

INFLUENȚA FACTORILOR CONSTRUCTIVI ȘI FUNCȚIONALI ASUPRA REZISTENȚEI MECANICE LA SOLICITĂRI STATICE ȘI VARIABILE A CONDUCTOARELOR DE ÎNALTĂ TENSIUNE

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

ing. Daniel Vasile Achiriloaiei

Conducător științific: prof.univ. emerit dr.ing Ion Dumitru
Referenți științifici: prof.univ.dr.ing. Gilbert-Rainer Gillich
prof.univ.dr.ing. Mircea Cristian Dudescu
prof.univ.dr.ing. Liviu Marsavina

Ziua susținerii tezei: 14.12.2018

Seriile Teze de doctorat ale UPT sunt:

- | | |
|---|---------------------------------------|
| 1. Automatică | 10. Știința Calculatoarelor |
| 2. Chimie | 11. Știința și Ingineria Materialelor |
| 3. Energetică | 12. Ingineria sistemelor |
| 4. Ingineria Chimică | 13. Inginerie energetică |
| 5. Inginerie Civilă
informației | 14. Calculatoare și tehnologia |
| 6. Inginerie Electrică | 15. Ingineria materialelor |
| 7. Inginerie Electronică și Telecomunicații | 16. Inginerie și Management |
| 8. Inginerie Industrială | 17. Arhitectură |
| 9. Inginerie Mecanică | 18. Inginerie civilă și instalații |

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, 2018

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./fax 0256 403823
e-mail: editura@edipol.upt.ro

Cuvânt înainte

Teza de doctorat a fost elaborată pe parcursul activității mele în cadrul departamentului de Mecanică și Rezistența Materialelor, a Facultății de Mecanică din Universitatea Politehnică Timișoara.

Lucrarea de față abordează un subiect de mare actualitate, având în vedere rolul pe care îl joacă liniile electrice aeriene în siguranța și securitatea națională. Aceasta a fost concepută și realizată cu scopul rezolvării unor probleme ce privesc comportarea mecanică a conductoarelor electrice aeriene, ca urmare a exploatării îndelungate. E studiată astfel o problemă importantă atât pentru inginerii care proiectează linii de înaltă tensiune, cât mai ales pentru cei care exploatează aceste linii. Elementul vital al unei linii de înaltă tensiune este conductorul, care se prezintă sub forma unor structuri compozite realizate dintr-un număr variabil de sârme ce prezintă proprietăți diferite. Conceperea unor conductoare care să asigure și o rezistență mecanică cât mai ridicată impune o abordare cât mai temeinică și o analiză în detaliu a tuturor factorilor constructivi și funcționali. Procesele de fabricație ale sârmelor și ale conductoarelor, precum și factorii determinați de condițiile reale care apar în exploatare, specifici zonelor pe care liniile electrice le străbat, particularizează modul și durata de viața a acestora. Totodată se ia în calcul fenomenul de oboseală pentru cazul conductoarelor electrice de înaltă tensiune, generat de vibrațiile eoliene și se face o analiză comparativă între un conductor nou și unul folosit în exploatare timp de 42 de ani.

Mulțumiri deosebite se cuvin conducătorului de doctorat prof.emerit dr.ing. Ion DUMITRU și de asemenea, colegilor din departamentul de Mecanică și Rezistența Materialelor sau departamentele cu care am colaborat, cât și celor din afara Facultății pentru ajutorul și sprijinul acordat.

De asemenea, îmi manifest cu drag recunoștința față de familia mea atât pentru suportul susținut, cât și pentru răbdarea și înțelegerea acordată în toți acești ani, aparent interminabili.

Timișoara, Decembrie 2018

Daniel Achiriloaiei

Familiei mele, cu multă recunoștință

Teza de doctorat a fost realizată cu sprijin parțial din grantul strategic POSDRU/159/1.5/S/134378 (2014) Al Ministerului Național de Educație, România, cofinanțat de Fondul Social European "Investește în oameni", în cadrul Programului Operațional Sectorial Dezvoltare Resurse Umane 2007-2013.

Achiriloaiei, Daniel

Influența factorilor constructivi și funcționali asupra rezistenței mecanice la solicitări statice și variabile a conductoarelor de înaltă tensiune

Teze de doctorat ale UPT, Seria 9, Nr. 182, Editura Politehnica, 2018, 147 pagini, 114 figuri, 29 tabele.

ISSN:1842-4937

ISBN:978-606-35-0261-3

Cuvinte cheie: conductoare, sârme, amprente, contact, oboseală, vibrații, îmbătrânire, ecrusare, coroziune, duritate, săgeata, încercări experimentale, simulare numerică.

Rezumat,

Tematica tezei se încadrează în noile direcții de cercetare privind transportul și distribuția energiei electrice, abordând conceptul durabilității conductoarelor electrice de înaltă tensiune în condițiile sarcinilor variabile generate de vibrațiile eoliene. Conductoarele de înaltă tensiune sunt materialele compozite cu cea mai mare importanță în transportul de energie, având în vedere rolul pe care îl joacă în securitatea națională.

Teza de doctorat sintetizează problematicile mecanismelor de degradare și efectele manifestate de acestea asupra conductoarelor, personalizate pe condițiile impuse de exploatare din zona de vest a României. Având în vedere duratele lungi de exploatare ale acestor linii aeriene și condițiile impuse de mediul înconjurător, se evidențiază o serie de elemente care stau la baza dezvoltării fenomenului de oboseală.

Am pornit de la o documentare teoretică cu privire la stadiul actual al cercetărilor în domeniul studiat, am identificat procesele tehnologiei de fabricație ce au efecte nefavorabile asupra duratei de viață și am făcut un studiu pe conductoare noi și conductoare aflate în serviciu timp de 42 de ani. Cu ajutorul probelor și datelor prelevate s-au făcut o serie de cercetări experimentale și simulări numerice cu elemente finite, în vederea determinării rezistenței mecanice și a analizei ruperii la oboseală, folosind metode și procedee de calcul de actualitate. Rezultatele evidențiază o analiză comparativă pe conductoare noi și îmbătrânite, tip 450/75, identificarea factorilor externi cu efecte nefavorabile asupra conductoarelor, localizarea punctelor cu risc ridicat de apariție a ruperilor, simularea contactului sârmelor și vibrațiilor conductorului, detalierea și aprofundarea modului de manifestare a fenomenului de oboseală a conductoarelor în vederea creșterii durabilității liniilor electrice aeriene.

CUPRINS

Notaiii, abrevieri, acronime	7
Listă de tabele	10
Listă de figuri.....	11
1. CONSIDERAȚII GENERALE PRIVIND DURABILITATEA CONDUCTOARELOR ELECTRICE DE ÎNALTĂ TENSIUNE. STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRIILOR ...	16
1.1. Liniile electrice aeriene–Problematică actuală	16
1.2. Solicitării mecanice ale conductoarelor datorate încărcărilor statice	17
1.3. Vibrațiile conductoarelor electrice aeriene	19
1.4. Oboseala conductoarelor electrice aeriene	20
1.5. Siguranța în funcționare a liniilor electrice aeriene	22
2. PARTICULARITĂȚI PRIVIND INFLUENȚA TEHNOLOGIILOR DE FABRICAȚIE ASUPRA DURABILITĂȚII CONDUCTOARELOR LEA.....	24
2.1. Tipuri de conductoare electrice ale LEA.....	24
2.1.1. Rolul și importanța conductoarelor în cadrul rețelelor LEA	24
2.1.2. Descrierea și clasificarea conductoarelor	24
2.1.3. Conductoarele active	25
2.1.4. Conductoarele de gardă	27
2.2. Influența tehnologiilor de fabricație asupra caracteristicile mecanice ale conductoarelor.....	28
2.2.1. Considerații generale asupra aluminului folosit la fabricarea sârmelor din componența conductoarelor.....	28
2.2.2. Influența proceselor tehnologice de obținere a sârmelor de aluminiu asupra proprietăților acestora	28
2.2.3. Influența proceselor tehnologice de obținere a sârmelor de oțel asupra proprietăților acestora.....	32
2.2.4. Apariția unor concentratori de tensiune din procesul de toronare.....	32
2.3. Observații și concluzii	34
3. CERCETĂRI PRIVIND INFLUENȚA MEDIULUI DE LUCRU ASUPRA CARACTERISTICILOR MECANICE ALE CONDUCTOARELOR LEA	35
3.1. Factori de mediu specifici zonei de vest a țării	35
3.2. Tipuri de probe folosite în cadrul lucrării	37
3.2.1. Microgeometria sârmelor de aluminiu în starea inițială	39
3.3. Evaluarea efectului de îmbătrânire folosind metoda spectroscopiei cu raze X	40
3.3.1. Considerații generale privind microscopia electronică	40
3.3.2. Detecția cu raze X pe conductoare noi și îmbătrânite	40
3.3.3. Spectroscopia de radiație X cu dispersie de energie	42
3.3.4. Aplicarea termografiei pentru analiza sârmelor de aluminiu	45
3.3.5. Particularități ale coroziunii conductoarelor după perioade lungi de exploatare	46
3.4. Contribuții privind influența vitezei vântului asupra presiunii dinamice folosind simularea numerică a curgerii.....	48
3.4.1. Particularități ale curgerii aerului peste un conductor	49
3.4.2. Tipuri de vibrații generate de vant și efectele acestora asupra conductoarelor	52
3.4.3. Simularea curgerii aerului peste conductorul 450/75	54
3.4.4. Modelul de discretizare și procesarea rezultatelor numerice	56
3.4.5. Prelucrarea și interpretarea rezultatelor	61
3.5. Evaluarea stărilor de deformații pe baza săgeților reale ale conductorului ..	65
3.5.1. Determinarea săgeții conductorului 450/75.....	65

3.5.2. Aplicarea ecuației Poffenberger–Swart pentru calculul tensiunilor din conductor	69
3.6. Observații și concluzii	70
4. ANALIZA STĂRILOR DE TENSINI ȘI DEFORMĂȚII LA CONTACTUL DINTRE SĂRMELE CONDUCTORULUI	72
4.1. Considerații generale privind contactul sârmelor în clemele de fixare ale conductorului	72
4.2. Elemente de mecanica și fizica contactului	73
4.3. Teoria lui Hertz cu privire la contactul corpurilor	74
4.4. Contactul cilindru-cilindru	76
4.5. Modelarea cu elemente finite a contactului dintre sârmele de aluminiu	80
4.5.1. Definierea modelului geometric	80
4.5.2. Discretizarea modelului de calcul	81
4.5.3. Condiții la limită acceptate	82
4.5.4. Încărcări aplicate modelului de calcul	83
4.5.5. Rezultatele obținute și interpretarea lor	84
4.6. Observații și concluzii	87
5. CERCETĂRI PRIVIND INFLUENȚA AMPRENTELOR ȘI A ÎMBĂTRÂNIRII ASUPRA CARACTERISTICILOR MECANICE ALE CONDUCTOARELOR	88
5.1. Dispozitive și echipamente concepute pentru încercări la solicitări statice și variabile	88
5.1.1. Proiectarea dispozitivelor port-piesă	88
5.1.2. Caracteristicile dispozitivelor pentru amprentarea sârmelor	89
5.1.3. Caracteristicile dispozitivelor pentru încercarea la oboseală a sârmelor ..	90
5.2. Cercetări experimentale asupra zonelor de contact dintre sârmele de aluminiu	91
5.2.1. Influența presiunii de contact asupra evoluției amprentelor	91
5.2.2. Influența duratei de exploatare asupra durității sârmelor de aluminiu ..	98
5.3. Evaluarea influenței duratei de exploatare a sârmelor de aluminiu pe baza rezistenței la forfecare	101
5.4. Particularități ale îndoirii alternante a sârmelor de aluminiu	104
5.5. Particularități privind ruperea la răsucire a sârmelor conductorului 450/75	105
5.6. Influența amprentelor și a îmbătrânirii asupra caracteristicilor mecanice ale sârmelor de aluminiu	107
5.7. Încercarea la tracțiune a conductorului 450/75	114
5.8. Observații și concluzii	116
6. CERCETĂRI PRIVIND REZISTENȚA LA OBOSEALĂ A SĂRMELOR ȘI A CONDUCTORULUI 450/75	118
6.1. Modelarea cu elemente finite a ansamblului conductor-clemă	118
6.1.1. Definierea modelului geometric	118
6.1.2. Discretizarea modelului de calcul	120
6.1.3. Încărcări aplicate modelului de calcul	121
6.1.4. Rezultatele obținute și interpretarea lor	124
6.2. Încercări experimentale la oboseală a conductorului 450/75	128
6.3. Cercetări privind rezistența la oboseală a sârmelor de aluminiu	130
6.4. Analiza fractografică a sârmelor rupte prin oboseală	135
6.5. Concluzii	138
7. CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE	139
BIBLIOGRAFIE	143

