,,21
LESIZE,ALL,0.4E-3, , ,1, ,1,
LSEL,S,LINE,,16
LSEL,A,LINE,,14
LSEL,A,LINE,,22
LSEL,A,LINE,,20
LSEL,A,LINE,,19
LSEL,A,LINE,,17
LSEL,A,LINE,,23
LESIZE,ALL,2.6E-3, , ,1, ,1,
LSEL,S,LINE,,14
LSEL,A,LINE,,22
LESIZE,ALL,2.6E-3, , ,100,1, ,1,
LSEL,S,LINE,,16
LSEL,A,LINE,,20
LESIZE,ALL,2.6E-3, , ,0.01,1, ,1,
VMESH,2
ET,2,SOLID187
TYPE,2
MAT,1
REAL,1
SMRTSIZE,9
MSHAPE,1,3D
MSHKEY,0
LSEL,S,LINE,,24
LSEL,A,LINE,,25
LESIZE,ALL,0.1E-3, , ,1, ,1,
VMESH,3
!-----
! ANALIZA MODALA -
!-----
/SOLU
```


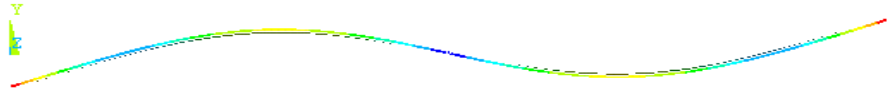

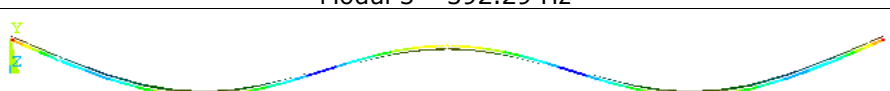
```
allsel
ANTYPE,modal,new
MODOPT,LANB,26
SOLVE
ansamblului           ! În acest modul se calculează primele 26 de moduri ale
FINISH                ! generat în pasul anterior. Metoda de calcul a
modurilor proprii    ! este Block-Lanczos. Frecvențele proprii vor fi afișate la
/POST1                ! sfârșitul
sfârșitul            ! analizei modale pe ecranul calculatorului, folosind
SET,LIST              ! post-procesorul POST1

/solu
/output,mass_output.txt ! Pentru a compara masa modelului FE cu cea a
modelului fizic      ! este indicat a o determina. Aceasta este util pentru a
psolve,elform        !
avea sens            ! compararea rezultatelor obținute din cele două tipuri
/output
de analize
```

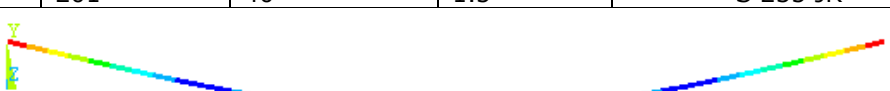
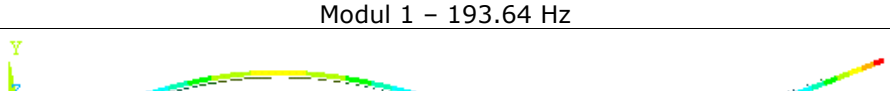
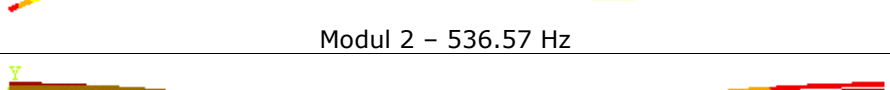
ANEXA 2

Frecvențele naturale și modurile proprii ale probelor din table de oțel de uz general S 235 JR. Condiții de frontieră: Capetele libere

Tabelul A2.1 Primele moduri proprii pentru proba 2 din oțel S235 JR

Nr.crt	Lungimea [mm]	Lățimea [mm]	Grosimea [mm]	Materialul de bază
2	201	40.5	1	S 235 JR
 <p style="text-align: center;">Modul 1 - 129.14 Hz</p>				
 <p style="text-align: center;">Modul 2 - 358.00 Hz</p>				
 <p style="text-align: center;">Modul 3 - 392.29 Hz</p>				
 <p style="text-align: center;">Modul 4 - 710.41 Hz</p>				


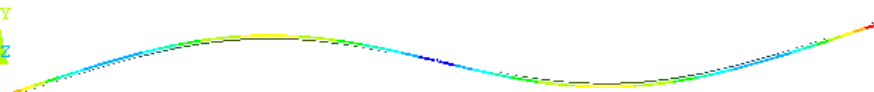


Tabelul A2.2 Primele moduri proprii pentru proba 3 din oțel S 235 JR

Nr.crt	Lungimea [mm]	Lățimea [mm]	Grosimea [mm]	Materialul de bază
3	201	40	1.5	S 235 JR
 <p style="text-align: center;">Modul 1 - 193.64 Hz</p>				
 <p style="text-align: center;">Modul 2 - 536.57 Hz</p>				
 <p style="text-align: center;">Modul 3 - 590.34 Hz</p>				


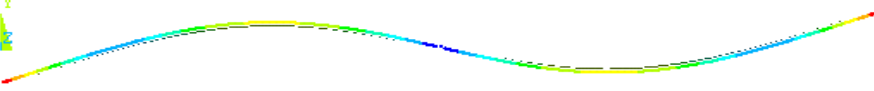
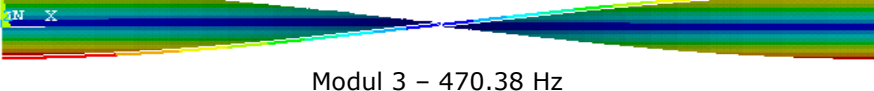
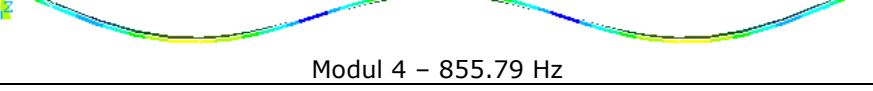
ANEXA 3

Frecvențele naturale și modurile proprii ale probelor din oțel inoxidabil EN-X5 CrNi 18-20, grosimea tablei 1 mm.

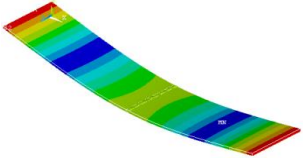
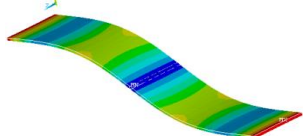
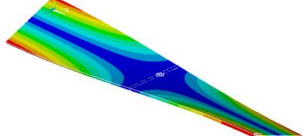
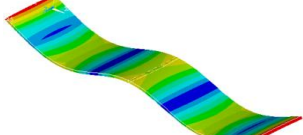
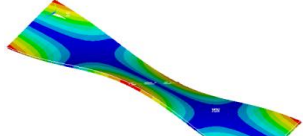
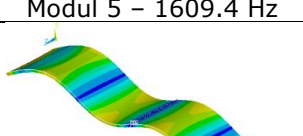
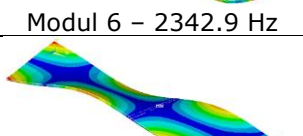
Tabelul A 3.1 Primele moduri proprii pentru proba 2 din oțel INOX

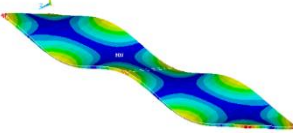
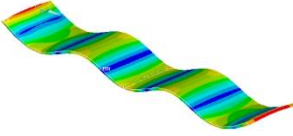
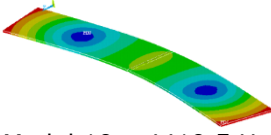
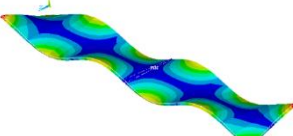
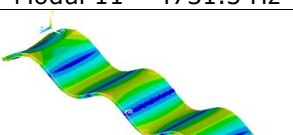
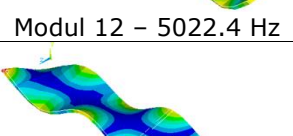
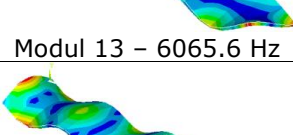
Nr.crt	Lungimea [mm]	Lățimea [mm]	Grosimea [mm]	Material/moduri
2	197.5	41	1	Oțel inoxidabil EN X5 Cr Ni 18-10
 <p style="text-align: center;">Modul 1 – 132.30 Hz</p>				
 <p style="text-align: center;">Modul 2 – 366.97 Hz</p>				
 <p style="text-align: center;">Modul 3 – 388.87 Hz</p>				
 <p style="text-align: center;">Modul 4 – 728.78 Hz</p>				

Tabelul A 3.2 Primele moduri proprii pentru proba 3 din oțel INOX





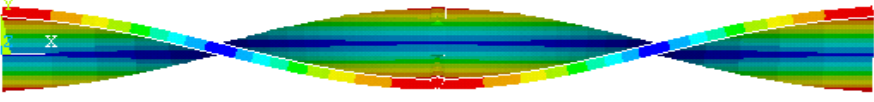
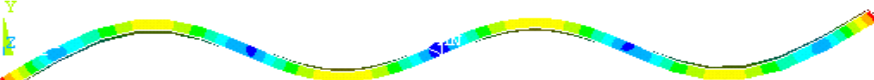
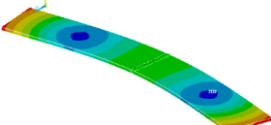



Nr.crt	Lungimea [mm]	Lățimea [mm]	Grosimea [mm]	Material
3	199.5	40	1.2	EN X5 Cr Ni 18-10
 <p style="text-align: center;">Modul 1 – 155.52 Hz</p>				
 <p style="text-align: center;">Modul 2 – 431.19 Hz</p>				
 <p style="text-align: center;">Modul 3 – 470.38 Hz</p>				
 <p style="text-align: center;">Modul 4 – 855.79 Hz</p>				

Tabelul A 3.3 Primele moduri proprii pentru proba 4 din oțel INOX

Nr.crt	Lungimea [mm]	Lățimea [mm]	Grosimea [mm]	Material
4	201	39	2	EN X5 Cr Ni 18-10
 <p>Modul 1 – 255.33 Hz</p>				
 <p>Modul 2 – 706.97 Hz</p>				
 <p>Modul 3 – 789.85 Hz</p>				
 <p>Modul 4 – 1402.1 Hz</p>				
 <p>Modul 5 – 1609.4 Hz</p>				
 <p>Modul 6 – 2342.9 Hz</p>				
 <p>Modul 7 – 2531.4 Hz</p>				

 <p>Modul 8 – 3538.0 Hz</p>
 <p>Modul 9 – 3551.9 Hz</p>
 <p>Modul 10 – 4419.5 Hz</p>
 <p>Modul 11 – 4731.5 Hz</p>
 <p>Modul 12 – 5022.4 Hz</p>
 <p>Modul 13 – 6065.6 Hz</p>
 <p>Modul 14 – 6708.6 Hz</p>



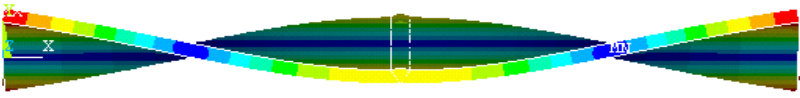
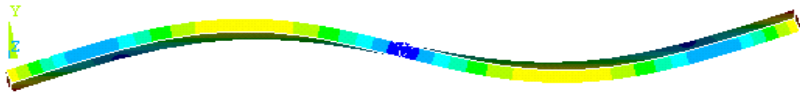
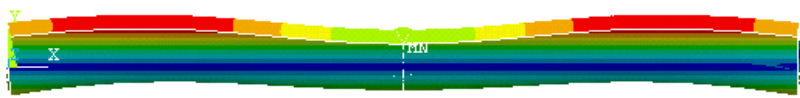
Tabelul A 3.4 Primele moduri proprii pentru proba 5 din oțel INOX

Nr.crt	Lungimea [mm]	Lățimea [mm]	Grosimea [mm]	Material
5	201.5	31	3	EN X5 Cr Ni 18-10
 <p>Modul 1 – 380.88 Hz</p>				
 <p>Modul 2 – 1051.3 Hz</p>				
 <p>Modul 3 – 1456.7 Hz</p>				
 <p>Modul 4 – 2080.9 Hz</p>				
 <p>Modul 5 – 2940.9 Hz</p>				
 <p>Modul 6 – 3467.7 Hz</p>				
 <p>Modul 7 – 3631.2 Hz</p>				
 <p>Modul 8 – 4571.3 Hz</p>				
 <p>Modul 9 – 5248.8 Hz</p>				
 <p>Modul 10 – 6281.3 Hz</p>				



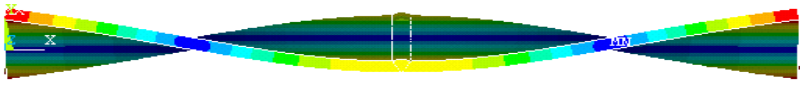
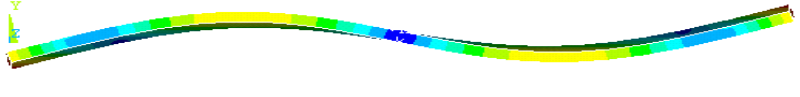
ANEXA 4

Frecvențele naturale și modurile proprii ale probei din aluminiu, grosimea tablei 3 mm.

Tabelul A 4.1 Rezultate ale analizei modale pentru tablă aluminiu laminat h=3 mm (154.5x75x3)

Nr.	Frecv.	Forma modului
1	661.07 Hz	
2	828.24 Hz	
3	1807.7 Hz	
4	1834.3 Hz	
5	2875.9 Hz	

Tabelul A 4.2 Rezultate ale analizei modale pentru tablă aluminiu laminat h=3 mm (155.5x75x3)

Nr.	Frecv.	Forma modului
1	652.58 Hz	
2	822.73 Hz	
3	1794.3 Hz	
4	1811.0 Hz	

ANEXA 5

Spectrele Fourier ale semnalelor pentru probe din oțel S 235 JR

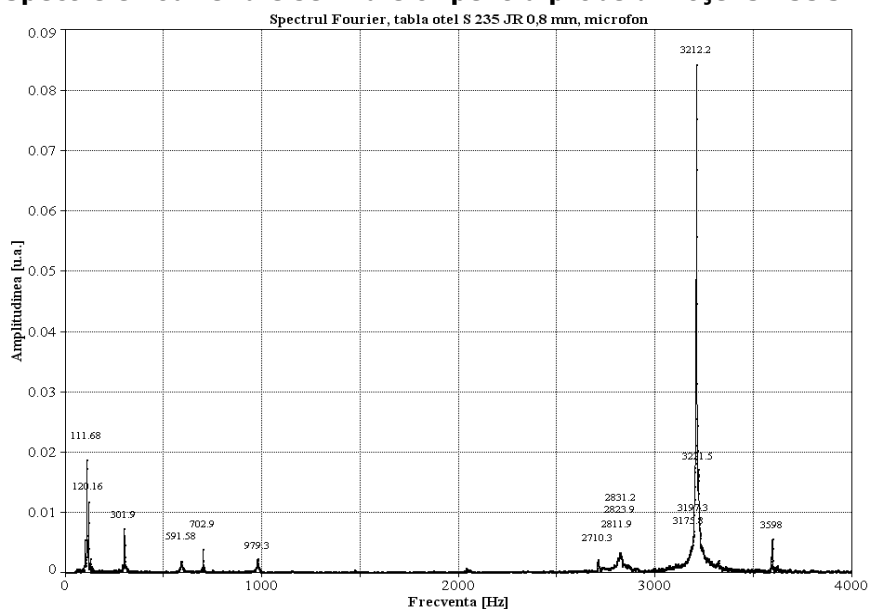


Figura A5.1 Spectrul Fourier, proba oțel S235JR0,8 mm

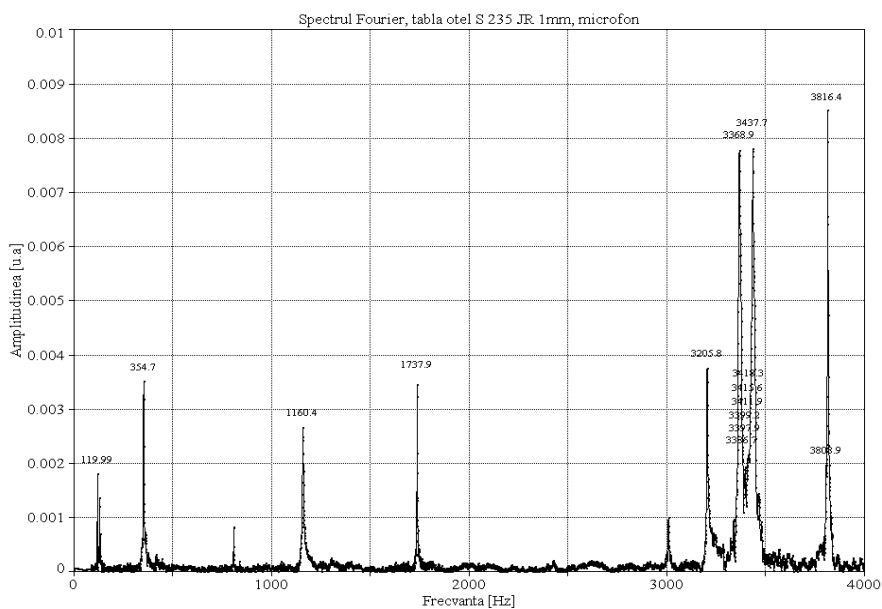


Figura A5.2 Spectrul Fourier, oțel S235JR, 1mm

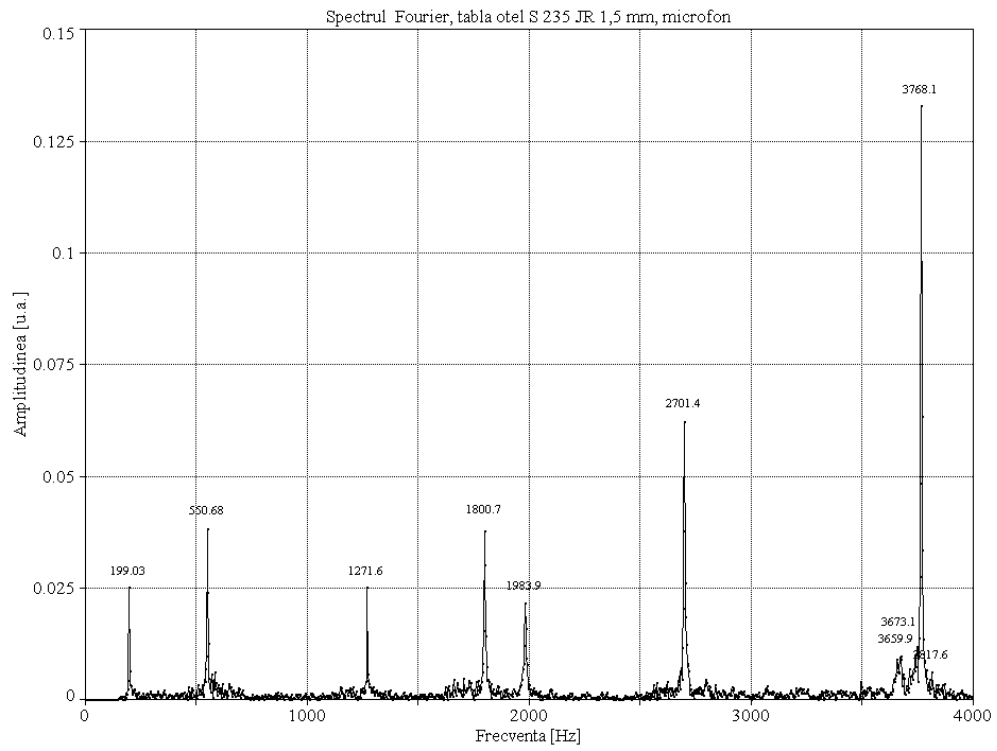


Figura A5.3 Spectrul Fourier pentru proba oțel S 235 JR, 1,5 mm

ANEXA 6

Spectrele Fourier ale semnalelor date de microfon, pentru probe din INOX

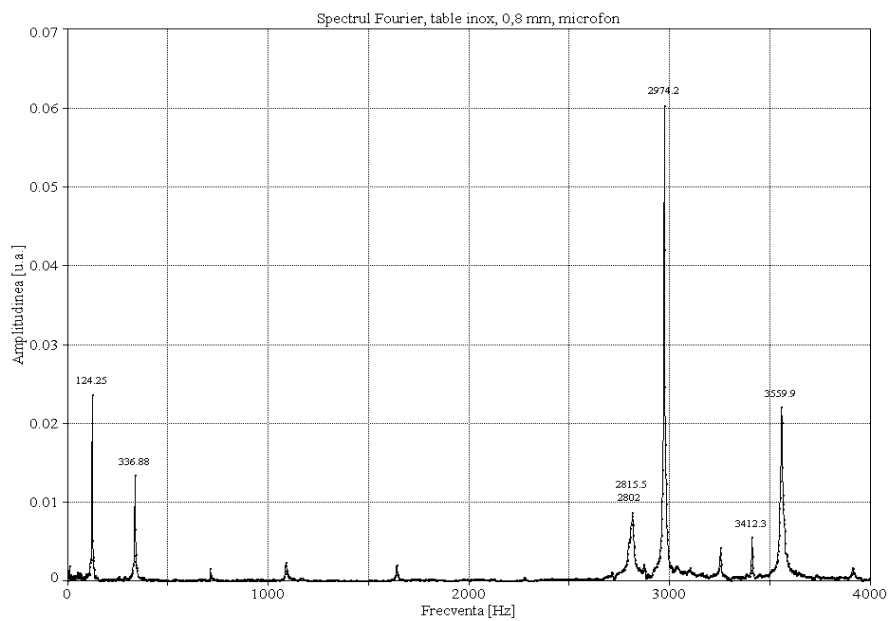


Figura A6.1 Spectrul Fourier pentru proba inox, 0,8 mm

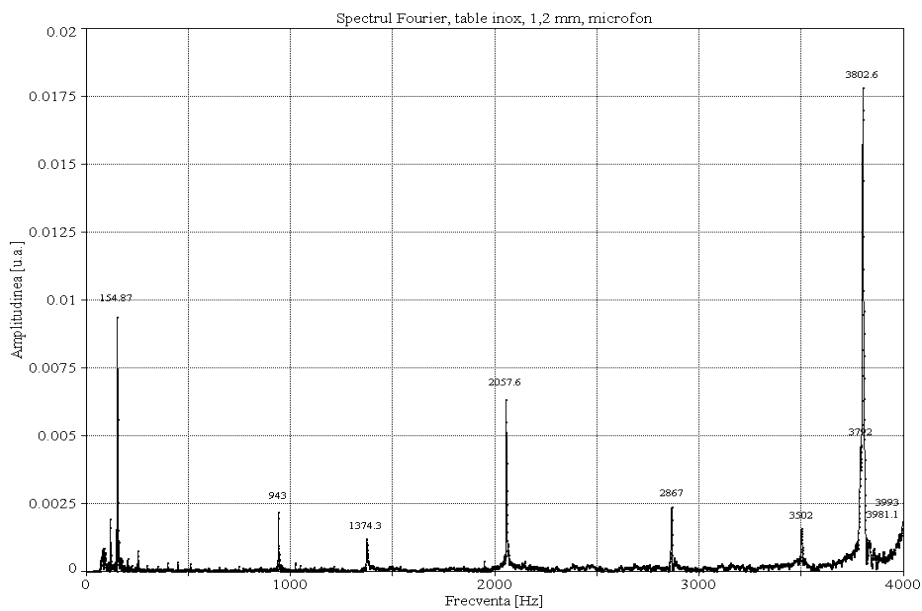


Figura A6.2 Spectrul Fourier pentru proba inox, 1,2 mm

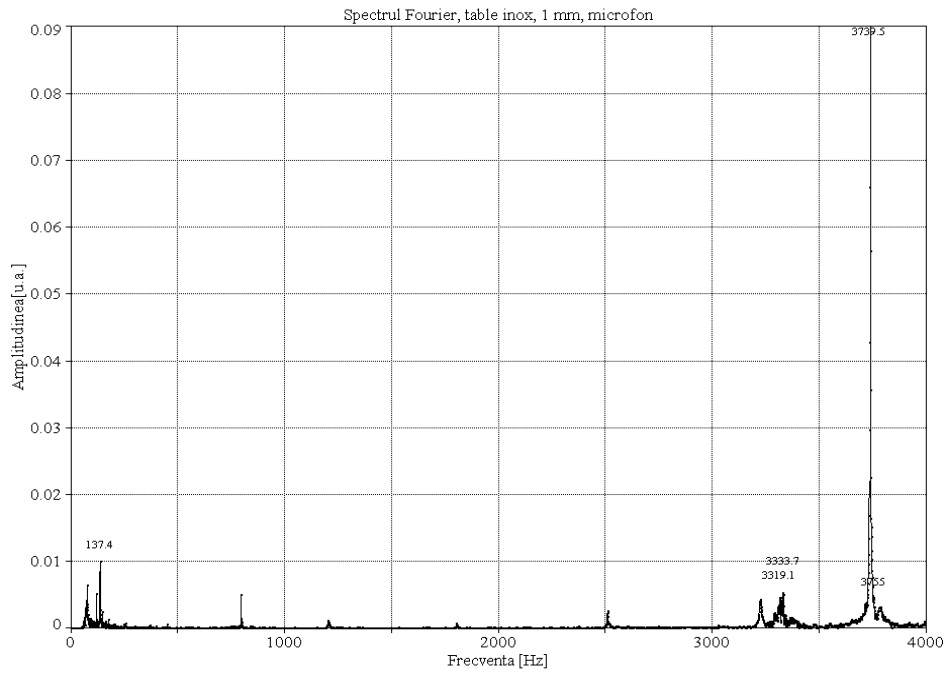


Figura A6.3 Spectrul Fourier pentru proba inox, 1 mm

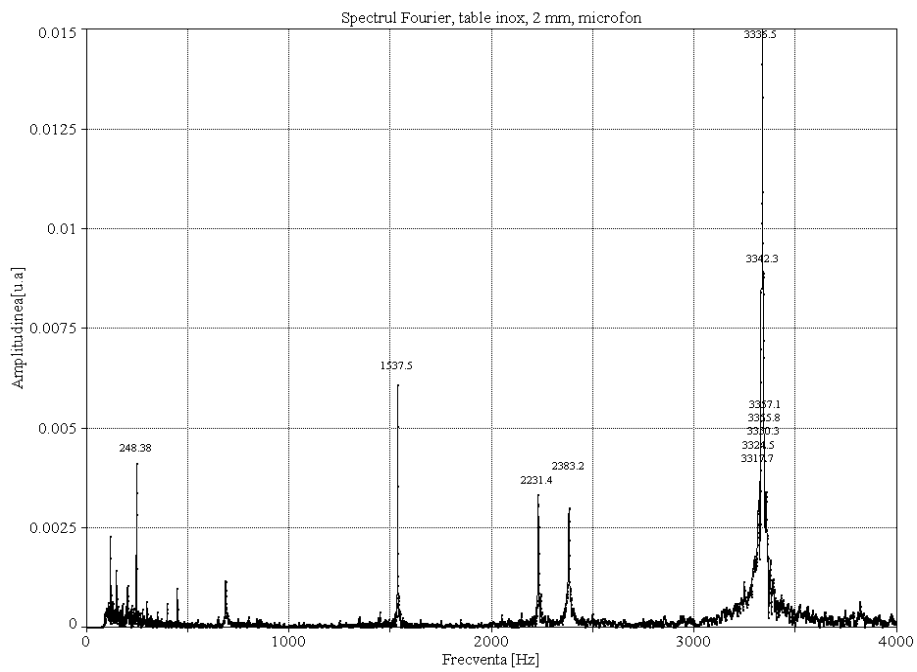


Figura A6.4 Spectrul Fourier pentru proba inox, 2 mm

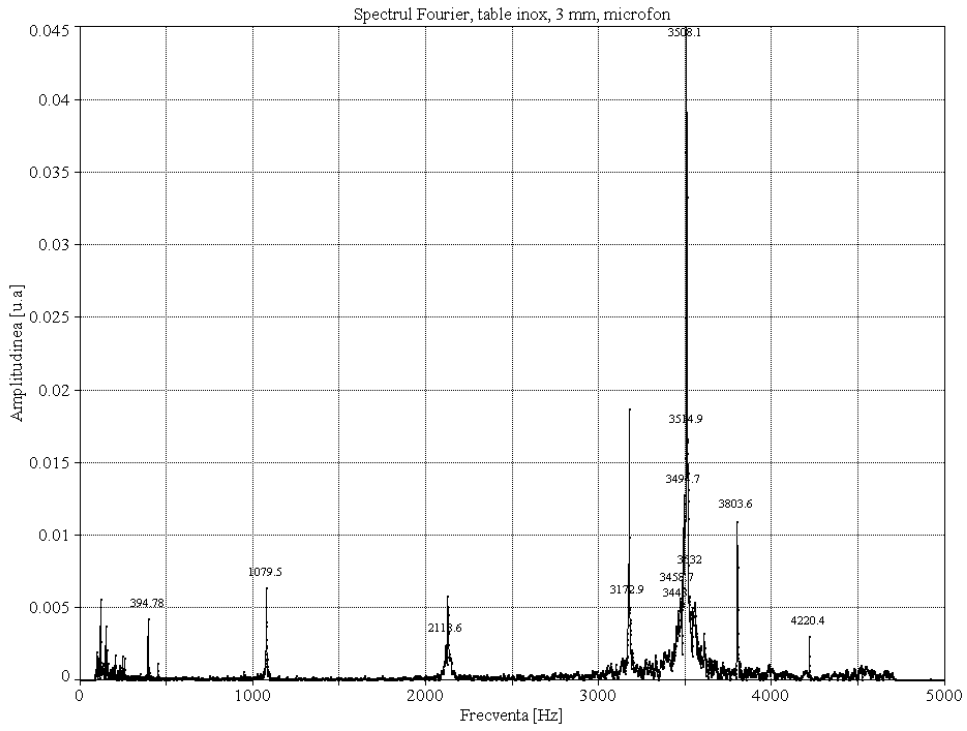


Figura A6.5 Spectrul Fourier pentru proba inox,3 mm

ANEXA 7

Spectrele Fourier ale semnalelor obținute prin înregistrare cu microfonul pentru probe din aluminiu

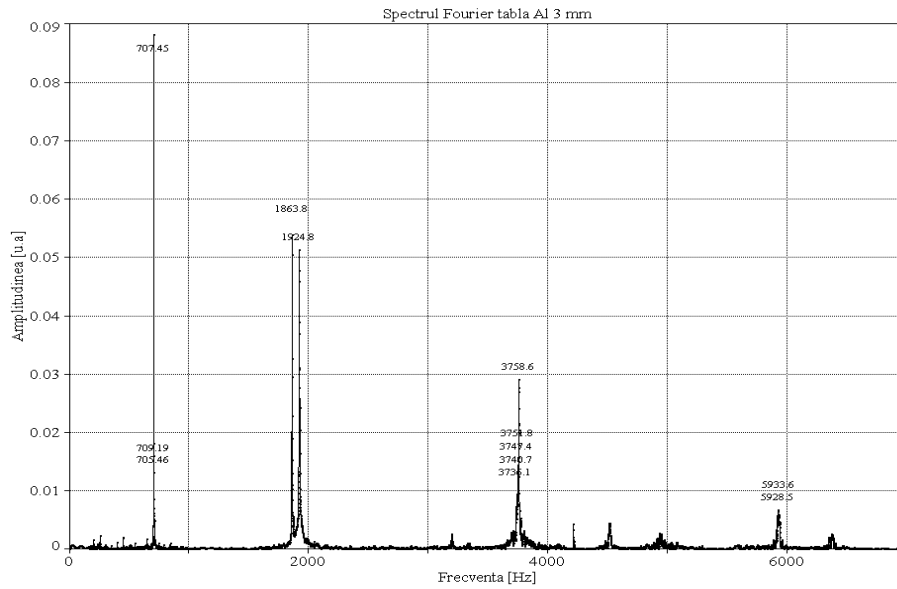


Figura A7.1 Spectrul Fourier pentru proba de aluminiu de 3 mm

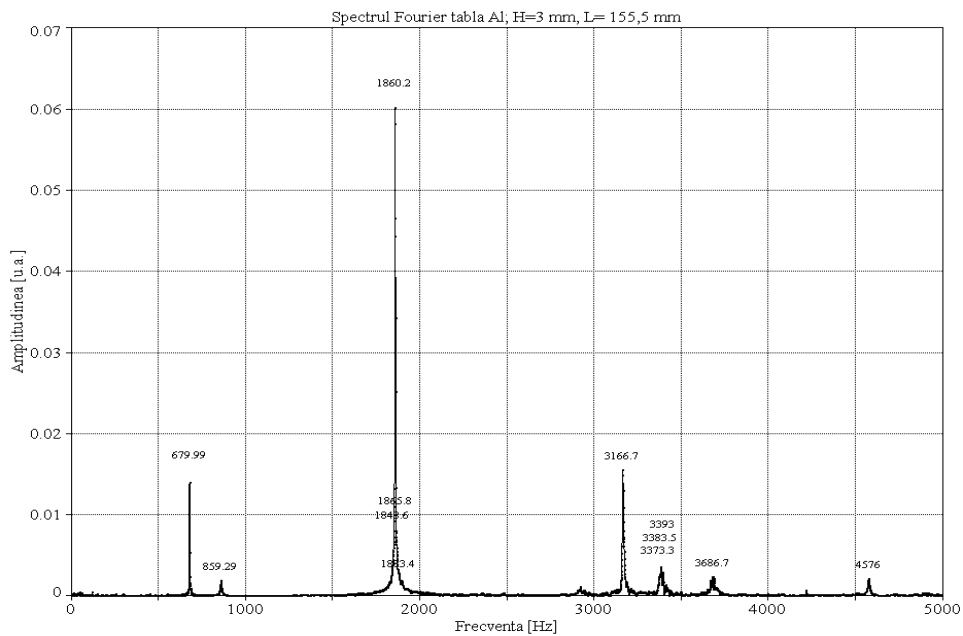


Figura A7.2 Spectrul Fourier pentru proba de aluminiu de 3 mm

ANEXA 8