Notații, abrevieri, acronime

a	Coeficient de dilatare liniară	
A_{i30}	Aria suprafeței amprente, pentru sârma îmbătrânită și $\varphi=30^\circ$	[mm ²]
A_{i60}	Aria suprafeței amprente, pentru sârma îmbătrânită și $\varphi=60^\circ$	[mm ²]
A_{i90}	Aria suprafeței amprente, pentru sârma îmbătrânită și $\varphi=90^\circ$	[mm ²]
A_n	Alungirea la rupere	[%]
A_{n30}	Aria suprafeței amprente, pentru sârma nouă și $\varphi=30^\circ$	[mm ²]
A_{n60}	Aria suprafeței amprente, pentru sârma nouă și $\varphi=60^\circ$	[mm ²]
A_{n90}	Aria suprafeței amprente, pentru sârma nouă și $\varphi=90^\circ$	[mm ²]
A_t	Alungirea totală	[%]
CM I	Condiții meteo I	
CM II	Condiții meteo II	
d_0	Diametrul secțiunii inițiale	[mm]
d_u	Diametrul secțiunii ultime	[mm]
d_v	Diagonală pătrat Vickers	[mm]
d_x	Axa mare a amprente	[mm]
d_y	Axa mică a amprente	[mm]
e_c	Excentricitatea	[mm]
E_a	Modulul de elasticitate longitudinal al aluminiului	[N/mm ²]
EI	Rigiditatea la încovoiere a conductorului	[N/mm ²]
f	Săgeata	[m]
f_I	Săgeata în condițiile meteo CM I	[m]
f_{II}	Săgeata în condițiile meteo CM II	[m]
f_i	Săgeata în deschiderea i	[m]
f_s	Frecvența Strouhal	[Hz]
f_r	Frecvența	[Hz]
F_A	Forța amplitudine	[N]
F_{max}	Forța maximă la rupere	[N]
FRN	Forța de rupere nominală a conductorului	[N]
F_u	Sarcina ultimă	[N]
g	Greutatea specifică	[N/m ³]
G	Modulul de elasticitate transversal	[MPa]
H	Forța axială aplicată conductorului (încărcarea inițială)	[N]

8 Notății, abrevieri, acronime

Ha	Adâncimea de penetrare	[mm]
HB	Duritatea Brinell	[MPa]
HV	Duritatea Vickers	[MPa]
l	Deschiderea între stâlpi	[m]
l _e	Lungimea deschiderii echivalente	[m]
l _f	Lungimea fisurii	[mm]
l _i	Lungimea deschiderii panoului i	[m]
L ₀	Lungimea inițială între repere	[mm]
L ₁	Lungimea domeniului în amonte de conductor	[mm]
L ₂	Lungimea domeniului de analiză în aval de conductor	[mm]
L _u	Lungimea ultimă între repere	[mm]
n	Număr de straturi ale conductorului	[-]
n'	Număr de sârme ale conductorului	[-]
N	Număr de cicluri	[-]
p	Panta axei conductorului în raport cu direcția forței H	[°]
P	Presiunea (cap. 4)	[Pa]
P	Componenta normală a forței (cap. 5)	[N]
R	Coefficient de asimetrie	[-]
Ra	Media aritmetică a tuturor vârfulor de pe probă	[μm]
Rq	Abaterea medie pătratică a parametrului Ra	[μm]
Rt	Adâncimea totală de rugozitate	[μm]
Ry	Adâncimea maximă de rugozitate	[μm]
Rz	Înălțimea maximă de rugozitate	[μm]
R _e	Limita de curgere aparentă	[N/mm ²]
R _p	Limita de curgere convențională	[N/mm ²]
R _{p0.2}	Rezistența la alungire	[N/mm ²]
R _m	Rezistența la rupere	[N/mm ²]
S ₀	Aria secțiunii inițiale	[mm ²]
S _u	Aria secțiunii ultime	[mm ²]
t	Temperatura	[°C]

U	Viteza fluidului liber	[m/s]
U_0	Viteza de intrare a fluidului	[m/s]
γ_b	Deplasarea pe verticală	[mm]
Z	Gâtuirea la rupere	[%]
α	Coeficient de variație a rezistivității cu temperatura	[1/°C]
β	Unghiul de înclinare al conductorului față de clema de susținere	[°]
ψ	Gâtuirea la rupere	[%]
ϵ_a	Deformația la încovoiere a sârmei de Al de pe stratul exterior	[%]
μ	Coeficientul de frecare	[-]
ΔK	Factorul de intensitate al tesionii	[-]
ΔL	Lungirea epruvetei	[mm]
ΔP	Diferența de presiune	[Pa]
φ	Unghiul de amprentare	[°]
λ	Coeficient de dilatare liniară	[1/°C]
ν	Coeficientul lui Poisson la deformație	[-]
ν	Coeficientul de vâscozitate cinematică	[m ² /s]
ρ	Densitatea	[g/cm ³]
$\rho_{20^\circ\text{C}}$	Rezistivitatea la 20°C	[$\Omega\text{mm}^2/\text{m}$]
σ	Tensiunea	[N/mm ²]
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	Tensiunile după cele trei direcții	[N/mm ²]
σ_a	Amplitudinea tensiunii, la încovoierea sârmei de aluminiu	[N/mm ²]
σ_A	Limită de proporționalitate	[N/mm ²]
σ_B	Limită de elasticitate	[N/mm ²]
σ_c	Limită de curgere	[N/mm ²]
σ_e	Tensiunea specifică la limita de elasticitate	[N/mm ²]
σ_{ech}	Tensiunea echivalentă	[N/mm ²]
σ_R	Rezistența la oboseală	[MPa]
τ	Tensiunea tangențială	[MPa]
τ_f	Rezistența la forfecare	[MPa]
τ_{rm}	Rezistența la forfecare medie	[MPa]

Listă de tabele

Tabel	Denumire	Pagina
2.1.	Tipurile și concentrațiile limită ale elementelor chimice	30
2.2.	Proprietățile mecanice și fizice ale metalelor pentru conductoare	30
2.3.	Proprietățile generale ale aluminiului	31
3.1.	Caracteristicile conductorului și ale sârmelor din componență acestuia	37
3.2.	Caracterizarea microgeometriei sârmelor de aluminiu noi	39
3.3.	Proprietățile elementelor chimice întâlnite pe suprafața sârmelor	44
3.4.	Correspondența între numărul Reynolds și numărul Strouhal pentru o secțiune circulară	51
3.5.	Principale caracteristici ale vibrațiilor conductoarelor	53
3.6.	Definirea domeniului de analiză și a condițiilor limită	55
3.7.	Grade Beaufort ale intensității vântului folosite pentru simulare	56
3.8.	Valorile maxime ale presiunilor	64
3.9.	Săgeata și tensiunea de montaj a conductoarelor	66
3.10.	Determinarea săgeții reale a conductorului	69
4.1.	Schema de discretizare sârmelor de Al	83
5.1.	Caracteristicile geometrice ale amprentelor	95
5.2.	Caracteristicile de stare ale suprafeței sârmelor de aluminiu pentru diferite forțe de amprentare	102
5.3.	Valorile rezistenței la forfecare pentru sârmele de Al	104
5.4.	Valorile caracteristicilor dimensionale obținute la temperatura de 20°C	112
5.5.	Valorile caracteristicilor mecanice obținute la temperatura de 20°C	113
5.6.	Rezultatele obținute pentru 30% FRN = 49.227N	117
5.7.	Rezultatele obținute pentru 50% FRN = 82.045N	117
5.8.	Rezultatele obținute pentru 70% FRN = 11.4863N	117
5.9.	Rezultatele obținute pentru 85% FRN = 139.476,5N	117
5.10.	Rezultatele obținute la ruperea finală a conductorului	117
6.1.	Proprietățile materialelor componente	122
6.2.	Schema de discretizare pentru modelul conductor-clemă	123
6.3.	Tensiuni și deformații înregistrate în analiza solicitărilor statice și dinamice	129
6.4.	Parametri de testare la oboseală a conductorului	133
6.5.	Valorile parametrilor de oboseală a sârmelor	136

Listă de figuri

Figura	Denumire Capitolul 1	Pagina
	Capitolul 1	
1.1.	Liniile electrice aeriene – imagine de ansamblu	17
1.2.	Fixarea conductoarelor în clemele de susținere	18
1.3.	Principale tipuri de vibrații ale conductoarelor [Černín, 2008]	19
1.4.	Aspectul unor fisuri dezvoltate de fenomenul de oboseală	21
	Capitolul 2	
2.1.	Disponerea conductoarelor LEA: Ot – de gardă; Ot-Al – active	25
2.2.	Conductoare multifilare: a) fără fir axial; b) cu fir axial; c) bimetalice	26
2.3.	Sensul de toronare al conductorului; a) S – spre stânga; b) Z – spre dreapta	27
2.4.	Procesul de trefilare a sârmelor	29
2.5.	Defecte structurale ale sârmelor de aluminiu	30
2.6.	Toronarea conductoarelor oțel-aluminiu, senzori de înfășurare	33
2.7.	Tipuri și zone de contact între sârmele conductorului Contact de tip I – contact liniar; Contact de tip II – contact punctiform	33
	Capitolul 3	
3.1.	Rețele de înaltă tensiune, prezente în zona de vest a țării	38
3.2.	Imagine de ansamblu a conductorului: a- secțiunea conductorului; b- straturile de înfășurare; c- îmbătrânit; d- nou	38
3.3.	Imagine de pe suprafața sârmelor de aluminiu: a) sârmă nouă; b) sârmă îmbătrânită	41
3.4.	Formațiuni de particule de la suprafața conductoarelor	42
3.5.	Spectrul de radiație X caracteristic pentru sârma nouă	43
3.6.	Spectrul de radiație X caracteristic pentru sârma îmbătrânită	43
3.7.	Termograma DSC - sârmă de Al nouă	45
3.8.	Termograma DSC - sârme de Al îmbătrânite: [2] - probă din câmp; [3] - probă din clemă	46
3.9.	Aspectul golurilor din material; (a) goluri de suprafață; (b) goluri de profunzime; (c)-[Azom, 2016]) reacție chimică specifică golurilor din material	47
3.10.	Tipuri de coroziune: (a) pete de coroziune; (b) coroziunea de oboseală; (c) coroziunea prin frecare	47
3.11.	Modul de formare al vârtejurilor la curgerea peste un cilindru; a) Karman – 1912 [Irvine, 2005] b) Gerrard - 1966[Șandor, 2005]	50

12 Listă de figuri

3.12.	Instalației de marcarea a curgerii fluxului de aer. Detalii de curgere peste profilul conductorului	50
3.13.	Aspectul conductorului în vecinătatea clemei: a) conductor în staționare, vedere laterală; b) conductor încovoiat, vedere de sus; c) conductor încovoiat, vedere laterală; d) conductor torsionat, vedere de sus; e) conductor torsionat, vedere de ansamblu	54
3.14.	Domeniul de analiză și condițiile limită pe frontieră	55
3.15.	Evoluția zonei de recirculare în aval de cilindru, la diferite viteze de curgere	58
3.16.	Descrierea stratului limită dat de liniile de curgere	59
3.17.	Variația presiunii totale și a liniilor de curgere pentru viteza de 1,6m/s	59
3.18.	Variația presiunii totale și a liniilor de curgere pentru viteza de 3m/s	60
3.19.	Variația presiunii totale și a liniilor de curgere pentru viteza de 5m/s	60
3.20.	Variația presiunii totale și a liniilor de curgere pentru viteza de 10m/s	60
3.21.	Variația presiunii totale și a liniilor de curgere pentru viteza de 20m/s	61
3.22.	Variația presiunii totale și a liniilor de curgere pentru viteza de 27m/s	61
3.23.	Diagrama de distribuție a presiunii pe suprafața cilindrului la viteza de 1,6m/s	62
3.24.	Diagrama de distribuție a presiunii pe suprafața cilindrului la viteza de 3m/s	62
3.25.	Diagrama de distribuție a presiunii pe suprafața cilindrului la viteza de 5m/s	62
3.26.	Diagrama de distribuție a presiunii pe suprafața cilindrului la viteza de 10m/s	62
3.27.	Diagrama de distribuție a presiunii pe suprafața cilindrului la viteza de 20m/s	63
3.28.	Diagrama de distribuție a presiunii pe suprafața cilindrului la viteza de 27m/s	63
3.29.	Diagrama de variație a diferenței de presiune	64
3.30.	Tahimetru electronic Leica 1103+	67
3.31.	Aspectul curbilor conductorului în cazul CM I și CM II	68
3.32.	Detaliu 1 - fixarea conductorului în clema de susținere	68

Capitolul 4

4.1.	Fixarea conductorului în clemă; a) secțiune conductor - direcții și sensuri de mișcare; b) vedere de sus - zone de contact conductor-clemă; c) vedere laterală - zone de contact	73
4.2.	Contactul dintre două sfere [Johnson, 2010]	75
4.3.	Distribuția tensiunilor din interiorul unui corp în zona de contact [Dumitru]	77
4.4.	Dispunerea axelor de orientare a două sârme în contact	79
4.5.	Contactul între două sârme cu același diametru	80
4.6.	Modelul geometric al sârmei de aluminiu	82
4.7.	Discretizarea cu elemente finite a modelului de calcul sârmă de aluminiu	83