Rezultate ale analizei spectrale aplicând metoda seriilor Prony ale semnalelor obținute prin înregistrare cu microfonul de la o proba din oțel S 235 JR și aceeași probă după zincare

Complex Exponential (Prony) Summary

Data: D:\medgyesi\20martie14\semnale\ fără Zn (1).wav

Data Source: d:\medgyesi\20martie14\semnale\ fara Zn (1).wav

Date: March 20, 2014; Algorithm: Damped; Order: 140; Signal Space: 140

Exp Damped Sine Fit (Suboptimal)

Tabelul A8.1 Rezultatele analizei unui semnal. Probă înainte de zincare, aplicând metoda seriilor Prony

Frecvența [Hz]	Amplitude [mV]	Damping [-]	Power [mW]
261.2066587	0.096495533	2.009013476	0.001153280
939.61489523	0.2804315100	2231.5489876	6.031485e-06
1418.8637710	0.0721320775	83.230848268	1.575334e-05
1614.7755632	0.0233677753	19.440328805	7.033702e-06
2351.8093494	0.0236836234	24.932662936	5.621109e-06
3513.1288609	0.0700771303	2.5983822244	0.0004719044
3667.9802749	0.3936573749	2280.0070817	1.545637e-05
3876.1779005	0.0590878816	410.26151567	2.149532e-06
4902.3049578	0.0806468051	7.2937109570	0.0002229623

Complex Exponential (Prony) Summary

Data: D:\medgyesi\20martie14\semnale\1zn (1).wav

Data Source: d:\medgyesi\20martie14\semnale\ cuzn (1).wav

Date: March 20, 2014; Algorithm: Damped; Order: 160; Signal Space: 160

Exp Damped Sine Fit (Suboptimal)

Tabelul A8.2 Rezultatele analizei unui semnal. Probă după de zincare, aplicând metoda seriilor Prony

Frecvența [Hz]	Amplitude [mV]	Damping [-]	Power [mW]
265.9940045	0.082067589	2.369378933	0.000703358
1004.2140353	0.0722700101	697.60131418	2.014578e-06
1459.8135719	0.0653709819	17.398676359	6.150135e-05
1595.7545196	0.0252519592	4.1826080189	3.809264e-05