4.8.	Condiții pe contur aplicate la simularea solicitării de amprentare	84
4.9.	Pozițiile și tipurile cailor de evaluare de pe modele	84
4.10.	Simularea solicitării la amprentare a sârmelor de aluminiu	85
4.11.	Localizarea zonelor de inițiere a fisurilor din contactul sârmelor	86
4.12.	Variația tridimensională a dimensiunilor amprentelor pentru cele trei unghiuri de amprentare φ	87
4.13.	Variația tensiunilor echivalente von Mises pentru cele trei unghiuri de amprentare	88
Capitolul 5		
5.1.	Dispozitive pentru fixarea sârmelor. Fixarea dispozitivelor pe mașina de încercat	91
5.2.	Dispozitive de fixare a sârmelor pentru încercarea la oboseală	92
5.3.	Tipuri de contacte întâlnite între sârmele conductorului	93
5.4.	Poziționarea sârmelor de testat, montarea dispozitivelor în bacurile mașinii de încercat	94
5.5.	Imaginea suprafețelor amprentate, determinări dimensionale	94
5.6.	Aspectul amprentatelor la diferite unghiuri de amprentare; a-90°, b-60°, c-30°	95
5.7.	Variația suprafeței amprentei în funcție de forța de apăsare, pentru sârmele noi și $\varphi=30^\circ$	97
5.8.	Variația suprafeței amprentei în funcție de forța de apăsare, pentru sârmele noi și $\varphi=60^\circ$	97
5.9.	Variația suprafeței amprentei în funcție de forța de apăsare, pentru sârmele noi și $\varphi=90^\circ$	98
5.10.	Variația comparativă a suprafeței amprentelor în funcție de forța de apăsare, pentru sârmele noi și φ variabil	98
5.11.	Variația suprafeței amprentei în funcție de forța de apăsare, pentru sârmele îmbătrânite și $\varphi=30^\circ$	99
5.12.	Variația suprafeței amprentei în funcție de forța de apăsare, pentru sârmele îmbătrânite și $\varphi=60^\circ$	99
5.13.	Variația suprafeței amprentei în funcție de forța de apăsare, pentru sârmele îmbătrânite și $\varphi=90^\circ$	99
5.14.	Variația comparativă a suprafeței amprentelor în funcție de forța de apăsare, pentru sârmele îmbătrânite și φ variabil	100
5.15.	Schema formării fisurilor în zona de contact și variația tensiunilor	100
5.16.	Aspectul suprafeței sârmelor în zona determinărilor de duritate Vickers	102
5.17.	Aspectul sârmei de Al forfecată	104
5.18.	Curbele caracteristice la forfecarea sârmelor de Al	102
5.19.	Variația rezistenței la forfecare pentru sârmele de Al	107
5.20.	Aspectul probelor rupte și descrierea metodei de lucru	108

14 Listă de figuri

5.21.	Variația numărului de îndoiri ale sârmelor de Al	99
5.22.	Dispozitiv de încercat la răsucire. Aspectul sârmei rupte	109
5.23.	Variația specifică la răsucire a sârmelor de Al	109
5.24.	Aspectul sârmelor de Al pregătite pentru încercarea la tracțiune	110
5.25.	Diagramele caracteristice pentru sârme de Al îmbătrânit	111
5.26.	Diagramele caracteristice pentru sârme de Al noi	112
5.27.	Curbele caracteristice definiției ale sârmelor de Al; a) conductor nou; b) conductor nou și îmbătrânit	113
5.28.	Aspectul sârmei de Al rupte prin tracțiune	114
5.29.	Punctele importante ale curbei caracteristice – Al nou	115
5.30.	Porțiunea elastic-liniară - Al nou	115
5.31.	Diagrama caracteristică la tracțiune pentru sârme de Al amprentate: a) Forțe constante (1000N) și unghiuri diferite de amprentare b) Forțe diferite și unghiuri constante de amprentare	116
5.32.	Inițierea ruperii la tracțiune în cazul sârmelor de Al amprentate	116
5.33.	Imagine de ansamblu a mașinii de încercări MOT 2500 kN/13m	117
5.34.	Graficul tensiune-deformație pentru un conductor 450/75 încercat la tracțiune	119
Capitolul 6		
6.1.	Modelul geometric al ansamblului; a) conductor; b) clemă; c) ansamblul conductor - clemă	122
6.2.	Discretizarea cu elemente finite a modelului de calcul conductor-clemă; a) conductor; b) clemă; c) ansamblul conductor – clemă	123
6.3.	Condiții de analiză aplicate modelului de calcul conductor-clemă a) încastrare; b) presiune normală; c) încărcare inițială; d) greutate	124
6.4.	Condiții de analiză aplicate modelului de calcul conductor-clemă pentru simularea vibrațiilor eoliene	125
6.5.	Graficele de variație ale încărcărilor statice în modelul de calcul; a) cleva de susținere; b) conductor	126
6.6.	Graficul solicitărilor cu cicluri alternante simetrice și cu amplitudine constantă	126
6.7.	Graficul schematizării metodelor de corecție a amplitudinii tensiunii	126
6.8.	Variația deformațiilor specifice: a) deformații totale; b) deformația elastică echivalentă în secțiune	127
6.9.	Distribuția deformațiilor echivalente von Mises secțiune din câmp	127
6.10.	Distribuția tensiunii echivalente von Mises dintr-o secțiune din câmp	128
6.11.	Distribuția tensiunii normale maxime din conductor	128
6.12.	Distribuția tensiunilor tangențiale din secțiunea conductorului	129
6.13.	Evidențierea sârmelor unde apar primele ruperi de oboseală	130

6.14.	Variația numărului de cicluri în straturile conductorului	130
6.15.	Schema mașinii de încercări la oboseală	131
6.16.	Rezultatele încercărilor la oboseală pe conductoare LEA	133
6.17.	Graficul solicitărilor variabile cu ciclu oscilant pozitiv pe mașina de încercări WALTER+BAI	134
6.18.	Curba lui Wöhler de oboseală la tracțiune	136
6.19.	Influența stării conductorului asupra curbelor de oboseală	137
6.20.	Curbele de oboseală ale sârmelor pentru diferite stări și unghiuri de amprentare	137
6.21.	Aspectul suprafeței de rupere prin oboseală	138
6.22.	Aspectul benzilor de lunecare și a zonei învecinate ruperii prin oboseală	139
6.23.	Dezvoltarea fisurilor de oboseală în cazul defectelor din material	140
6.24.	Dezvoltarea fisurilor de oboseală în cazul amprentelor superficiale	140

1. CONSIDERAȚII GENERALE PRIVIND DURABILITATEA CONDUCTOARELOR ELECTRICE DE ÎNALTĂ TENSIUNE. STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR

1.1. Liniile electrice aeriene–Problematică actuală

În cadrul liniilor electrice aeriene (LEA), conductoarele sunt funiile metalice neizolate întinse liber între stâlpi și fixate de aceștia prin intermediul elementelor de susținere, ce asigură circulația energiei electrice. Importanța deosebită a acestor linii electrice, precum și costurile foarte mari pentru reparații sau înlocuire au impus ca durata de viață a conductoarelor să fie cuprinsă între 50 și 80 de ani [Guohong, 2012]. În literatura de specialitate s-au făcut numeroase încercări de determinare a duratei de viață a conductorului, însă acestea nu sunt suficient de relevante având în vedere numărul mic de înregistrări ale vibrațiilor aplicate asupra conductorului.

Studiile dedicate creșterii siguranței în exploatarea liniilor aeriene capătă o relevanță deosebită când vine vorba despre diminuarea riscurilor. Întreruperile de energie, ca urmare a ruperii conductoarelor, au impact catastrofal din punct de vedere economic, social și al securității naționale. Solicitățile produse de vibrațiile galopante, precum și de vibrațiile eoliene [Ferguson, 1994; Cigada, 1997; Diana, 1998] constituie o problemă majoră în evaluarea durabilității conductoarelor electrice, în condițiile în care studiile experimentale au evidențiat rolul devastator al acțiunii combinate a contactului și oboselii asupra durabilității aluminiului [Martins, 2008].

Chiar dacă se recomandă inspectarea regulată a conductoarelor, defectele ascunse (îndeosebi cele generate la contactul dintre sârme sau dintre conductor și prinderi) pot cauza ruperea prematură a acestora. Amplasarea rețelelor LEA influențează semnificativ apariția și dezvoltarea vibrațiilor. Un alt factor deosebit de important pentru durata de viață a conductorului este reprezentat de condițiile meteorologice, care pot varia la perioade scurte de timp și pot avea tendințe ciclice, în funcție de anotimp.

Industria liniilor de transport aeriene, dar și comunitățile de cercetare au realizat numeroase studii structurale și de dinamica sistemelor de transport de energie, în vederea înțelegerii comportamentului și predicției în exploatare. Identificarea zonelor vulnerabile ale conductoarelor și ale componentelor de susținere, (figura 1.1) pentru diferite tipuri de sarcini și șocuri cum ar fi gheața, solicitări seismice, prabusirea bruscă a stâlpilor, ruperera conductoarelor etc. reprezintă puncte cheie în predicția duratei de viață. Astfel, s-a demonstrat faptul că pe un tronson deși se întâlnesc unele trăsături comune, există mai multe situații particulare, în funcție de poziția din tronson [Kim, 2005, Suzanne, 2011].

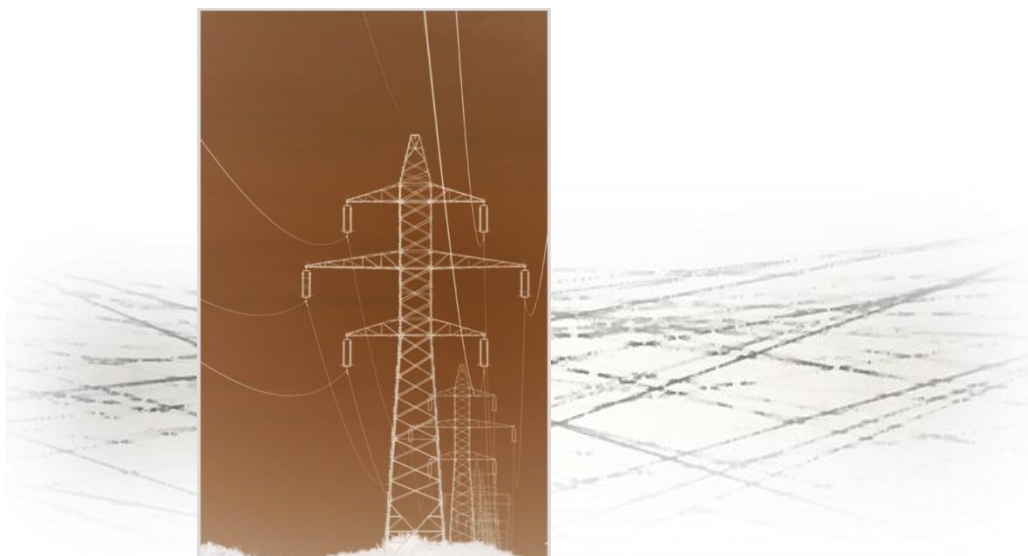


Figura 1.1. Liniile electrice aeriene – imagine de ansamblu

Functionarea în sălbaticie, frecările și vibrațiile create de vânt precum și coroziunea cauzată de plouarea industrială, precum și sarea din mediul înconjurător, pot fi mecanismul principal al avarierilor. Ruperea elementelor componente ale conductorului (sârmele) este un prim pas al funcționării deficitare și al ruperii finale. S-a constatat că ruperea conductoarelor reprezintă una dintre gravele sarcini de șoc electric pe care o secțiune de linie le poate avea, prin întreruperile de putere și prin dezechilibre mari de tensiune care pot duce la ruperi în cascadă ale conductoarelor. Un exemplu relevant este ruperea unui conductor de la o linie de înaltă tensiune din Brazilia în anul 2002, pana de curent afectând peste 65 de milioane de oameni [Azevedo, 2002]. Cercetările au arătat că ruperea s-a datorat oboselii la contact produsă de oscilațiile conductorului [Azevedo, 2009].

1.2. Solicitățile mecanice ale conductoarelor datorate încărcărilor statice

Complexitatea mecanismului ce caracterizează contactul dintre elementele LEA face imposibilă determinarea prin măsuratori a stării de tensiune a unui conductor. Analiza tensiunilor în acest caz se face prin aproximări și legi simplificatoare. Conductoarele sunt supuse la curbură maximă, în apropierea elementelor de susținere, și la forțe de compresiune maxime exercitate de dispozitivele de prindere. Tensiunile de contact într-o regiune de prindere pot fi împărțite în două categorii: statice și ciclice.

Sarcinile statice sunt date de:

- tensiunea axială constantă (dată de greutatea etalon)
- încovoiere (schimbarea de curbură a conductorului după clemă)
- presiunea locală de prindere (din clemele de prindere) și presiunea din ar-mături [Azevedo, 2009].

Sarcinile statice ce apar atunci când conductorul este supus unor tensiuni externe. Un moment de torsiune intern, indus, încearcă să descolăcească (răsfire) conductorul și, astfel, orice variație în tensiune crează o stare de vibrații de torsiune, transmitând un moment înconvoierător în reazem. În funcție de forțele din clemele de fixare conductorul se poate roti în suport, realizându-se astfel avarii ale sârmelor din stratul exterior, cauzate de frecare. De asemenea ciclurile de îndoire alternată ale conductorului apar în apropierea clemelor de prindere și a armăturilor, ca urmare a acțiunii vântului.

În condiții normale de funcționare, conductoarele sunt supuse aproape constant unor vibrații eoliene cu amplitudine mică. Totodată acestea trebuie să-și susțină propria greutate, iar în zonele de fixare apar tensiuni mecanice datorită presiunilor locale crescute din preajma clemelor și în interiorul numeroaselor dispozitive cu care vin în contact. Multe observații din practică, dar și din laboratoarele de cercetare arată ca ruperile datorate frecărilor se întâlnesc de obicei în regiunea învecinată clemelor de susținere. În imaginea de mai jos sunt indicate zonele în care apar frecvent ruperile LEA.

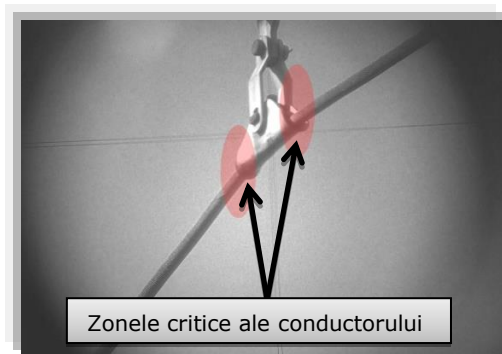


Figura 1.2. Fixarea conductoarelor în clemele de susținere

În zona de contact a conductorului cu elementele de fixare, distribuția presiunii de contact pe direcție longitudinală este influențată de forma capătului elementelor de fixare. Forma și dimensiunile acestora este foarte importantă pentru durata de viață în funcționare a LEA, iar modificări ale acestora, precum rotunjirea ușoară a capetelor clemelor, reduce presiunea de contact. Din acest motiv și din dorința de a avea un calcul al tensiunilor idealizate, starea de tensiune calculată la stratul superior este aleasă, în general, ca un indicator al stării de tensiune a unui conductor [Levesque, 2011; Suzanne, 2011].

Contactul elastic dintre două corpuri cilindrice nu poate fi analizat aplicând doar teoria lui Hertz, pentru că trebuie să se țină cont atât de formele și dimensiunile corpurilor, cât și de poziționarea relativă a acestora. Astfel, lățimea de contact este o funcție a forței de apăsare dintre cele două corpuri, a razei cilindrului, respectiv a modulului de elasticitate compus [Johnson, 2010].

Problema contactului normal în cazul deformațiilor plastice este deosebit de dificilă deoarece acestea sunt mult superioare celor elastice. În plus, profilul convex al sârmelor aduce complicații suplimentare [Johnson, 2010]. Intensitatea deformațiilor specifice este proporțională cu adâncimea de penetrare. Determinarea clară a unei zone deformată plastic este imposibilă în acest caz, în consecință presiunea de contact poate fi doar aproximată. Pentru asemenea aplicații se recomandă utilizarea metodelor numerice și validarea experimentală a rezultatelor.

În 1936 Sturm a publicat o lucrare în care a prezentat unele formule simplificatoare pentru a evalua starea de tensiune din vecinătatea unei cleme precum și o analiză a modalității de reducere a tensiunilor maxime, marcând unele formule de calcul ale curburii la clema conductorului. Inițial, studiile erau concentrate asupra aerodinamicii, folosindu-se aplicații aerospațiale datorită exigențelor avute în ceea ce privește siguranța în funcționare și durabilitatea. Zonele de contact critice ale LEA cu conductoare multifilare, cu mai multe straturi, rămân în elementele de fixare indiferent de aerodinamicitate, și se manifestă prin degradări ale conductoarelor.

Soluțiile oferite de analizele elastice s-au dovedit a fi inadecvate pentru astfel de contacte. Zona de contact este prea mare în comparație cu dimensiunea contactului în corpuri pentru a face însumarea pe jumătatea planului validă. Compararea tensiunilor cu soluția 2D pentru contactul cilindrilor a arătat importanța suprafeței libere a sârmei. Rezultatele elasto-plastice sunt diferite față de cele care se regăsesc în cazul sferelor, concluziile sunt similare cu cele pentru contactul dintre cilindrii la 30° [Levesque, 2011].

1.3. Vibrațiile conductoarelor electrice aeriene

Linile aeriene sunt afectate de vibrațiile induse de vânt, care poate genera trei tipuri de oscilații [Wikipedia 2016]:

- 1- vibrații galopante - cu amplitudine măsurată în metri și frecvențe cuprinse între 0,08 și 3 Hz
- 2- vibrații eoliene (formare de turbioni) - au amplitudini de milimetri până la centimetri, cu frecvențe cuprinse între 3-150 Hz
- 3- oscilații secundare ale conductorului (vibrații induse de siaj - volumul de fluid turbionar ce se crează în urma conductorului) - au amplitudini de centimetri, cu frecvențe între 0.15-10 Hz

Pentru a avea o imagine clară asupra comportamentului avut de conductorul aflat în exploatare, în diferite momente ale mișcării maselor de aer, Černín [Černín, 2008] prezintă principalele tipuri de mișcări folosind ilustrații explicite în concordanță cu denumirea acestora, Figura 1.3.

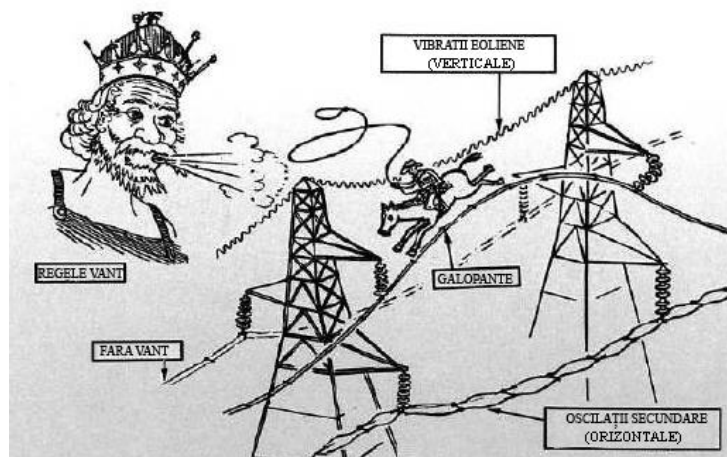


Figura 1.3. Principale tipuri de vibrații ale conductoarelor [Černín, 2008]

Vibrațiile galopante sunt produse de interacțiunea forțelor orizontale și verticale generate de vânt. În general, aceste oscilații sunt în plan vertical și au frecvența de aproximativ 1 Hz [Azevedo, 2009; Suzanne, 2011]. Vibrațiile eoliene sunt consecințele directe ale turbulențelor produse de vântul care suflă asupra conductorului și induce vibrații de înaltă frecvență, datorită creării de vârtejuri în avalul conductorului și provocând încovoieri alternate. Acestea apar la viteze relativ mici de deplasare ale maselor de aer față de liniile de transport, care sunt poziționate perpendicular vântului dominant. Mult mai periculoase decât vibrațiile galopante, aceste oscilații au o frecvență ridicată, între 10 și 40 Hz [Azevedo, 2009]. Amplitudinea acestor vibrații este redusă, la frecvențele inferioare abia atingând dimensiunea diametrului conductorului [ERPI, 2006]. Oscilații secundare ale conductorului sunt cauzate de instabilitățile create de vânt în aval de conductor și produc o oscilație clasică orizontal-eliptică a conductorului cu frecvențe joase, de aproximativ 1 Hz. Aceasta se datorează interacțiunii dintre forțele verticale și orizontale și au efect direct asupra componentelor conductorului.

Conductoarele sunt supuse la oboseală ca urmare a apariției mișcărilor ciclice caracterizate de frecvențe mari și amplitudini joase. Curgerea turbionară se caracterizează prin vibrații cuprinse între 3-200 Hz și cu amplitudini care pot ajunge până la unități de mărime egale cu diametrul conductorului, pentru intervale mai mici de frecvențe, conform [Guerard, 2011]. Considerându-se frecvențele înalte ale vibrațiilor, înseamnă ca formele modale au numeroase bucle pe lungimea unei deschideri. Toate tipurile de linii de transport au frecvențe foarte apropiate unele de altele, cea de bază fiind în general, o fracțiune de 1 Hz datorită turbulențelor create de vânt. Pe lângă fenomenul de oboseală de contact, aceste vibrații produc și solicitarea de încovoiere alternantă. Prezența unei armături în vecinătatea unor astfel de oscilații favorizează ruperea sârmelor de aluminiu și pot duce la oboseala sau rupere datorată frecării, după zeci de milioane de cicluri [Suzanne, 2011; A.A. Fadel; 2012, McGill, 1986; Ramey, 1981].

1.4. Oboseala conductoarelor electrice aeriene

Pentru a înțelege de ce se produc aceste fenomene nedorite în cadrul LEA trebuie să înțelegem de ce se rup conductoarele. Având în vedere structura lor geometrică complexă, conductoarele toronate sunt piese al căror studiu mecanic este foarte dificil. Faptul că sârmele sunt înfășurate provoacă fenomene de cuplare în spirală, între tensiune și torsiune. În timpul deformării solidului, există o alunecare între sârme și, sub influența forțelor de contact și a frecării acestora conductorul suferă o degradare rapidă și se poate rupe ca urmare a fenomenului de oboseală indusă de mișcări scurte. În prezența acestor diverse tensiuni induse de vibrațiile din vânt, sârmele din componența conductoarelor suportă consecințe evidențiate odată cu apropierea de clemele de suspendare.

Considerând condiții normale de funcționare, conductoarele se rup datorită scăderii semnificative a rezistenței la oboseală locală, indusă de frecare. Astfel, este bine știut faptul că, odată cu scăderea rezistenței la oboseală, comportamentul conductoarelor la suprasarcini se modifică și se crează medii propice dezvoltării fisurilor.

Solicitările dinamice dintr-un conductor nu sunt decât parțial datorate îndoirii. O parte din solicitări sunt date de tensiunile din sârme, datorită greutateii proprii, generându-se astfel presiuni asupra straturilor interne.

Odată cu apariția vibrațiilor aceste presiuni se localizează în diverse poziții. Locurile în care mișcarea conductorului este restricționată sunt reprezentate de curbările maxime și de apariția unor microalunecări sau chiar a unor culisări relative ale sârmelor. Având în vedere ciclicitatea mișcărilor conductorului pe direcții principale, cu schimbarea alternativă a sensului, se crează premisele unui mediu propice generării de microfisuri. Sub acțiunea presiunii de contact dintre sârme și la vibrații de amplitudine mică, acestea ar putea avea tendința de stabilizare, însă odată cu creșterea amplitudinii se dezvoltă propagarea, care duce la apariția de fisuri. Astfel de condiții sunt create îndeosebi în apropierea unor elemente care susțin conductorul sau care sunt fixate pe acesta și scad în intensitate cu depărtarea de acestea. Chiar dacă odată cu îndepărtarea de aceste elemente (către mijlocul deschiderii) vibrațiile se realizează la amplitudini crescute, scăderea presiunii de contact face ca dezvoltarea microfisurilor să fie încetinită.

Se întâlnește un aspect particular al fenomenului de frecare și uzură care, conform lui Ouaki [Ouaki, 1998], în cele mai întâlnite cazuri se caracterizează prin:

1 - degradări sau deformații locale ale suprafețelor de contact – diferă de la un material la altul și, de obicei, se manifestă prin formare de reziduri, microsudurile asperităților aflate în contact, ecruisare în zona de contact, încălzirea locală a suprafeței de contact, îndepărtare de material, din care o parte poate fi împins către marginile suprafeței de contact

2 - apariția microfisurilor de contact - sub efectul combinat al tensiunilor externe și frecărilor generate de forțele de contact, se creează microfisuri care se pot răspândi, provocând ulterior ruperi spontane atunci când una dintre fisuri a ajuns la o dimensiune critică legată de duritatea materialului.

Ansamblurile mecanice supuse la încărcări variabile în timp pot fi supuse la alunecări parțiale în zona fețelor de contact, astfel încât se produce o deteriorare superficială exprimată ca fiind oboseală prin frecare. Apariția unor gradienti ai tensiunilor în apropiere de suprafețele de contact poate favoriza formarea și creșterea de microfisuri, a căror propagare ulterioară poate fi accelerată prin încărcarea ciclică externă.

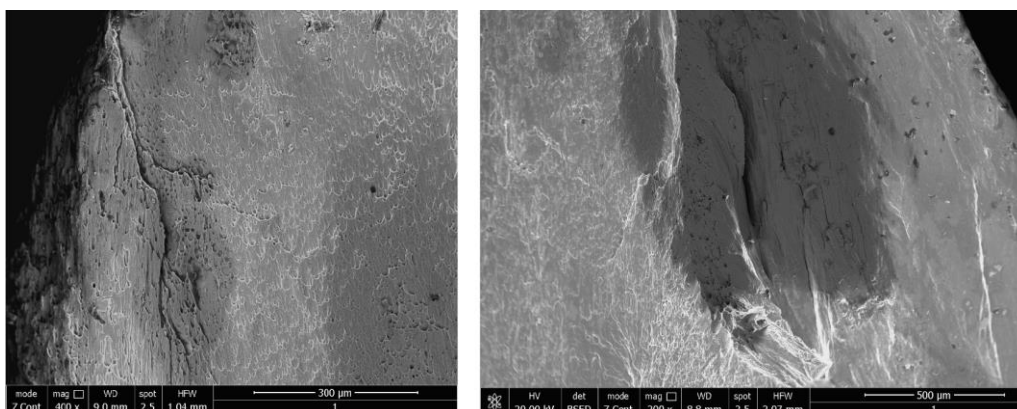


Figura 1.4. Aspectul unor fisuri dezvoltate de fenomenul de oboseală

Conform analizelor experimentale acțiunea combinată a frecărilor și a tracțiunii are un efect devastator asupra limitei la oboseală a materialelor metalice [Ferguson, 1994; A.A. Fadel, 2012], inclusiv aliaje de aluminiu [Cigada, 1997;

A.A. Fadel, 2012]. În literatura de specialitate se folosește termenul de "oboseală prin frecare" ("Fretting fatigue") și este cunoscut pe scară largă ca fiind definitiv pentru degradarea în mod semnificativ a rezistenței la oboseală locală datorită favorizării mediului propice pentru inițierea și propagarea timpurie a fisurilor. Acesta este una dintre cele mai grave probleme care afectează durata de funcționare a LEA. Dificultatea investigării comportamentului și evoluția fenomenelor de oboseală este dată de condițiile dificile de lucru, de proprietățile combinate ale materialelor, geometria de contact și de încărcare.