1954.3948120	0.1195681451	912.43203990	4.099207e-06
2204.2088352	0.3075631541	2044.2374708	1.015972e-05
3479.1815902	0.0410493161	54.920394840	7.685918e-06
3589.3648873	0.1744995890	4.5620759932	0.0016680302
4189.5790615	0.0778353922	710.03523798	2.107563e-06

ANEXA 9

Rezultate ale analizei spectrale aplicând metoda seriilor Prony ale semnalelor obținute prin înregistrare cu microfonul de la o probă din oțel S 235 JR, înainte și după metalizare

Complex Exponential (Prony) Summary

Data: D:\medgyesi\20martie14\semnale\2faraoxi (iulie).wav

X: Time; Y: Signal

Data Source: d:\medgyesi\20martie14\semnale\2faraoxi (iulie).wav

Date: Jul 23, 2014

Algorithm: Damped

Order: 150

Signal Space: 150

Exp Damped Sine Fit (Suboptimal)

Tabelul A 9.1 Rezultate ale prelucrării semnalului dat de o probă otel S235 nemetalizată, aplicând metoda seriilor Prony

Frequency[Hz]	Amplitude[mV]	Damping[-]	Power[mW]	%
266.30162238	0.05449570	0.69834161	0.00080354	9.74897552
471.23698499	0.0290327577	488.08374266	4.12647e-07	0.0050064252
756.34395829	0.0184843071	448.90695791	2.063562e-07	0.0025036094
1080.2957719	0.0127168798	452.37884642	9.531141e-08	0.0011563622
1437.9444919	0.0419803399	7.7746641230	5.667944e-05	0.6876612560
1879.3978293	0.0135204519	0.7611232003	4.710922e-05	0.5715508405
2028.3525787	0.0592977507	2192.3952097	4.237577e-07	0.0051412253
2376.8628720	0.0039485432	13.917663963	2.799883e-07	0.0033969480
2721.7134547	0.0453071304	1395.2835597	3.972448e-07	0.0048195576
2945.3407536	0.0180624676	786.33495107	9.952323e-08	0.0012074620
3366.0290438	0.0068246688	19.942660613	5.833535e-07	0.0070775153
3547.1321357	0.2429933289	3.3622631652	0.0043852060	53.203351675
3783.8114717	0.0988204430	4041.3028658	6.03857e-07	0.0073262725
4012.9039970	0.0204626324	55.110046452	1.897347e-06	0.0230194931
4297.5689220	0.0160762371	912.81988613	6.92914e-08	0.0008406754
4635.4432099	0.0093348398	651.29701765	3.352599e-08	0.0004067528
4948.4479050	0.0097539432	17.916975603	1.326922e-06	0.0160988277
5255.2961269	0.0064785026	87.249558829	1.199929e-07	0.0014558094
6574.7536762	0.0894998822	3920.6248661	4.756869e-07	0.0057712537
6575.4201040	0.1758859653	61.491505344	0.0001259535	1.5281262475
6636.5986063	0.2914138364	7.8992215242	0.0026874055	32.604848804
			0.0082423491	100.00000000

Complex Exponential (Prony) Summary
 Data: D:\medgyesi\20martie14\semnale\2oxi .wav

X: Time
 Y: Signal
 Data Source: d:\medgyesi\20martie14\semnale\2oxi .wav

Date: Jul 23, 2014
 Algorithm: Damped
 Order: 150
 Signal Space: 150

Exp Damped Sine Fit (Suboptimal)

Tabelul A9.2 Rezultate ale prelucrării semnalului dat de o probă otel S235 metalizată, aplicând metoda seriilor Prony

Frequency[Hz]	Amplitude[mV]	Damping[-]	Power[mW]	%
268.94902555	0.06007984	0.45712368	0.00146681	23.6591901
1457.7095437	0.0518550852	4.8454098627	0.0001386859	2.2369538253
1857.3659864	0.0094286795	1.8500388899	1.196288e-05	0.1929570458
3062.6198013	0.0231640248	902.21129006	1.542367e-07	0.0024877841
3392.6823003	0.0046375298	50.058585568	1.072735e-07	0.0017302839
3601.1741316	0.2265863790	7.7139390637	0.0016641086	26.841483439
3980.5503959	0.0134516791	116.04849253	3.881296e-07	0.0062603933
4613.2628142	0.0082875715	782.91316538	2.145935e-08	0.0003461316