Cercetările recente au arătat și o influență semnificativă a încărcării axiale a conductorilor asupra durabilității acestora. Astfel, fisurile de oboseală sunt inițiate în zonele de contact din vecinătatea prinderilor, sub acțiunea încovoierii alternante produsă de vibrațiile conductorului, iar încărcarea axială accelerează creșterea acestora [A.A. Fadel, 2012]. Încărcarea axială controlează săgeata conductorului, oscilațiile acestuia și tensiunile statice și dinamice din secțiunile critice ale structurii. Uzual, această forță este cuprinsă între 15% și 20% din forța de rupere nominală a conductorului. Rezultatele experimentale au arătat că o creștere a forței axiale de la 20% la 30% din forța de rupere nominală produce o înjumătățire a duratei de viață a conductorului [A.A. Fadel, 2012]. Tensiunile dinamice care cauzează oboseala conductoarelor se datorează în principal amplitudinii de îndoire și tracțiunii alternate de la nivelul clemei de suspensie. Amplitudinea mare a vibrațiilor dă naștere ruperii rapide în sârmele conductoarelor. [Havard, 1992 I; Cigada, 1997]. Amplitudinea încovoierii este definită prin amplitudinea conductorului față de prindere, măsurată la o distanță 89mm de la ultimul punct de contact între conductor și clemă. În acest context mai mulți cercetători au pus accent pe studiul fenomenelor de frecare și rupere sub sarcini de tracțiune, încovoiere și torsiune [Malinowskii, 1984; Johnson, 2010; Vinogradov, 1986; Faur, 2010; Sathikh, 1989] arătând că ele depind în principal de geometria spiralată a conductorului, structura și modul de încărcare.

Toate aceste studii se bazează pe determinări de natură cantitativă, nu calitativă. Lipsesc studiul oboselii la contact pentru sârmele individuale. De asemenea, nu se face nicio apreciere privind ponderea contactului dintre sârme produs de tensionarea conductorului, respectiv ponderea contactului generat de prinderea clemei.

1.5. Siguranța în funcționare a liniilor electrice aeriene

Cerințele actuale privind siguranța alimentării consumatorilor cu energie electrică au determinat noi investigații privind: scăderea ratei de defectare și creșterea gradului de securitate în alimentarea cu energie electrică. Consecințele majore de fiabilitate scăzută a liniilor după o anumită vârstă sunt date de operabilitatea și mentenabilitatea sistemului și de siguranța publică. Principala consecință a fiabilității scăzute a liniilor este dată de durata și frecvența întreruperilor de furnizare de energie pentru clienți.

Pentru creșterea gradului de siguranță în exploatare al LEA sunt aplicate metode variate: dezvoltarea unor acțiuni de mentenanță preventivă, rețehnologizarea și reorganizarea structurii rețelelor de distribuție actuale.

În prezent se implementează două strategii de mentenanță:

- Mentenanță corectivă, aplicată doar în cazul existenței unei defectări;
- Mentenanță preventivă, aplicată în baza unor strategii de mentenanță preventivă periodice, la intervale fixe de timp sau implementată în baza unor strategii de mentenanță preventivă bazată pe gradul de deteriorare.

Evaluarea liniilor depinde de mai mulți parametri și factori, cum ar fi vremea, fluxul de curent, temperatura mediului ambiant etc. și de faptul că parametrii și factorii cuprinși sunt în continuă schimbare. În vederea optimizării strategiilor de mentenanță preventivă există cercetări bazate pe fiabilitate, tendința la nivel global fiind ca mentenanța preventivă să fie înlocuită de mentenanța predictivă [ERPI, 2006; Rizzo, 2002; Zoițanu, 2012]. Deși LEA sunt proiectate să funcționeze în cele mai rele condiții meteorologice pentru a limita la maxim căderile de tensiune, din practică se observă că mediul înconjurător oferă mare parte din timp condiții mai puțin restrictive decât cele proiectate în standarde. În acest sens, apare problematica optimizării și dezvoltării tehnicilor actuale de diagnoză și prognoză [Wilson, 2007; Zoițanu, 2012].

Posibilitatea măsurării efective a liniilor în timp real ar duce la o utilizare mai sigură și la economisirea de bani necesari pentru construirea de noi linii aeriene. Pe de altă parte corelarea capacității de încărcare cu curent a conductoarelor cu starea reală a vremii este în general imposibilă. În acest moment există mai multe încercări de realizare a unor instrumente de monitorizare în timp real a liniilor. Un astfel de dispozitiv este reprezentat de "Ampacimon" și permite monitorizarea în timp real a încovoierii și a altor caracteristici de mișcare bazate pe analiza de frecvență (în plaja cuprinsă între 0 și 100Hz) și are o marjă de eroare de $\pm 2\%$ la încovoiere așa cum se precizează în [Černín, 2008].

Acesta, ca și alte dispozitive de măsurare și monitorizare, pe lângă avantajele prezentate, pastrează o serie de neajunsuri cum ar fi imposibilitatea determinării stadiului de degradare a conductorului, costuri ridicate cu mentenanța, precum și problema introducerii de noi elemente perturbatoare în sistem. Depistarea defectelor timpurii, monitorizarea defectelor din exploatare, prognoza și diagnoza acestora, investigarea efectelor solicitărilor combinate asupra duratei de viață și asupra ratelor de defectare sunt încă de actualitate. Crearea unor modele numerice ar constitui o contribuție științifică importantă în domeniu, în condițiile în care metodele de control cu ultrasunete – uzuale în cazul barelor sau a cablurilor monofilare [Wilson, 2007; Rizzo, 2002] nu pot detecta defectele apărute în secțiunea conductorului [Arturo, 2002]. O optimizare a costurilor și o creștere a siguranței în exploatare s-ar putea face prin simularea condițiilor impuse de mediul de lucru și prin analize comparative a stării conductoarelor noi și folosite, în vederea stabilirii intervalelor de mentenanță și înlocuire.

2. PARTICULARITĂȚI PRIVIND INFLUENȚA TEHNOLOGIILOR DE FABRICAȚIE ASUPRA DURABILITĂȚII CONDUCTOARELOR LEA

2.1. Tipuri de conductoare electrice ale LEA

2.1.1. Rolul și importanța conductoarelor în cadrul rețelelor LEA

Originea cablurilor și a sârmelor din care se confecționează acestea nu se cunoaște cu exactitate, dar se presupune că acestea erau folosite cu peste 200 de ani în urmă. Drept dovadă stau descoperirile săpăturilor arheologice din Pompei, unde a fost găsit un cablu din bronz cu o lungime de aproximativ 4,5m, confecționat din trei toroane împletite din 19 sârme cu un diametru de 0,7mm [Șișak, 2011]. La început, cablurile se confecționau manual cu înfășurări cu pas mare și cu lungimi relative mici, de până la 35m.

Dezvoltarea acestora a avut loc datorită necesității ridicării și tractării diverselor greutăți, urmând ca, mai apoi, acestea să fie folosite frecvent în galeriile verticale ale minelor. Prima fabrică de împletit cabluri a fost înființată la inițiativa lui Ferdinand Landerer, în anul 1837 și a urmat modelul mecanicului vienez Wurm [Șișak, 2011]. Mai apoi, utilizarea cablurilor a devenit o practică frecventă în Europa și ulterior în S.U.A., cu întrebuințări diverse.

Confecționarea conductoarelor electrice a cunoscut o puternică expansiune, devenind o necesitate tot mai stringentă, odată cu dezvoltarea tehnologică, dezvoltarea telecomunicațiilor și transportului de energie electrică. Prima linie telegrafică a fost realizată de Charles Wheastone între Londra și Camden Town, cu o lungime de 1,5 mile. În 1876, Alexander Graham Bell a brevetat pentru prima dată în istorie un dispozitiv capabil să emită și să recepționeze cuvintele rostite, în 1879 Thomas Alva Edison a inventat becul, iar mai apoi, Nicola Tesla inventează motorul electric. Conductoarele încep să se folosească tot mai mult datorită creșterii necesarului de energie electrică și a raspândirii punctelor de consum. Este și cazul orașului Timișoara, care în 1884 devine primul oraș european iluminat cu energie electrică.

2.1.2. Descrierea și clasificarea conductoarelor

Linia aeriană de energie electrică denumită în continuare LEA este o instalație montată în aer liber, compusă dintr-o serie de elemente, care servește la transportul sau distribuția energiei electrice. Elementele principale din componența LEA sunt: conductoarele, izolatoarele, clemele, armăturile, stâlpii, fundațiile și instalațiile de legare la pământ.

Conductoarele liniilor electrice aeriene sunt supuse acțiunii directe a fenomenelor meteorologice (vânt, ploaie, chiciură, variații de temperatură) datorită lipsei unor elemente de izolație exterioară, precum și agenților chimici din atmosferă

(oxigen, azot, gaze sulfurice, vapori de apă sărată etc.) care au efecte corozive. Pentru a răspunde cerințelor multiple, de cele mai multe ori, conductoarele sunt construite din două metale diferite, unul având o rezistență mecanică mare și celălalt, o conductivitate ridicată. Totodată configurația și dispunerea sârmelor sub formă de toroane conferă conductoarelor flexibilitate și capacitate mare de transport a curentului, datorită circulației periferice.

Principalele cerințe pe care acestea trebuie să le îndeplinească sunt:

- să aibă o rezistență de rupere σ_r la tracțiune cât mai mare, să poată suporta solicitările mecanice variabile și să se comporte bine la oscilații și vibrații;
- să permită trecerea curentului electric cu pierderi cât mai mici – să aibă o rezistență electrică mică, respectiv o conductivitate electrică bună;
- să fie cât mai stabile la acțiunea agenților chimici din atmosferă;
- să fie influențate cât mai puțin de încălzirea conductoarelor datorită trecerii curentului electric, prin efect termic sau Joule-Lentz;
- să ducă la un preț de cost cât mai redus al liniilor, în condițiile date, cu privire la puterile electrice de transport.

Din aceste motive, costul conductoarelor este relativ ridicat, reprezentând 30-50% din costul integral al unei rețelelor de distribuție și transport [Neagu, 2013].

Clasificarea conductoarelor, ținând cont de poziția în cadrul rețelei și rolul pe care îl îndeplinesc, se poate face în două categorii:

- conductoare active – care asigură circulația energiei electrice;
- conductoare de gardă – destinate să protejeze linia împotriva descărcărilor atmosferice.

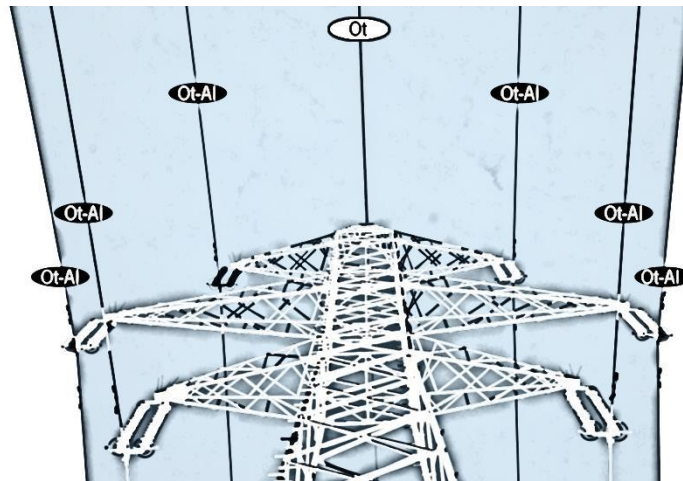


Figura 2.1. Dispunerea conductoarelor LEA: Ot – de gardă; Ot-Al – active

2.1.3. Conductoarele active

Constructiv, conductoarele multifilare sunt constituite din mai multe sârme, cu sau fără fir axial, reunite în așa fel încât straturile prin înfășurarea lor să alcătuiască un toron. Conductoarele toronate fabricate dintr-un singur metal sunt

alcătuite din fire cu același diametru, așezate în straturi concentrice în jurul unui fir central, fiecare strat fiind înfășurat în sens invers față de cel anterior.

În cazul celor bimetalice, sârmele din stratul sau straturile din imediata vecinătate a firului axial trebuie să fie din același material cu acesta, urmând ca straturile exterioare să fie din metalul cu conductivitate mai bună. Acestea sunt construite dintr-o inimă din oțel zincat peste care sunt înfășurate unul sau mai multe straturi de sârme de aluminiu cu grad de ecruisare tare.

Pentru fabricarea conductoarelor destinate liniilor electrice aeriene se folosesc sârme de aluminiu cu rezistența de rupere la tracțiune de 16-19 daN/mm². Rezistența la tracțiune a aluminiului fiind relativ mică, întinderea conductoarelor trebuie făcută cu eforturi mai mici, rezultând săgeți relativ mari și stâlpi mai înalți. Conductoarele din aliaje de aluminiu au apărut din necesitatea de a îmbunătăți calitățile mecanice ale conductoarelor din aluminiu. În construcția liniilor electrice de înaltă tensiune este folosit, în special, aluminiul de tip *aldrey*. Rezistența mecanică a conductoarelor din *aldrey* este mai mare decât a celor din aluminiu (cca. 30daN/mm²) însă conductivitatea lor este cu 12% mai mică.