4660.2389564	0.0761413138	2525.0188335	5.921082e-07	0.0095504954
5025.4988874	0.0265755526	40.357313560	4.369455e-06	0.0704777674
5301.4027891	0.0133586523	485.49118991	9.122025e-08	0.0014713504
6612.0162922	0.1710984500	18.343334171	0.0003989042	6.4341836675
6678.0649854	0.2860096006	50.334196516	0.0004061105	6.5504186336
7717.2431221	0.0202150824	987.74685534	1.036358e-07	0.0016716089
7885.6707484	0.0567196859	2385.7441538	3.519317e-07	0.0056765339
8526.0140871	0.0179263496	22.209377597	3.61637e-06	0.0583307732
9520.6290828	0.0609558842	43.815305304	2.118541e-05	0.3417132224
9901.2377563	0.0147846355	155.01271982	3.529858e-07	0.0056935365
10147.864388	0.4209825099	21.427815477	0.0020672439	33.343913115
			0.0061997640	100.00000000

ANEXA 10

Spectrele Fourier ale semnalelor obținute prin înregistrare cu vibrometrul laser pentru probe din oțel S 235 JR

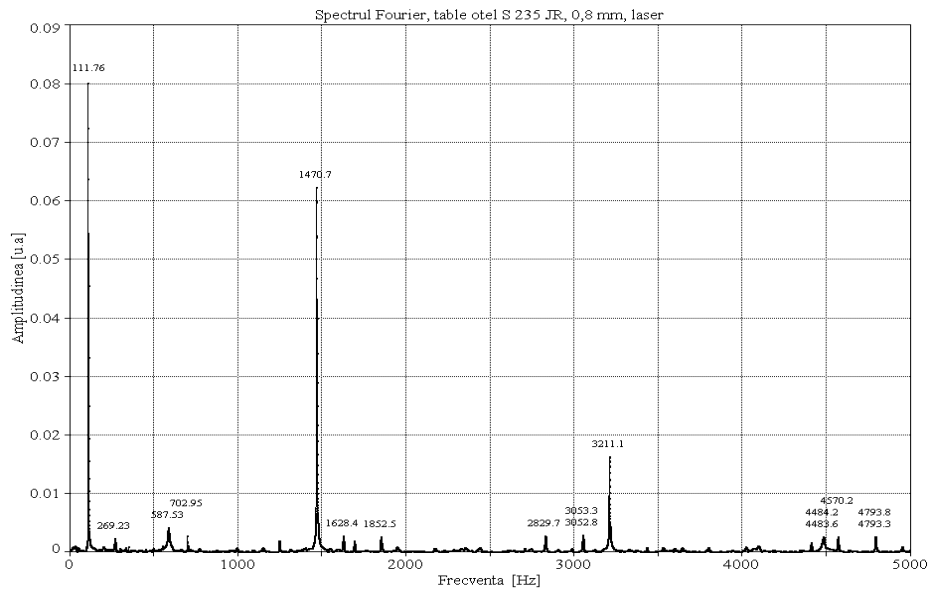


Figura A10.1 Spectrul Fourier pentru proba din oțel S235JR de 0,8mm

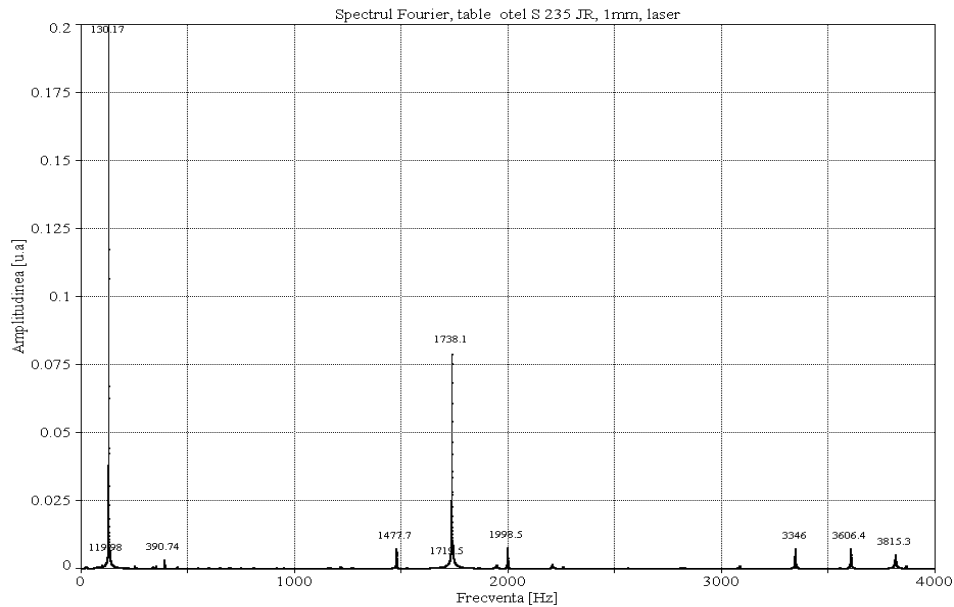


Figura A10.2 Spectrul Fourier pentru proba din S235JR de 1 mm

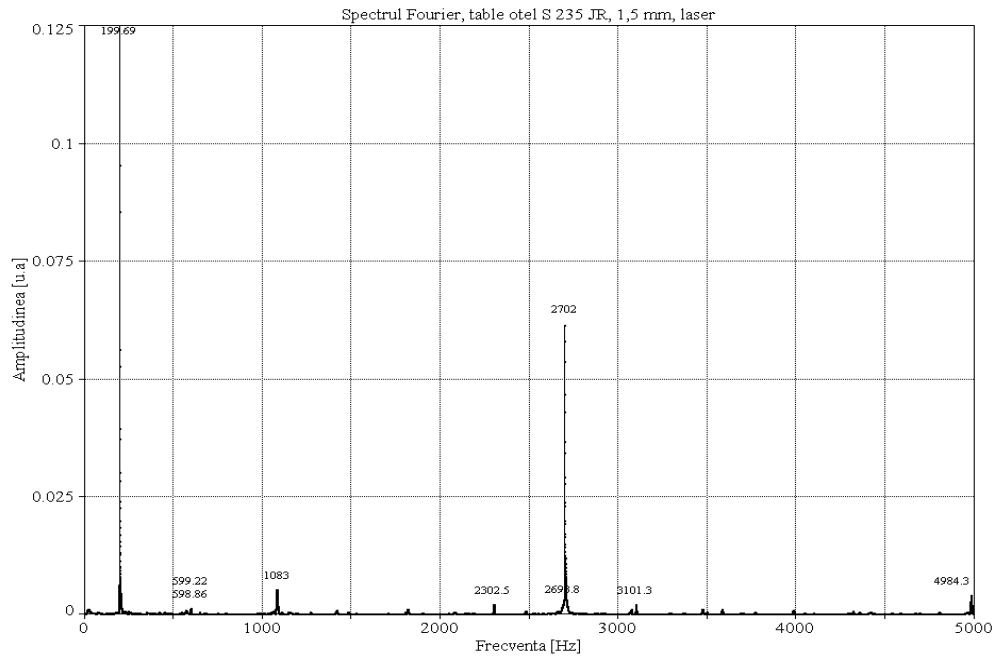


Figura A10.3 Spectrul Fourier pentru proba din S235JR de 1,5 mm

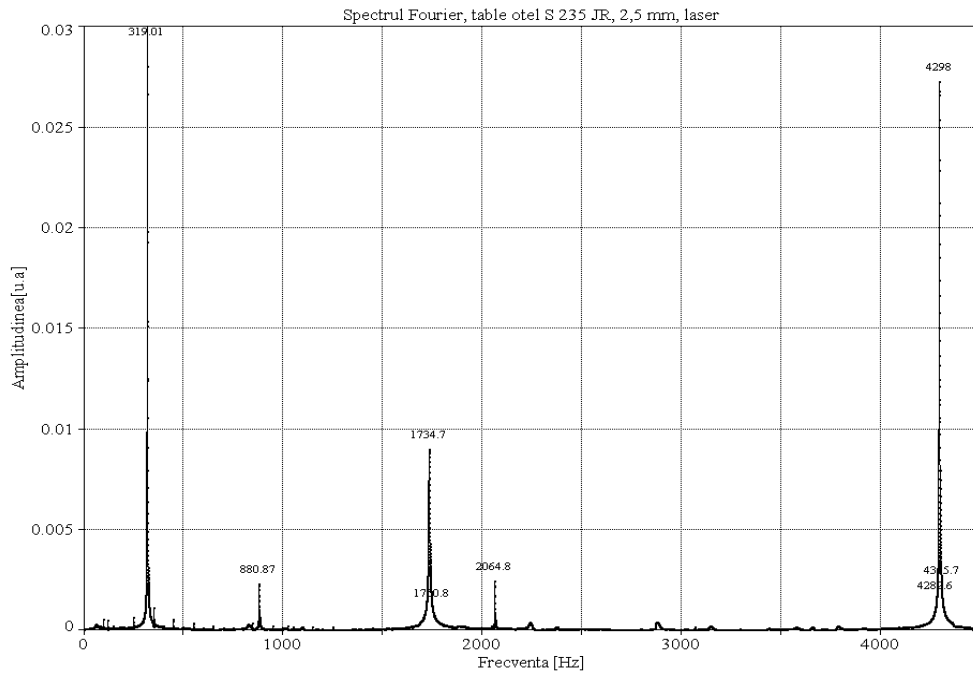


Figura A10.4 Spectrul Fourier pentru proba din S235JR de 2,5 mm

ANEXA 11

Spectrele Fourier ale semnalelor obținute prin înregistrare cu vibrometrul laser pentru probe din oțel inoxidabil

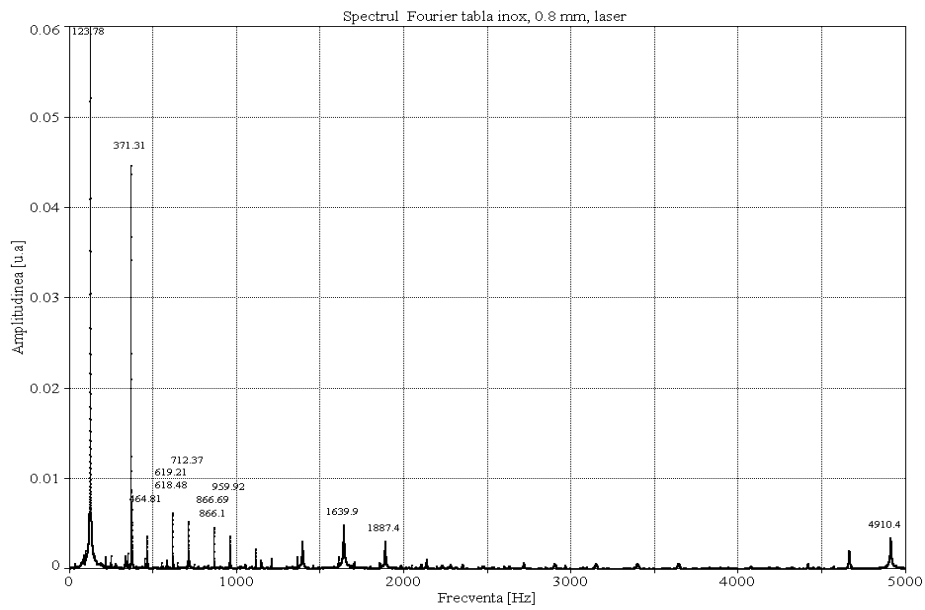


Figura A11.1 Spectrul Fourier pentru proba din INOX de 0,8 mm

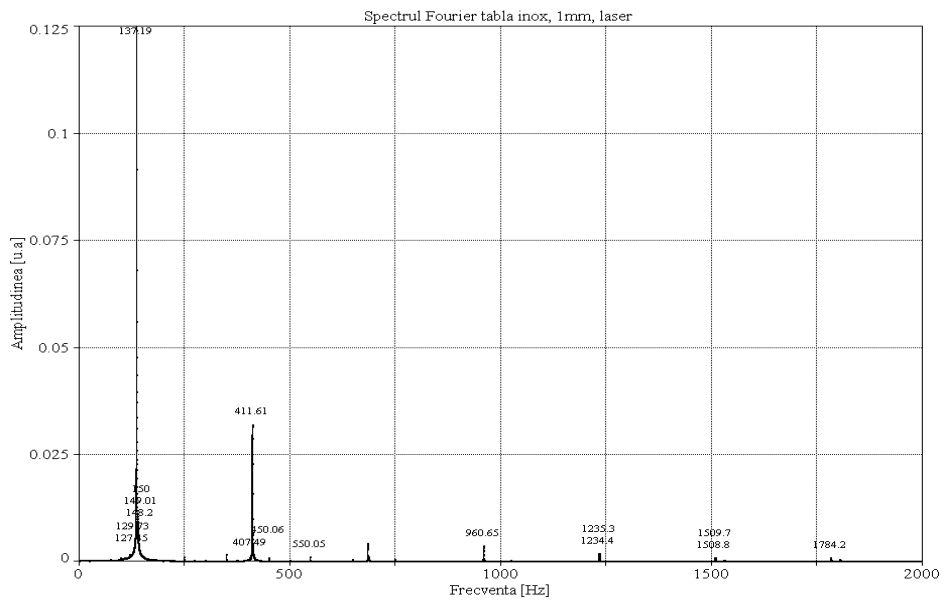


Figura A11.2 Spectrul Fourier pentru proba din INOX de 1 mm

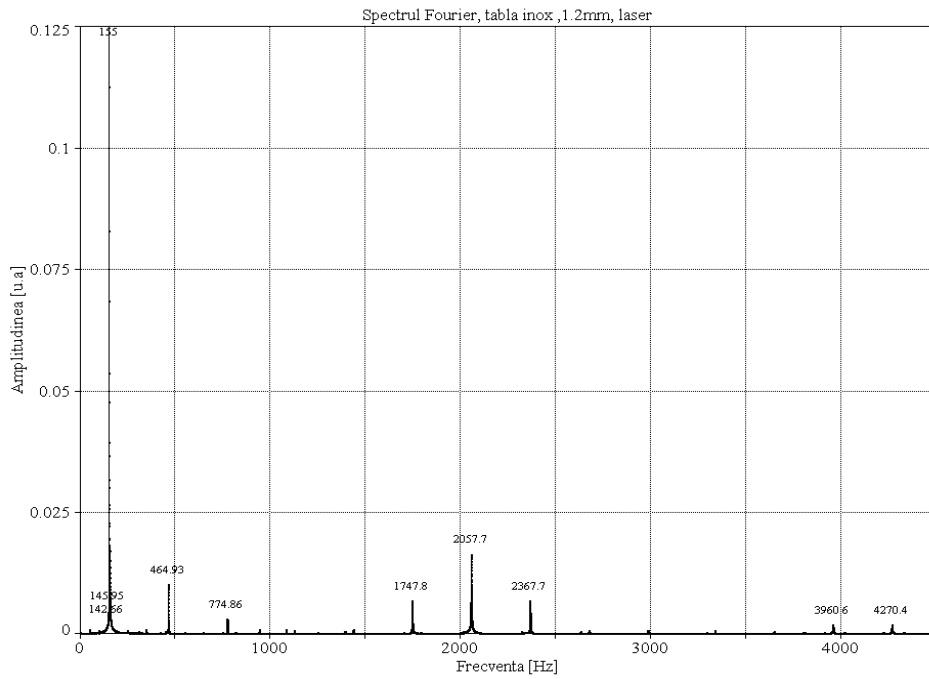