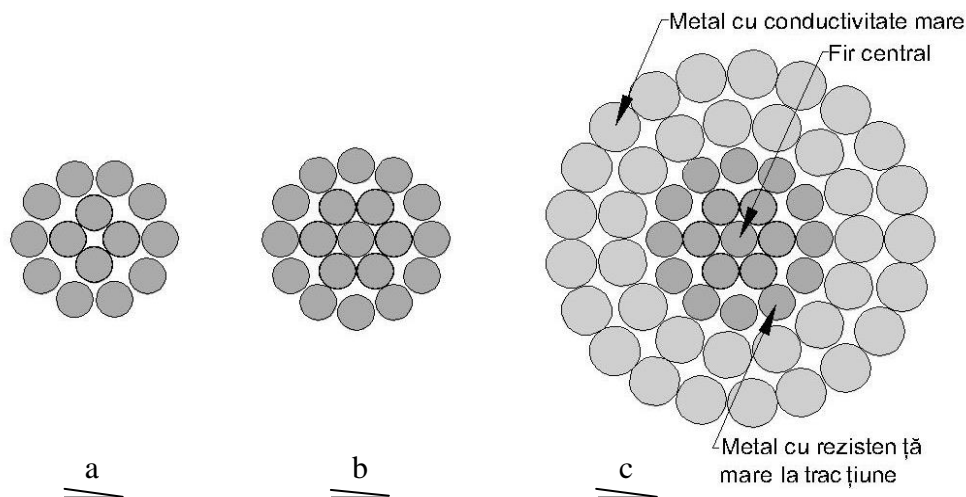


Figura 2.2. Conductoare multifilare: a) fără fir axial; b) cu fir axial; c) bimetalice

Pentru a întruni cerințele menționate, cele mai folosite conductoare LEA sunt cele din oțel-aluminiu, ele putând fi construite în variantă normală, cu raportul de oțel 1:6 și varinta întărită, cu raportul de oțel 1:4. Pentru rezistențe mecanice mai mari se ajunge până la 1,7:1 [Rucareanu, 1989].

Sârmele componente ale fiecărui strat sunt înfășurate concentric, uniform și regulat în jurul inimii conductorului, în forma unei spirale cu pasul de răsucire egal cu de 11-14 ori diametrul stratului respectiv. Pasul de înfășurare are influență mare asupra rezistenței la solicitările de rupere, asupra flexibilității și stabilității formei conductorului la încovoierea. Pentru a se asigura o bună flexibilitate este necesar ca numărul sârmelor conductoarelor multifilare să crească odată cu secțiunea. Totodată este necesar să se schimbe și sensul de toronare, odată cu trecerea la un nou strat.

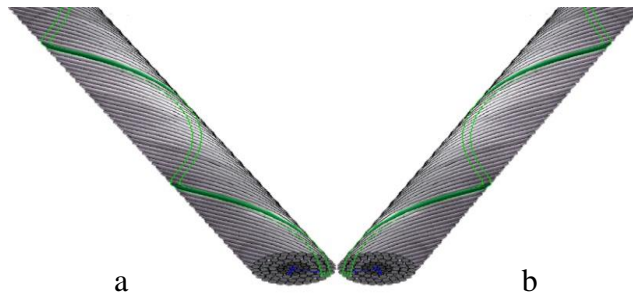


Figura 2.3. Sensul de toronare al conductorului; a) S – spre stânga; b) Z – spre dreapta

În Figura 2.3 se prezintă modul de toronare al conductoarelor multifilare în care se regăsesc o serie de informații definitorii:

- numărul total de sârme și de straturi de așezare
- mărimea secțiunii conductorului;
- sensul de toronare;
- pasul de toronare -11-14 ori diametrul stratului respectiv;
- raportul de oțel (suprafața oțel/ suprafața aluminiu);
- elemente care variază cu materialul.

În general, între numărul de straturi n și numărul de sârme n' există relația:

$$n' = 1 - 3n \cdot (n + 1) \quad (2.1)$$

Inima de oțel împreună cu straturile ce o înfășoară sunt gresate în vederea protejării împotriva coroziunii și pentru a reduce frecările interne ale conductorului. Principalele caracteristici ale procesului de gresare și ale vaselinei sunt:

- toate sârmele din componența conductorului cu excepția stratului exterior sunt gresate;
- după toronare stratul exterior nu trebuie să prezinte urme de vâșcă;
- greutatea vaselinei confirmă valorile indicate în IEC 61089;
- vâșca nu trebuie să fie dăunătoare aluminiului sau oțelului galvanizat;
- vâșca nu trebuie să curgă la o temperatură mai mică de 75°C;
- vâșca trebuie să aibă bune proprietăți de adezivitate și coeziune, care să se mențină după intemperii;
- nu trebuie să prezinte riscuri pentru sănătate.

2.1.4. Conductoarele de gardă

Conductoarele de protecție sunt construite din oțel zincat și au secțiunile de 50mm² sau 70mm² pentru liniile de 110kV și de 70mm² sau 95mm² pentru liniile (220, 400, 750)kV. În ceea ce privește conductoarele de protecție (de gardă), în afara protejării liniilor electrice împotriva loviturilor directe de trăsnete, au un rol important și în reducerea efectului perturbator asupra liniilor de telecomunicații învecinate, precum și la reducerea tensiunii de atingere și de pas. Prescripțiile prevăd obligativitatea protejării prin montare de conductoare de protecție pe întreaga lungime a liniilor de 110, 220, 400, 750kV.

2.2. Influența tehnologiilor de fabricație asupra caracteristicile mecanice ale conductoarelor

2.2.1. Considerații generale asupra aluminiului folosit la fabricarea sârmelor din componența conductoarelor

Aluminiul a fost cunoscut mult mai târziu decât alte metale mai puțin răspândite, dar pe care omul le-a identificat și a reușit să le separe și să le întrebunțeze cu mii de ani înainte. Deși este cel de-al treilea ca răspândire în natură (7,5%Al sau 15,54%Al₂O₃) după oxigen și siliciu, sub diferite combinații, în compoziția celor mai multor roci, acest metal a putut fi separat cu multă dificultate. Afinitatea crescută pentru oxigen, temperatura înaltă necesară pentru reducerea oxidului și slaba tensiune de disociere a acestuia, au făcut ca aluminiul să rămână necunoscut și neîntrebunțat multă vreme. Acest metal a fost descoperit mult mai târziu, fiind obținut abia în 1825-27 de către Oerstedt și Wöhler, de unde și denumirea de "metal nou" [Lăzărescu, 2011] .

În anul 1866 se aduce cea mai mare perfecționare în domeniul producerii aluminiului datorită descoperirii de către Hall și Héroult a descompunerii electrolitice a oxidului de aluminiu pur dizolvat în criolita topită [Nenițescu, 1979], putând fi considerat ca începutul metalurgiei moderne a acestui metal.

Prin diferite perfecționări s-a reușit ca metalul produs, plecând de la bauxită, să fie un metal omogen cu un conținut de 99,5% Al. Aluminiul metalic brut produs de industrie poate conține maximum de impurități în proporție de 2%. Locul principal printre impurități îl ocupă fierul (circa 1%) și siliciul (0,5%) [Nemeș, 2001].

Aluminiul produs de diferite celule de electroliză este topit în cuptoare cu vatră basculantă sau în creuzete încălzite cu cărbune sau cu electricitate. Prin această operațiune se omogenizează metalul și se curăță de impuritățile antrenate mecanic, cum ar fi fluoruri și alumină, a căror prezență este dăunătoare prelucrării ulterioare a aluminiului prin laminare, trefilare etc. În funcție de procedeele folosite se deosebesc două tipuri de aluminiu pur ale căror concentrații sunt foarte apropiate [Nemeș, 2001]:

- Aluminiul comercial pur: conține circa 99,5% Al
- Aluminiul superior: conține circa 99,99% Al

Pentru cazurile în care este necesar să se folosească un metal mult mai pur se face o rafinare electrolitică, după un procedeu numit "trei straturi", obținându-se purități de până la 99.999%.

2.2.2. Influența proceselor tehnologice de obținere a sârmelor de aluminiu asupra proprietăților acestora

Obținerea sârmelor se face prin procesul numit trefilare, care are ca efecte deformații plastice, structurale și modificări ale proprietăților fizice și mecanice ale materialelor de bază. Fie că este vorba de aluminiu sau oțel, pentru a putea forma toroane, sârmele trec din forma lor primară în cea finală prin operația de trefilare. Pornind de la tija de sârmă cu diametru mare, care este trasă printr-o serie de

filare, se ajunge la un diametru micșorat, conform cerințelor ce trebuie să îndeplinească, care se pastrează constant pe lungimea sârmei.

Reducerea diametrului se face într-un spațiu închis, prevăzut cu emulsie, în care sârmele sunt imersate în vederea reducerii frecărilor și menținerea temperaturii de prelucrare la rece. La finalul procesului, după verificarea produsului finit, se realizează colacii de sârmă. În cazul sârmelor de oțel, procesul de trefilare necesită o etapă suplimentară, dată de zinare, cu rol anticoroziv.

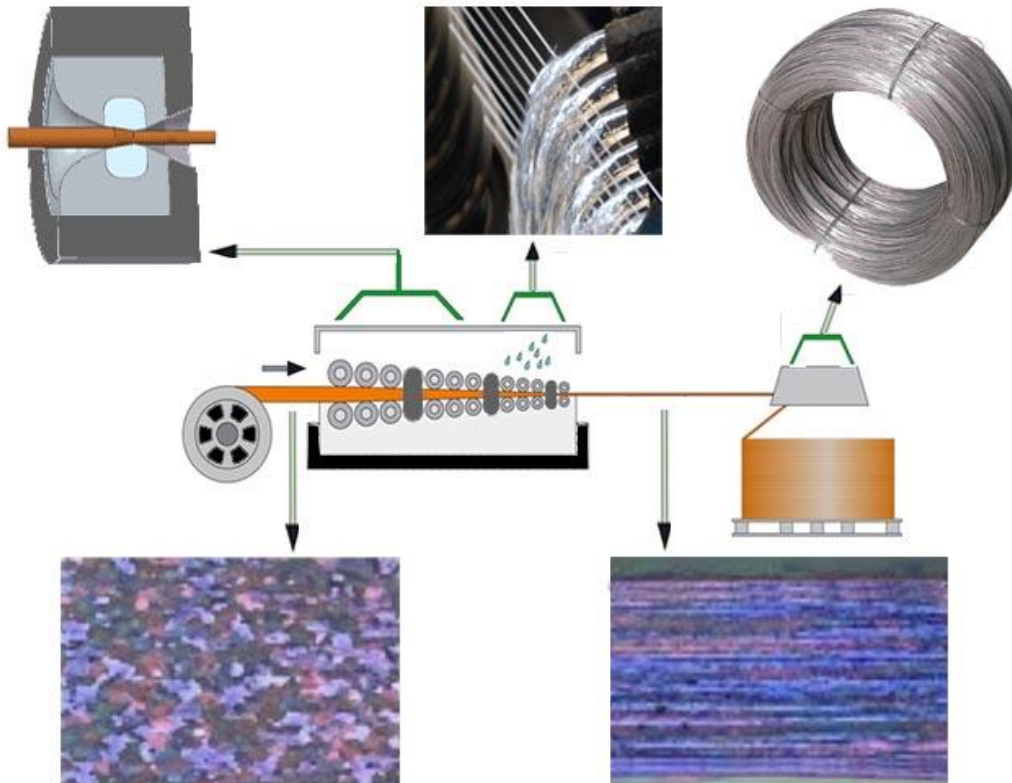


Figura 2.4. Procesul de trefilare a sârmelor

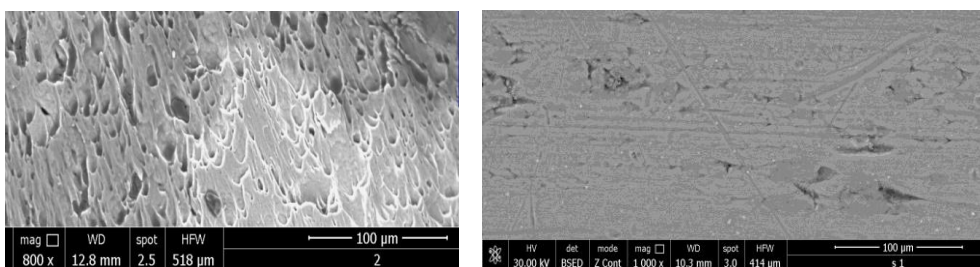
Cristalele reașezate în urma trefilării prezintă abateri de la modelul cristalului ideal, iar particulele nodale nu au o poziție fixă, ele efectuează mișcări de oscilație în jurul unei poziții de echilibru cu amplitudine variabilă. Rețeaua cristalină poate fi modificată și de prezența unor impurități sau din cauză că unele noduri nu sunt completate cu particule. Proprietățile mecanice ale sârmelor rezultate sunt determinate de imperfecțiunile structurii care pot fi punctuale, liniare sau de suprafață [Roșu, 2014].

În urma procesului de deformare plastică la rece sau la o temperatură inferioară celei la care începe recristalizarea, are loc ecruisarea. Aceasta creează o structură cristalină distorsionată cu grăunți alungiți și aduce îmbunătățiri unor proprietăți cum ar fi rezistența mecanică, duritatea, conductivitatea electrică. Totodată, scade ductilitatea și tenacitatea.