Figura A11.3 Spectrul Fourier pentru proba din INOX de 1,2 mm

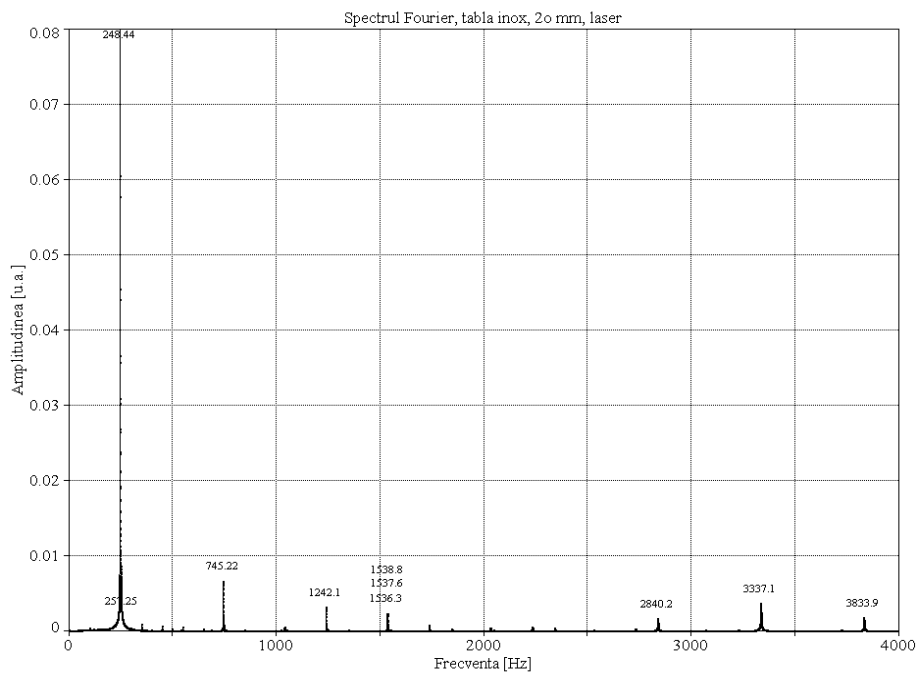


Figura A11.4 Spectrul Fourier pentru proba din INOX de 2 mm

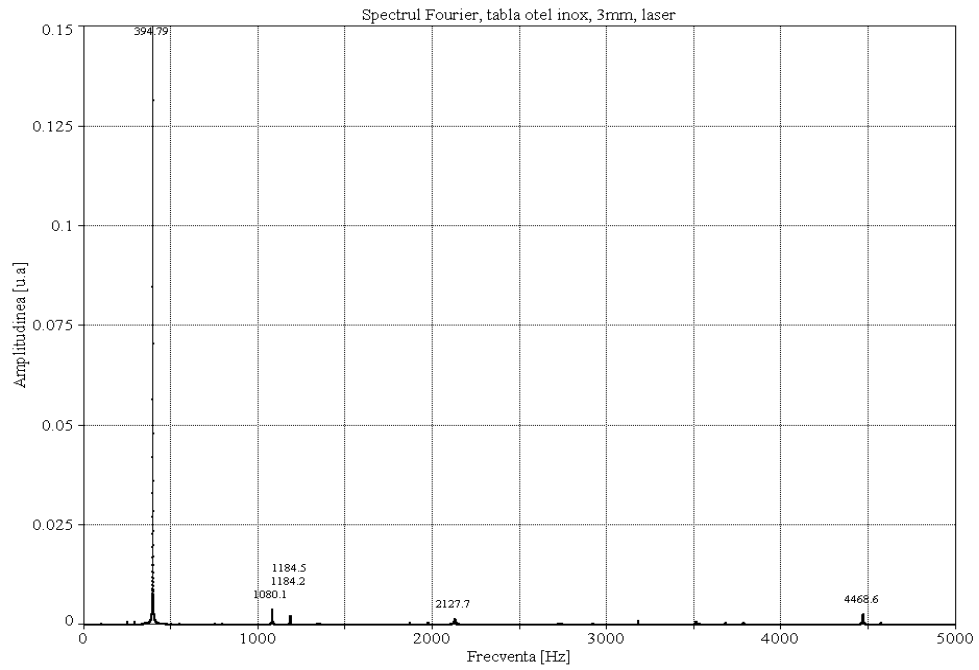


Figura A11.5 Spectrul Fourier pentru proba din INOX de 1,2 mm

ANEXA 12

Specetrele Fourier ale semnalelor obținute prin înregistrare cu vibrometrul laser pentru probe din aluminiu

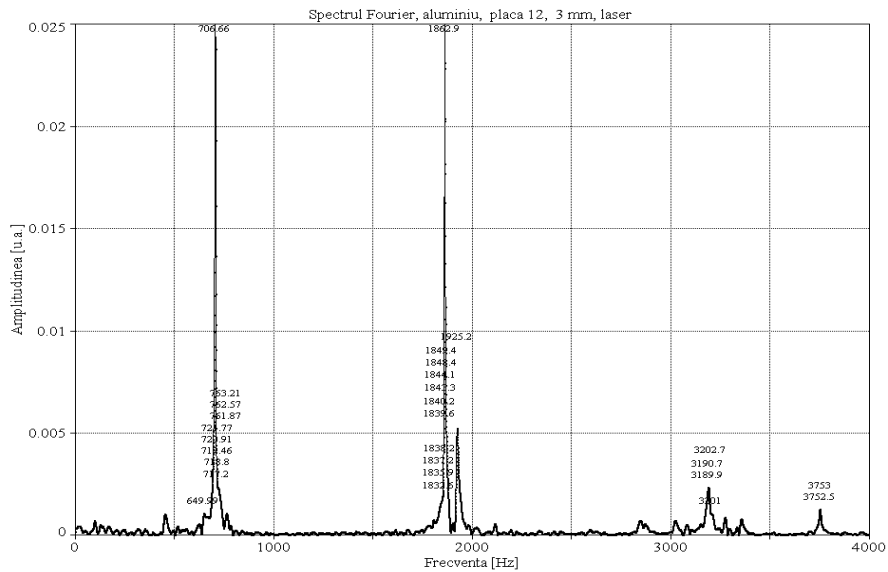


Figura A12.1 Spectrul Fourier pentru proba din aluminiu 3 mm

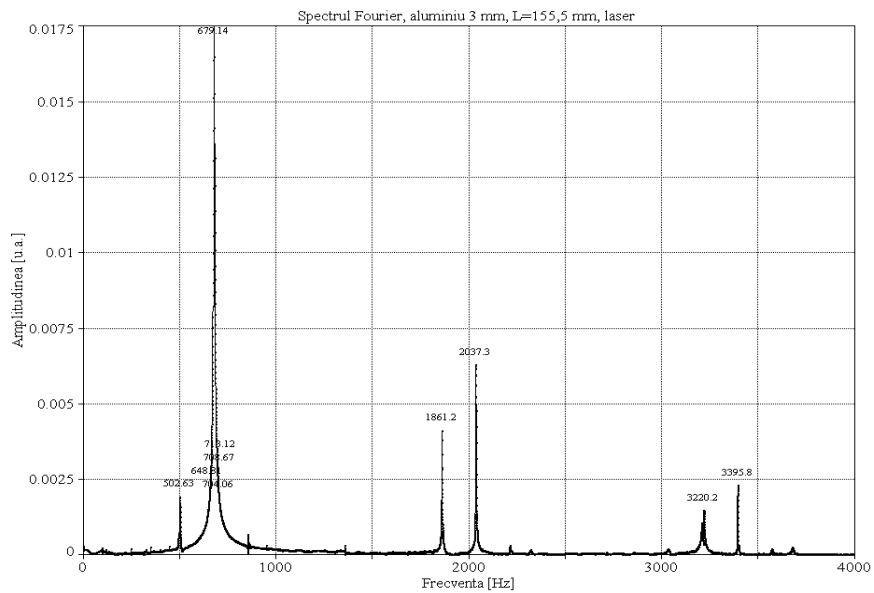


Figura A12.2 Spectrul Fourier pentru proba din aluminiu de 3 mm

ANEXA 13

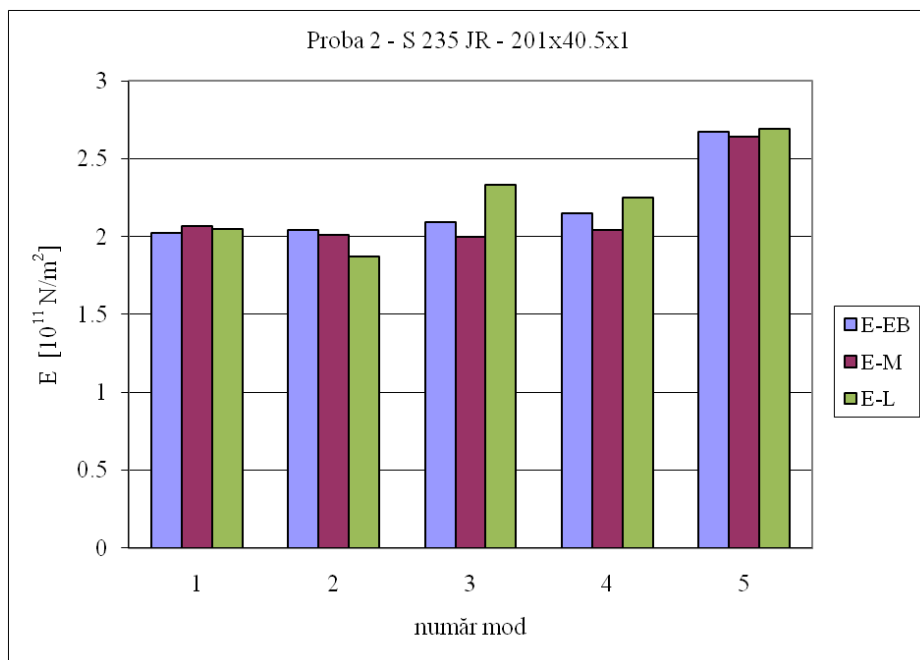


Figura A13.1 Modulul de elasticitate E pentru primele 5 moduri de încovoiere

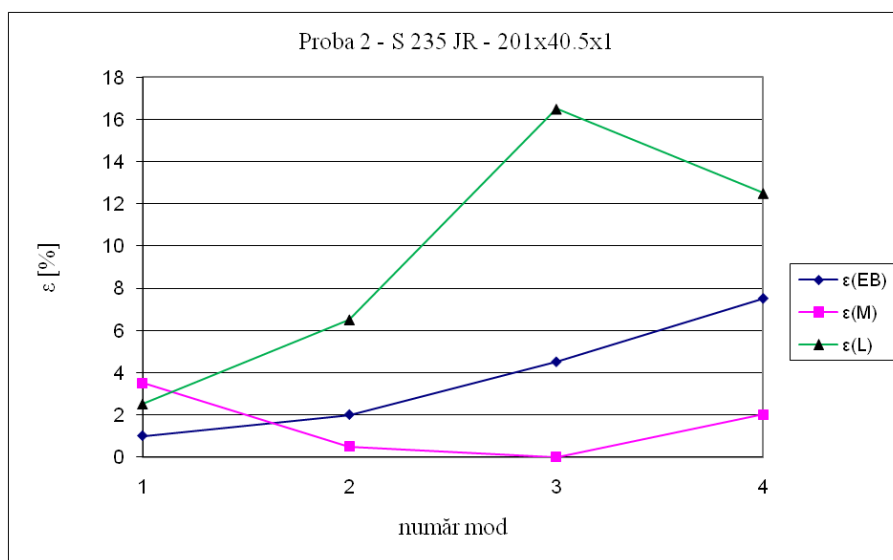


Figura A13.2 Abaterile valorilor experimentale ale modulului de elasticitate E pentru proba 2, oțel S 235 JR 1 mm grosime

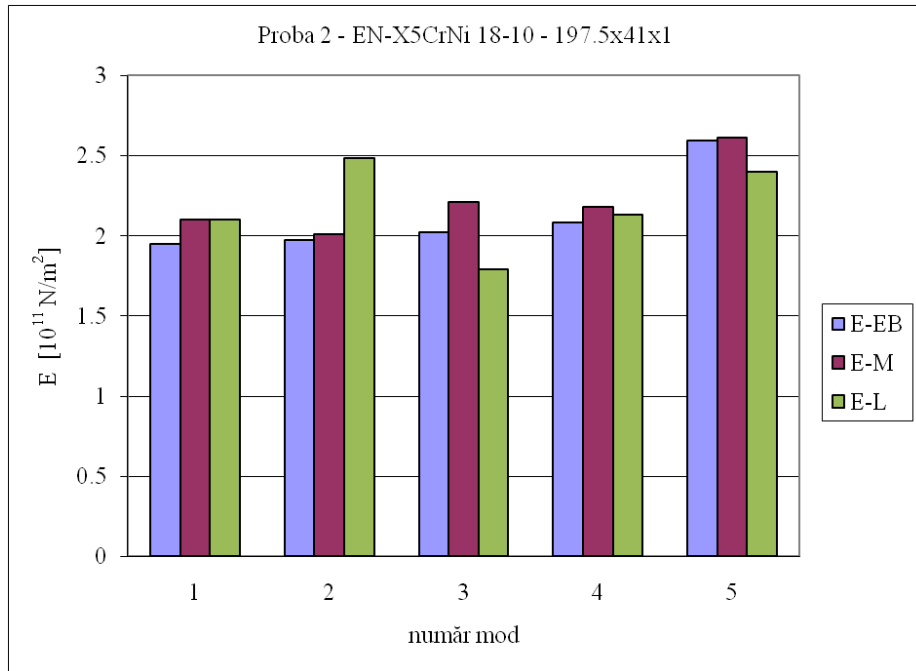


Figura A13.3 Modulul de elasticitate E pentru primele 4 moduri de încovoiere

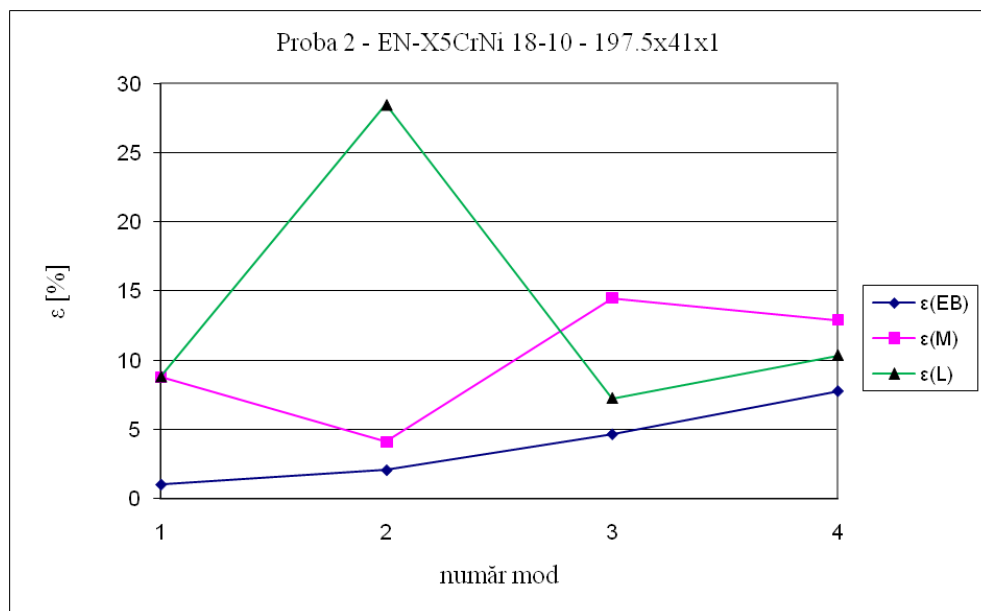


Figura A13.4 Abaterile valorilor experimentale ale modului de elasticitate E pentru proba 2, din oțel inoxidabil EN-X5CrNi 18-10 de 1 mm grosime

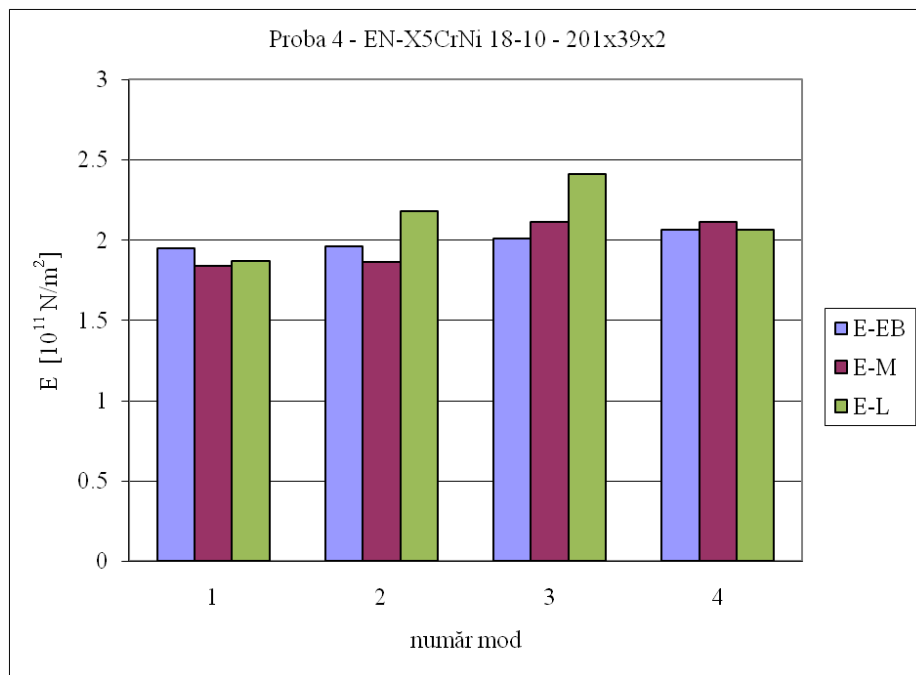


Figura A13.5 Modulul de elasticitate E pentru primele 4 moduri de încovoiere

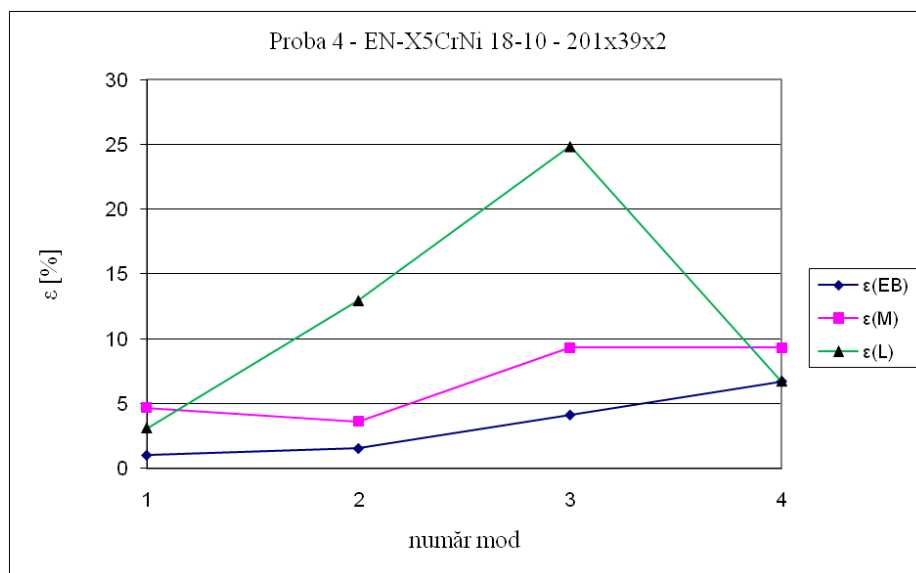


Figura A13.6 Abaterile valorilor experimentale ale modulului de elasticitate E pentru proba 4, din oțel inoxidabil EN-X5CrNi 18-10 de 2 mm grosime

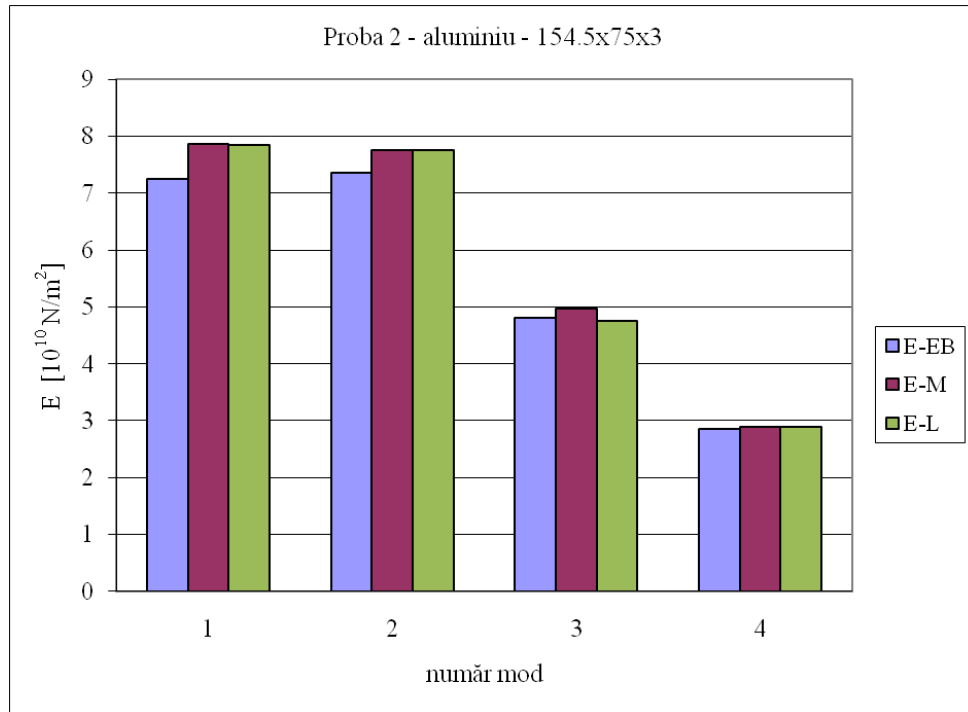


Figura A13.7 Modulul de elasticitate E pentru primele 4 moduri de încovoiere

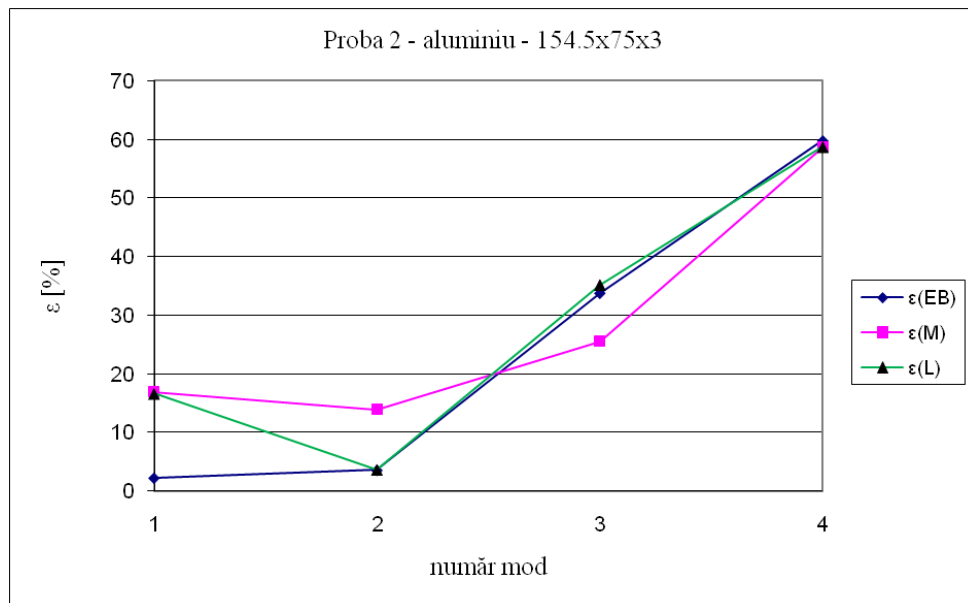


Figura A13.8 Abaterile valorilor experimentale ale modulului de elasticitate E pentru proba 2, din aluminiu 3 mm grosime

ANEXA 14

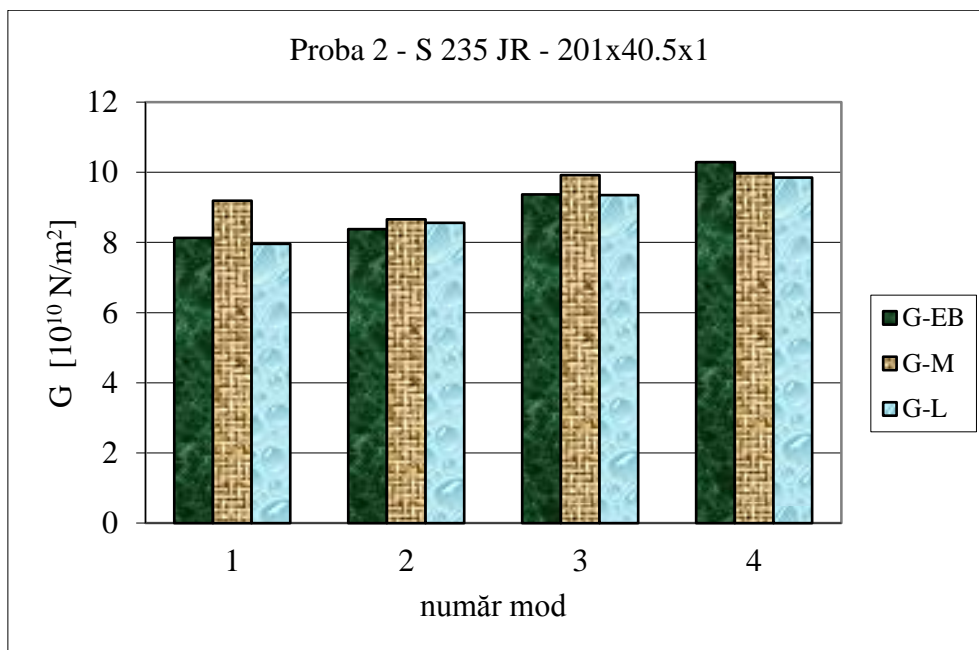


Figura A14.1 Modulul de elasticitate G pentru primele 4 moduri de încovoiere

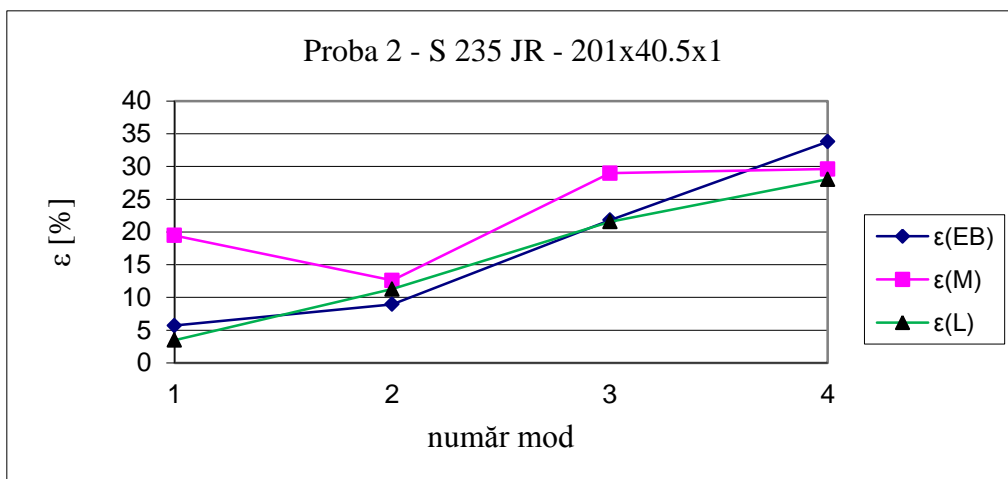


Figura A14.2 Abaterile valorilor experimentale ale modulului de elasticitate G pentru proba 2, oțel S 235 JR 1 mm grosime

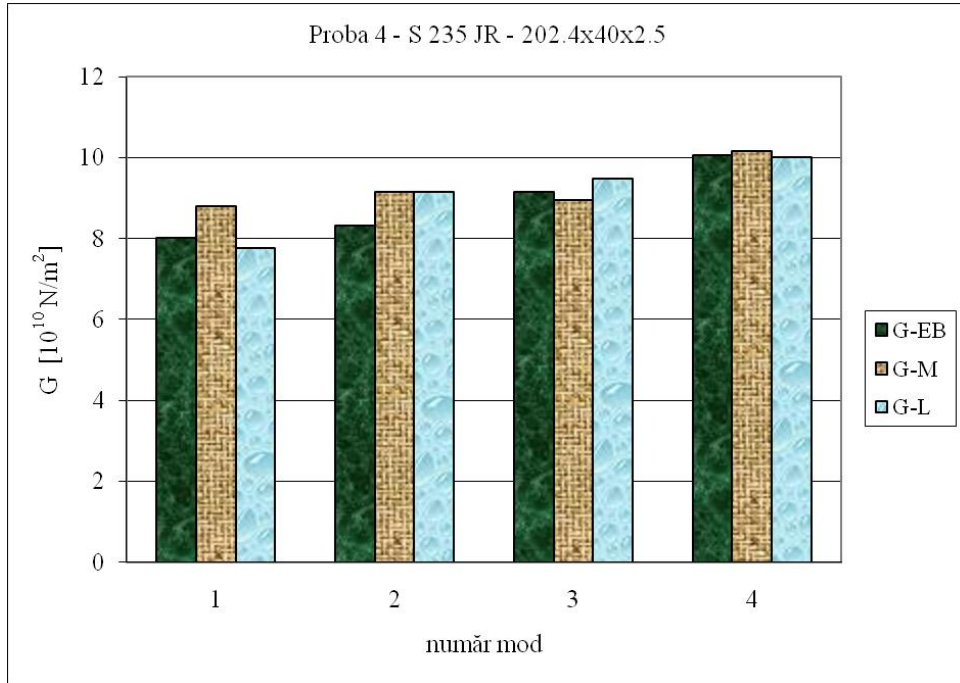


Figura A14.3 Modulul de elasticitate G pentru primele 4 moduri de încovoiere

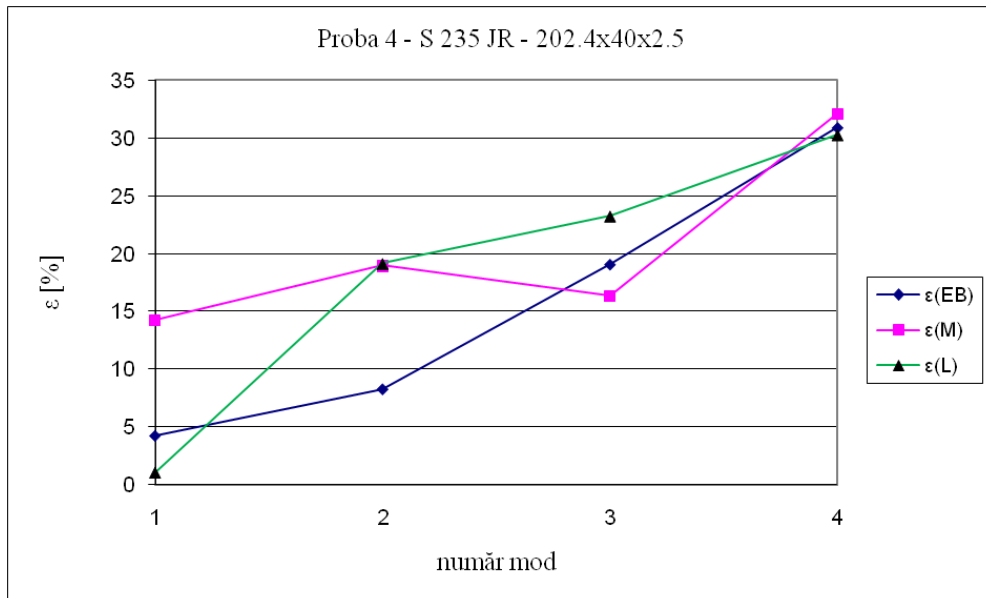


Figura A14.4 Abaterile valorilor experimentale ale modulului de elasticitate G pentru proba 4, oțel S 235 JR de 2,5 mm grosime

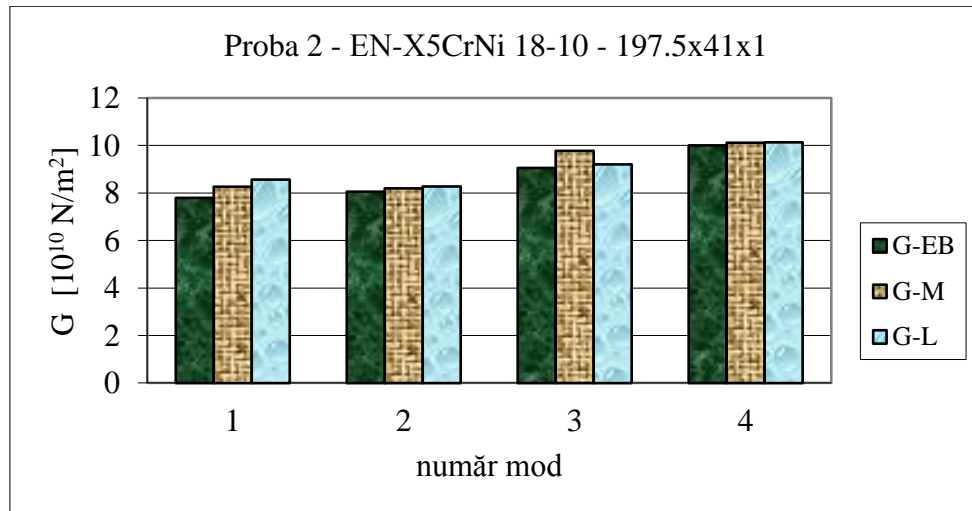


Figura A14.5 Modulul de elasticitate G pentru primele 4 moduri de încovoiere

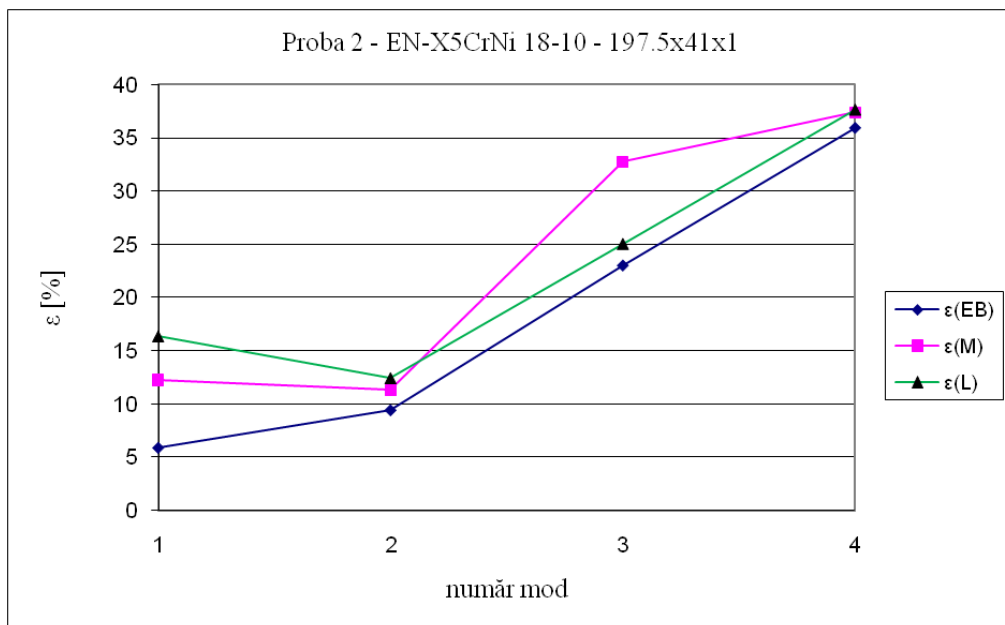


Figura A14.6 Abaterile valorilor experimentale ale modulului de elasticitate G pentru proba 2, inox, EN-X5CrNi 18-10 de 1 mm grosime

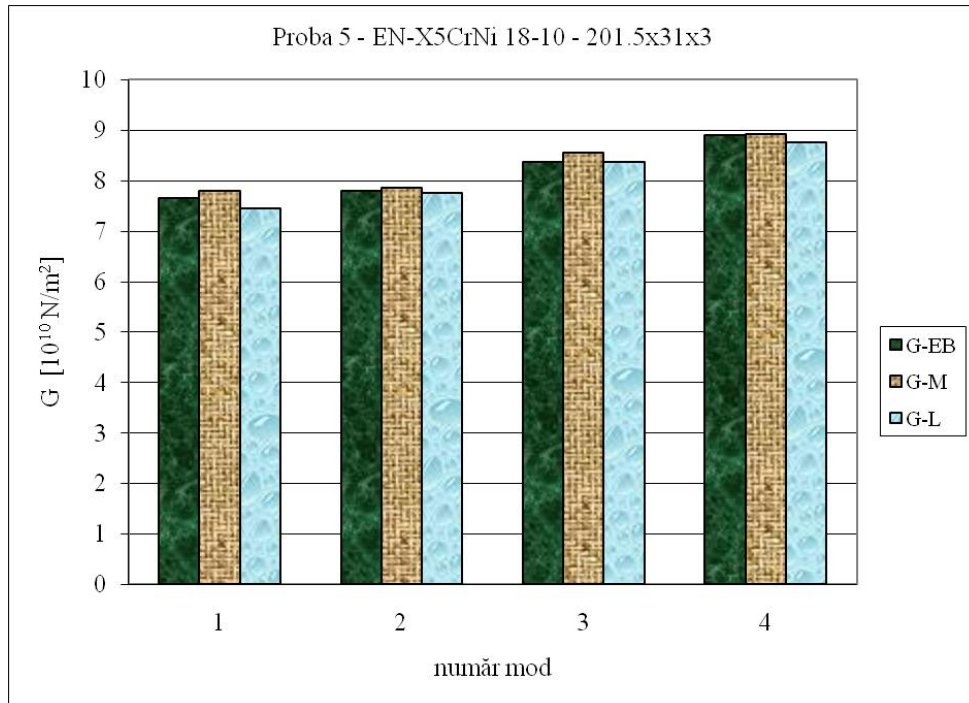


Figura A14.7 Modulul de elasticitate G pentru primele 4 moduri de încovoiere

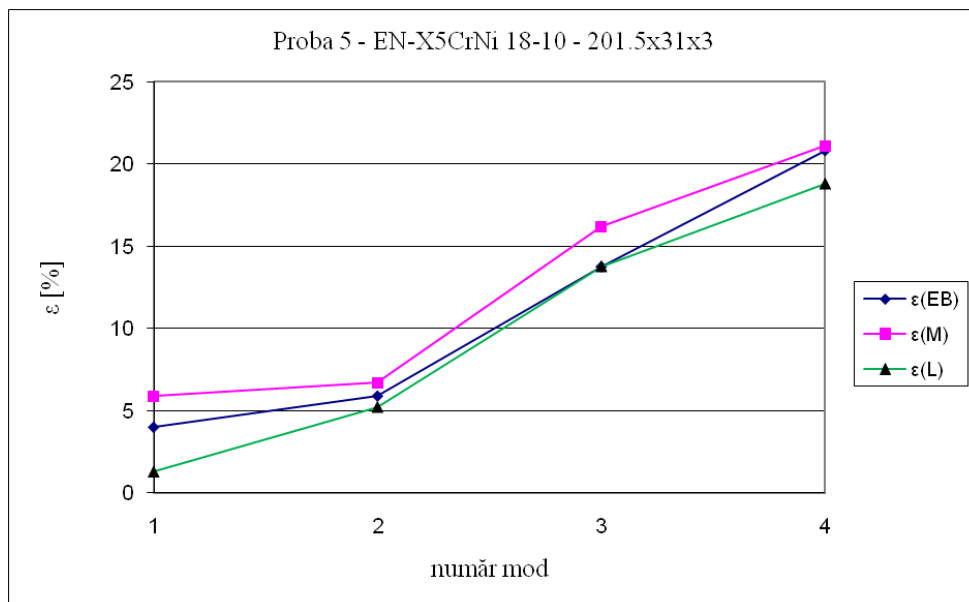


Figura A14.8 Abaterile valorilor experimentale ale modulului de elasticitate G pentru proba 5, inox, EN-X5CrNi 18-10 de 3 mm grosime

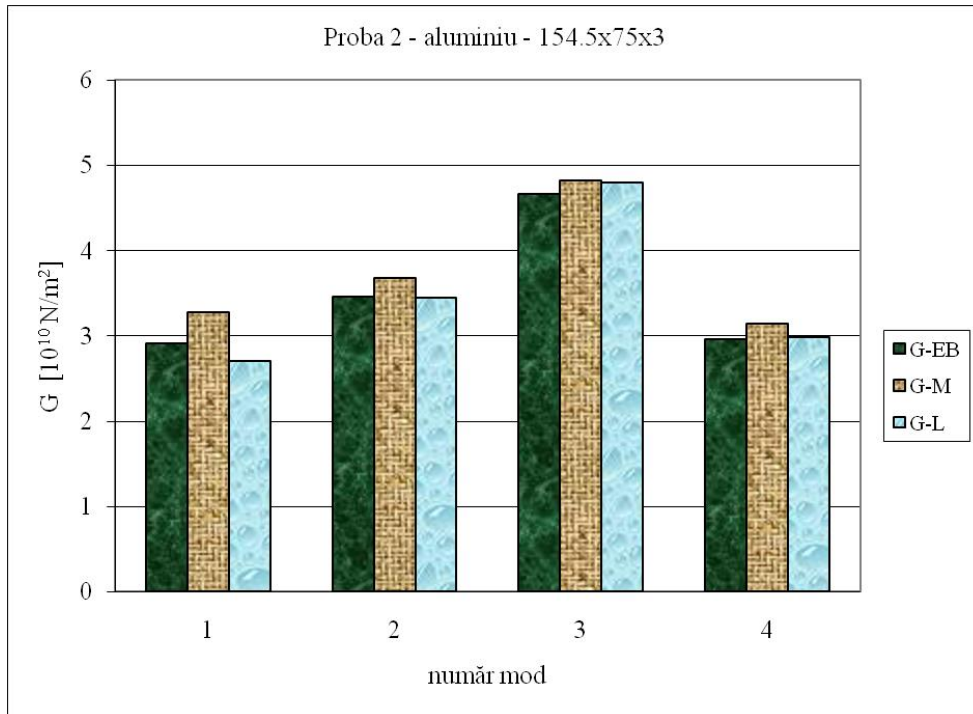


Figura A14.9 Modulul de elasticitate G pentru primele 4 moduri de încovoiere

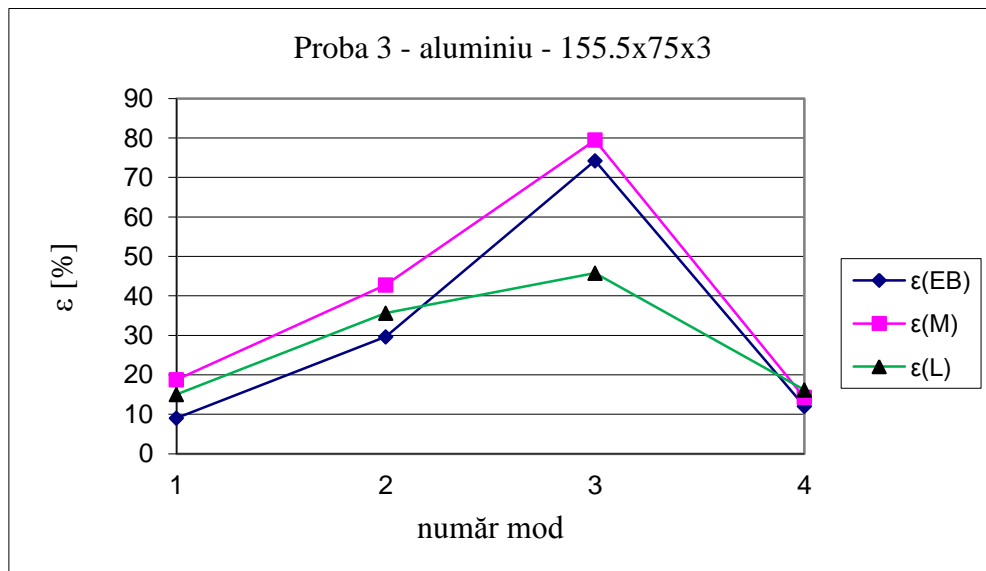


Figura A14.10 Abaterile valorilor experimentale ale modulului de elasticitate G pentru proba 2, din aluminiu, 3 mm grosime