30 Particularități privind influența tehnologiilor de fabricație asupra durabilității

Procesul de trefilare al sârmelor modifică structura țesutului astfel:

- Crește numărul granulelor ca urmare a divizării – se formează o structură cu granule fine cu goluri, atomi sau ioni interstițiali și atomi sau ioni interschimbați;
- Granulele se întind în direcția modelării - rezultă prin trecerea atomilor sau ionilor în interstițiile rețelei;
- Crește numărul locurilor de greșeli (dislocații) din structură – sunt defecte liniare ale rețelei cristaline care se manifestă prin mărirea densității dislocațiilor și împiedică mișcarea acestora;
- Energia internă a metalului trefilat se mărește – modelarea la rece crește duritatea aluminiului prin creșterea densității dislocațiilor, care împiedică migrarea dislocațiilor.



a) structură internă cu goluri

b) structură superficială cu goluri

Figura 2.5. Defecte structurale ale sârmelor de aluminiu

Aluminiul folosit la fabricarea conductoarelor este unul cu puritate mare, de peste 99%, cum ar fi: 1XXX; 1050/ Al99,5; 1200/ Al99,0; 1350/ Al99,5, îndeosebi fiind folosit cel dezvoltat special pentru aplicațiile electrice, cu codificare 1350. Puritatea aluminiului este de peste 99,5% cu grad cu ecrusare tare. Tipurile și concentrațiile limită ale elementelor chimice componente, precum și principalele caracteristici ale acestuia se regăsesc în tabelele următoare:

Tabel 2.1. Tipurile și concentrațiile limită ale elementelor chimice

Tip	Al min.	Fe	Si	Cu	Mn	Zn	Ti	Cr	Altele max.
1350	99,5%	0,4	0,1	0,05	0,05	0,05	0,03	0,01	0,1

Tabel 2.2. Proprietățile mecanice și fizice ale metalelor pentru conductoare

Caracteristica Al 99.5%	Al	Oțel	U. M.
R_m	15,8-18,9	13,7-37,2	daN/mm ²
A_n	5-10		%
E	5.600-6.500	18,8-19,6	daN/mm ²
λ	$2,3 \times 10^{-5}$	$1,1 \times 10^{-5}$	1/°C
α	$4,03 \times 10^{-3}$	$4,5 \times 10^{-3}$	1/°C
$\rho_{20^\circ C}$	$2,8 \times 10^{-2}$	$14,2 \times 10^{-2}$	$\Omega mm^2/m$
Căldură specifică	0,895-0,933	0,63	J/g°C

Aluminiul este un metal ductil și maleabil care se conservă foarte de bine datorită formării unei pelicule superficiale aderente și compacte de oxid, atunci când este expus la aer. Stratul de oxid se formează aproape instantaneu și are o grosime

inițială de $\sim 2.5\text{nm}$, care ajunge până la $\sim 20\text{nm}$ în decursul anilor. Acesta apără restul metalului de oxidație și-l face potrivit pentru construcții în aer liber, păstrându-și astfel culoarea și rezistența. Din această cauză nu este atacat de apă (nici la fierbere), reacția oprindu-se în scurt timp. Această rezistență scade foarte mult dacă este amalgamat [Nenițescu, 1979].

Este unul dintre cele mai ușoare metale din inginerie, având o rezistență în raport cu greutatea mai mare decât oțelul, nu prezintă modificări alotropice, are o mare conductibilitate electrică și termică și este rezistent la coroziune. Aluminiiu este foarte potrivit pentru medii reci, având ca avantaj față de oțel rezistența la tracțiune crește odată cu scăderea temperaturii și păstrându-și în același timp duritatea [Azom, 2016]. Oțelul, pe de altă parte, devine casant la temperaturi joase.

Alumiiniul pur are o rezistență la rupere de maximum 180N/mm^2 , duralumiiniul întrece chiar 500N/mm^2 , concurând cu oțelul moale [Nemeș, 2001]. Rezistența la tracțiune a alumiiniului pur este de aproximativ 90MPa , dar acest lucru poate fi crescut la peste 690MPa pentru unele aliaje tratabile termic [Azom, 2016].

Tabel 2.3. Proprietățile generale ale alumiiniului [Wikipedia, 2016]

Proprietate	Valoare
Numarul atomic	13
Masa atomică (g/mol)	26,98
Masa volumică (kg/dm^3)	2,703
Perioada	3
Structură cristalină	(cubică cu fețe centrate)FCC
Densitate (g/cm^3)	2,6898
Temperatura de topire ($^{\circ}\text{C}$)	660,2
Punct de fierbere ($^{\circ}\text{C}$)	2 480
Temperatura de turnare ($^{\circ}\text{C}$)	710-730
Temperatura de prelucrare la cald ($^{\circ}\text{C}$)	350-450
Temperatura de recristalizare ($^{\circ}\text{C}$)	150
Temperatura de recoacere ($^{\circ}\text{C}$)	370-400
Contractia liniara %	1,7
Dilatarea la topire %	6,5
Viteza sunetului (m/s)	6 400
Conductibilitatea termică (0-100 $^{\circ}\text{C}$) ($\text{W/m}\cdot\text{K}$)	237
Conductivitate electrică (S/m)	37,7
Resistivitate electrică la 20 $^{\circ}\text{C}$ ($\Omega\cdot\text{cm}$)	2,69
Limita de curgere (N/mm^2)	118
Rezistența la tracțiune (N/mm^2)	147
Alungirea (%)	5-10
Reziliența la 20 C, turnat (kgm/cm^2)	14
Modulul de elasticitate (daN/mm^2)	6 800
Modulul de torsiune (daN/mm^2)	2 700
Coeficientul lui Poissons	0,34
Compresibilitatea la 20 $^{\circ}\text{C}$, pe un megabaric	$1,4 \times 10^{-3}$
Duritate Brinell	30-35

Una dintre proprietățile cele mai importante ale aluminiului este conductibilitatea sa electrică. Ordinea primelor 5 cele mai bune conductoare fiind următoarea: argint, aur, cupru, aluminiu, fier. Cu cât aluminiul este mai curat, cu atât conductibilitatea este mai bună, mici cantități de impurități fiind de natură să influențeze mult conductibilitatea electrică. Sub formă de sârmă și folie reacționează energetic (cu degajări mari de căldură și lumină). În Tabelul 2.3 sunt cuprinse proprietățile aluminiului care, datorită utilizării la scară largă, se găsesc în literatura de specialitate.

2.2.3. Influența proceselor tehnologice de obținere a sârmelor de oțel asupra proprietăților acestora

Sârmele de oțel, care formează inima conductoarelor, garantează performanțe mecanice ridicate. Spre deosebire de sârmele de aluminiu, acestea necesită aplicarea unui strat de protecție împotriva coroziunii, realizat prin galvanizare. Grosimea stratului de zinc este cuprinsă între 0-15 μ m [Wikipedia 2016]. Mediul de lucru este unul propice pentru formarea procesului de alterare datorită prezenței umidității, a oxigenului și, cu accelerare, în cazul prezenței sărurilor.

Etapele de lucru suplimentare date de instalațiile de galvanizarea continuă a sârmei sunt:

- Decaparea
- Tratarea cu fondanți
- Galvanizarea
- Finisarea

O protecție suplimentară la coroziune se face prin aplicarea de lubrifiant consistent (vaselină) pe suprafața inimii, prin infuzia completă.

Principalele caracteristici ale sârmelor de oțel sunt enumerate mai jos [CEB, 2012] și în tabelul 2.2:

- Sârma de oțel galvanizat utilizată pentru conductoare trebuie să fie conform cu stasul BS EN 50189
- Sârma nu trebuie să prezinte fisuri atunci când este înfășurată în jurul unui dorn cilindric cu un diametru dat de SR EN 50189 cu o turație care să nu depășească 15 rotații/minut, pentru o lungime de 8 pași de înfășurare.
- Rezistența de rupere la tracțiune și alungirea la rupere la valori de 1%, calculată la dimensiunile nominale ale sârmei să corespundă cu BS EN 50189.

2.2.4. Apariția unor concentratori de tensiune din procesul de toronare

Toronarea este procedeul prin care sârmele de oțel și de aluminiu sunt răsucite pentru a forma conductoarele. Înfașurarea se face în jurul unui fir central, format dintr-o sârmă de oțel. Se răsucesc cu ajutorul unor utilaje speciale, unul sau mai multe straturi ce conțin sârme de oțel, peste care se răsucesc straturi formate din sârme de aluminiu. Formarea acestor straturi elicoidale se face cu schimbarea sensului de înfășurare de la un strat la altul.

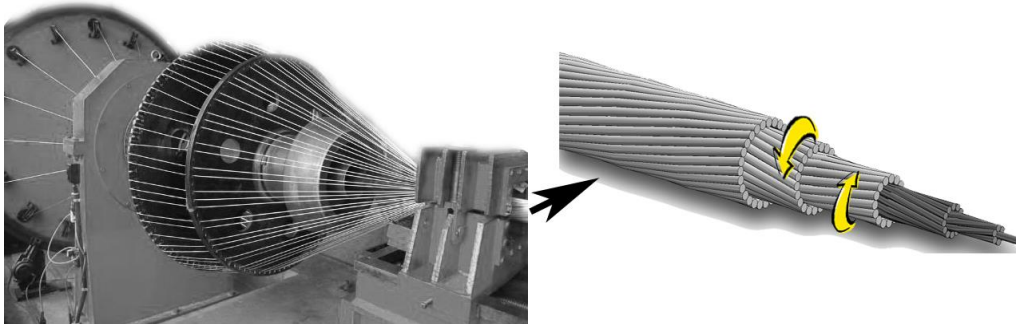


Figura 2.6. Toronarea conductoarelor oțel-aluminiu, senzuri de înfășurare

Figura de mai sus prezintă dispunerea sârmelor pe mașina de trefilat și înfășurarea acestora sub forma elicoidală într-un nou strat. În procesul de toronare sârmele sunt lubrificate, proces care ajută la diminuarea efectelor create de frecările din zonele de contact dintre sârmele conductorului. Livrarea conductoarelor de oțel-aluminiu se face pe tambur de lemn, conform STAS 5674-76 cu lungime de 1000m sau multipli pentru secțiuni cuprinse între 16-50mm² și lungimi de 500m, pentru secțiuni nominale cuprinse între 70-680mm².

În procesul tehnologic de dispunere elicoidală a straturilor, sârmelor le sunt aplicate forțe exterioare având direcție axială și normală pe cilindrul ce le caracterizează. Acest proces produce eforturi în masa materialului, iar la exterior crează zone de tip concentratori de tensiune sub forma unor linii, contact de tip I și punctiforme, contact de tip II. Sub influența concentrării tensiunilor și a mediilor agresive se manifestă coroziunea sub tensiune sau oboseala de coroziune.

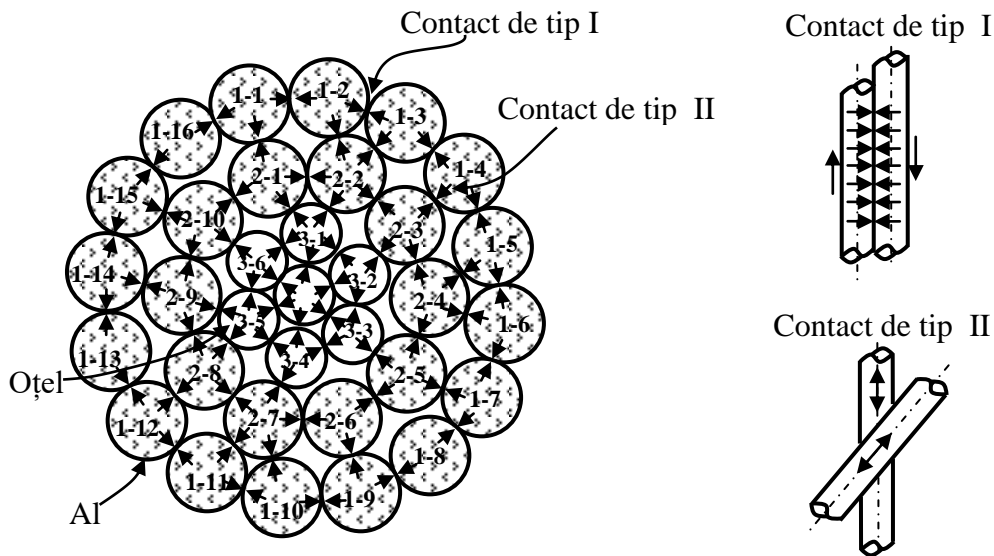


Figura 2.7. Tipuri și zone de contact între sârmele conductorului
Contact de tip I – contact liniar; Contact de tip II – contact punctiform

Datorită caracterului liniar-elastic manifestat la solicitarea de tracțiune moderată și de dispunerea elicoidală a sârmelor, în zonele de contact se exercită sarcini continue de tipul forțelor de legătură (reacțiuni). Sub acțiunea acestor forțe, conductorul este în echilibru și în el ia naștere o anumită stare de solicitare sub forma celor două tipuri de contacte.

Contactul liniar notat cu I se întâlnește la sârmele aflate pe același strat datorită sarcinilor liniar distribuite și are o influență deosebită asupra rigidităților axiale, de încovoiere și torsiune ale conductorului. Contactul punctiform II este întâlnit la sârmele aflate în straturi învecinate sub forma unor sarcini concentrate în punctele de contact, cu tendințe de dezvoltare a unor suprafețe de contact. Un asemenea contact se caracterizează prin sarcini foarte ridicate, care au un rol fundamental în ceea ce privește deformațiile locale și dezvoltarea de fisuri de oboseală. La nivel structural, aceste contacte aduc modificări de formă și dimensiuni ale interstițiilor cristaline, dezvoltă eforturi continue în masa sârmelor care duc la formarea de noi cristale.

Studiile teoretice și experimentale efectuate până în prezent arată că independent de regimurile de încărcare și de rigiditățile la tracțiune sau încovoiere, durata de viață a unui conductor pe lungimea portantă a acestuia este controlată în special de eforturile care apar în zonele contactului de tip II. Astfel în masa conductoarelor există o serie de tensiuni, eforturi și deformații care influențează durata de viață a acestora și se însumează sarcinilor care apar în exploatare. Tensiunile interne remanente, scad rezistența termodinamică a metalului favorizând ruperea continuității peliculelor protectoare și crește intensitatea proceselor de coroziune.

2.3. Observații și concluzii

Datorită proprietăților sale, aluminiul este metalul cel mai potrivit pentru transportul energiei electrice.

Conductoarele multifilare bimetalice sunt materiale compozite cu cea mai mare importanță în transportul de energie.

Procesele de fabricație ale conductoarelor produc tensiuni în material, cresc numărul de defecte, modifică rețeaua cristalină și scad ductilitatea și tenacitatea.

Ca urmare a contactului dintre sârme, pe suprafața sârmelor se formează zone de tip concentratori de tensiune.

Modelarea la rece crește duritatea aluminiului, prin creșterea densității dislocațiilor și prin apariția ecruisării. Se îmbunătățesc unele proprietăți cum ar fi rezistența mecanică, duritatea și conductivitatea electrică.

Imperfecțiunile structurii materialului, rețeaua de goluri și tensiunile din material favorizează dezvoltarea fisurilor de oboseală.

Particularitățile proceselor tehnologice (mecanice, termochimice, chimico-termice, electrochimice) pot conduce la apariția unor defecte legate de modificări structurale, modificări ale formei materialului, apariția de fisuri, concentrări locale ale tensiunilor etc.

În masa conductoarelor există o serie de tensiuni, eforturi și deformații care influențează durata de viață a acestora și se însumează sarcinilor care apar în exploatare.

3. CERCETĂRI PRIVIND INFLUENȚA MEDIULUI DE LUCRU ASUPRA CARACTERISTICILOR MECANICE ALE CONDUCTOARELOR LEA

3.1. Factori de mediu specifici zonei de vest a țării

Transportul de energie prin intermediul LEA se face suprateran prin conductoare suspendate care sunt direct influențate de factorii de mediu în ceea ce privește funcționarea, degradarea și durata de viață. Dezvoltarea tehnologică și științifică afectează echilibrul în natură prin accentuarea modificării calității aerului, solului, apei, iar realizarea unor tehnologii generatoare de materiale reziduale și toxice a modificat compoziția mediului. Emisiile de noxe gazoase, pulberi și aerosoli au condus la grave probleme de mediu ca: poluarea urbană, ploile acide, compoziția chimică a ceții, modificarea climei, particule în suspensie, oxizii de sulf, concentrația aerului, precipitațiile [Havard, 1992, II]. Mediul înconjurător influențează coroziunea conductoarelor și proprietățile acestora, iar existența unor indici ar putea prezice durata de viață preconizată a conductoarelor în diferite părți ale traseului LEA.

Clima

Aceasta, precum și condițiile meteorologice, cum ar fi: temperatura, umiditatea relativă, viteza și direcția vântului sunt factori determinanți în ceea ce privește mediul de lucru al conductoarelor. Clima României este temperat-continentală de tranziție, marcată de unele influențe climatice oceanice, continentale, scandinavo-baltice, submediteraneene și pontice. Din punctul de vedere meteorologic țara noastră este împărțită în două zone, astfel în Banat și Oltenia se face simțită nuanța mediteraneană, caracterizată de ierni blânde și regim pluviometric mai bogat (mai ales toamna).

Temperatura și umiditatea

Comportamentul materialelor din componența LEA se modifică odată cu modificarea temperaturii și a umidității mediului înconjurător. Factorul principal în temperatura materialelor din timpul solicitărilor este temperatura de tranziție ductil-fragil care influențează comportarea lor la rupere. Astfel, la temperaturi ridicate comportarea la rupere este ductilă, iar la temperaturi scăzute materialul prezintă o comportare fragilă la rupere. Totodată, este influențată structura metalelor, vitezele de propagare ale ruperilor și durata de viață a acestora. În condițiile coroziunii atmosferice, creșterea temperaturii poate avea influență pozitivă crescând viteza de evaporare a umidității de pe suprafața metalului.

Radiația solară

Accelerează procesul de îmbătrânire, scăzând capacitatea de protecție a vaselenei și, fiind un factor important ce contribuie la apariția coroziunii localizate. Potențialul de radiație solară se prezintă în valori mari în cadrul conductoarelor, având valori medii multianuale cuprinse între 4000-5500mj/m², la nivelul țării noastre.

Chiciura

Greutatea specifică a chiciurei se consideră egală cu $\gamma=0.75\text{daN/dm}^3$. Stratul de chiciură se depune circular, cu grosime uniformă în jurul conductorului. [Creț, 2010]. Numărul mediu multianual al zilelor cu chiciură în Banat este de 11,7 zile/an, însă acesta a variat de la un an la altul.

Poleiul

Acest fenomen este posibil în intervalul noiembrie-martie și contribuie la creșterea tensiunilor din conductor prin creșterea greutății proprii. Numărul mediu multianual de zile cu polei este redus, de 2,9 zile/an, datorită influențelor climatice mediteraneene care se resimt în sud-vestul țării (Banat și Oltenia) [Rucareanu, 1989].

Ceața

Aceasta constituie un risc prin menținerea umidității și dezvoltarea de reacții chimice, iar în cazurile în care se combină cu poluarea apare fenomenul de smog. Rolul de nucleu de condensare este preluat în oraș și de pulberile industriale cu dimensiuni mici, ele contribuind la dezvoltarea degradărilor de suprafață.

Depunerile de gheață

Un alt mod de excitare a conductorului ia naștere în climatul rece când, acumularea de gheață, pe suprafața conductoarelor, modifică profilul aerodinamic până la punctul în care acestea devin aerodinamic și elastic instabile.

Particule în suspensie

Pulberile în suspensie reprezintă un amestec complex de particule foarte mici și picături de lichid. Imisiunea de particule în aerul înconjurător diferă și este un fenomen care face ca particulele de diverse tipuri și dimensiuni să adere la suprafața conductoarelor. Particulele favorizează coroziunea prin frecare și dezvoltarea fisurilor superficiale.

Vântul

Acțiunea vântului asupra conductoarelor diferă în funcție de direcția și viteza de deplasare a maselor de aer. Acțiunea și efectele vântului variază odată cu înălțimea conductoarelor deasupra solului. Deși o creștere în înălțime este defavorabilă, aceasta nu se poate evita datorită criteriilor de siguranță în exploatare, cum ar fi săgeata, distanța minimă între sol sau alte elemente LEA. Poziția conductoarelor pe durata exploatarei favorizează vibrațiile din vânt, a căror amplitudini și frecvențe sunt variabile în timp, dar și spațiu. Astfel, în lungul conductorului, efectele vântului se modifică odată cu creșterea distanței față de punctele de fixare.

Viteza medie anuală este direct influențată de orografie și de stratificarea termică a aerului, care o pot intensifica sau atenua. Pe teritoriul României acestea pot varia de la 8-10m/s pe înălțimile carpatice și până la 4-5m/s în Dobrogea și Banat. Zonele cu viteze maxime ale vântului cuprinse între 30-40m/s înconjoară toate arealele și au caracter temporar. Viteze maxime anuale ale vântului cuprinse între 20 și 30m/s se înregistrează în cea mai mare parte a Podișului Transilvaniei, în centrul și nordul Câmpiei de Vest și pe Culoarul Muresului.

Un conductor al unei linii electrice aeriene este supus vibrațiilor – oscilațiile periodice orizontale și verticale provocate de vânt, care formează pe lungimea deschiderii o serie de unde staționare cu amplitudine variabilă.

3.2. Tipuri de probe folosite în cadrul lucrării

Conductoarele electrice, cel mai des folosite în transportul de energie de înaltă tensiune, sunt denumite în literatura de specialitate ACSR (Aluminum Conductor Steel Reinforced). Acesta definește caracterul bimetalic al conductoarelor cu sârme de aluminiu poziționate în straturile exterioare ale toroanelor și cu armatura (inima) de oțel galvanizat de înaltă rezistență, ce formează straturile interioare. În cadrul încercărilor de laborator s-au folosit probe prelevate din conductoare electrice ce se folosesc la transportul de energie electrică a liniilor aeriene LEA. Acestea sunt constituite din tronsoane de conductor și din sârme de aluminiu și oțel.

Sârmele și conductoarele din cadrul prezentei cercetări se împart în:

- Sârme și conductoare noi, nefolosite în transportul de energie;
- Sârme și conductoare îmbătrânite, aflate în serviciu timp de 42 de ani.

Sârmele noi au fost prelevate dintr-un conductor produs de IPROEB Bistrița, în anul 2013, în conformitate cu STAS 35/1999, și fac parte din categoria conductoarelor de oțel-aluminiu de tipul 450/75. Conductorul nu a fost folosit în transportul de energie, făcând parte dintr-un colac ce s-a livrat către Transelectrica. Principalele caracteristici date de producător sunt prezentate în tabelul de mai jos.

Tabel 3.1. Caracteristicile conductorului și ale sârmelor din componență acestuia

Tip	Informații despre conductor								Informații despre sârme			
	Aria secțiunii			Straturi		D	Masa	Rezistența electrică	Buc/conductor		d	
	Al	Oțel	Tot	Al	Oțel				Al	Oțel	Al	Oțel
	mm ²	mm ²	mm ²	buc	buc	mm	Kg/Km	Ω/km	buc	buc	mm	mm
450/75	445,3	75,55	506,13	3	2+1 central	29,25	1823,4	0,0649	63	19	2,95	2,25

Sârmele îmbătrânite au fost prelevate din conductoarele active aflate pe traseul rețelei LEA, Porțile de Fier-Arad din tronsonul Timișoara-Arad. Tipul liniei din care s-au făcut prelevările probelor îmbătrânite este LEA-220 kV cu dublu circuit și cu un singur fir de gardă. Conductoarele active sunt bimetalice din aluminiu cu inimă de oțel de tipul 450/75 și au caracteristici similare celor prezentate în Tabelul 3.1. Acestea au fost folosite în transportul de energie electrică de înaltă tensiune timp de 42 de ani, fiind în serviciu din 1971.

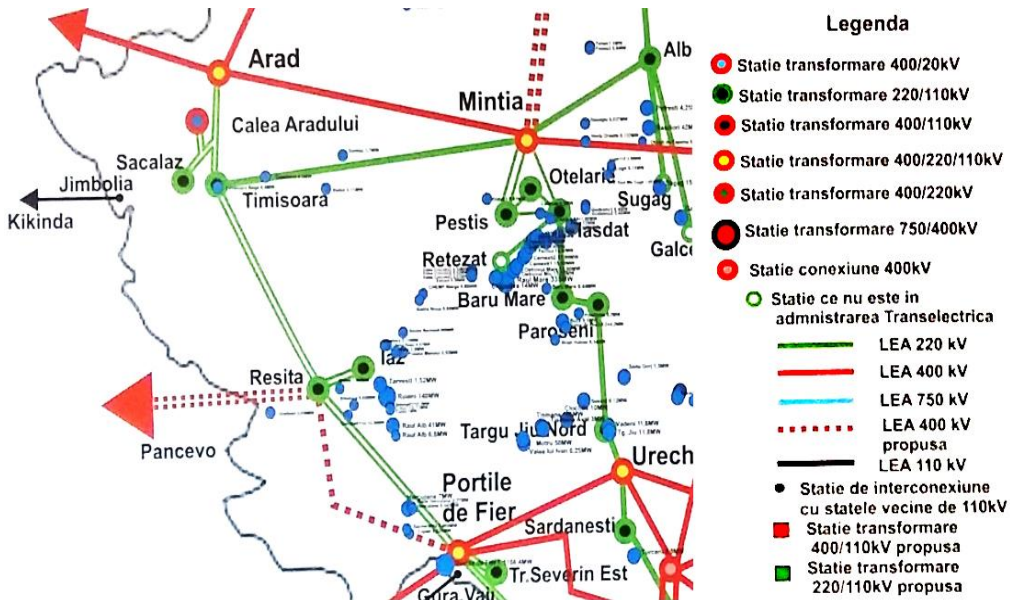


Figura 3.1. Rețele de înaltă tensiune, prezente în zona de vest a țării

Prelevarea probelor s-a făcut din conductoarele active, atât din mijlocul deschiderii dintre stâlpi, cât și din zona clemelor de fixare, cu scopul de a evidenția evoluția proprietăților materialului, personalizată de poziția din cadrul LEA, poziția geografică, condițiile climatice și de mediu înconjurător prezente în vestul țării.

Aspectul conductoarelor, precum și înfașurările și tipurile de sârme ce compun straturile sunt prezentate în imaginea de mai jos, unde cele două conductoare se diferențiază prin aspectul diferit dat de acoperirile superficiale prezente pe conductorul îmbătrânit.

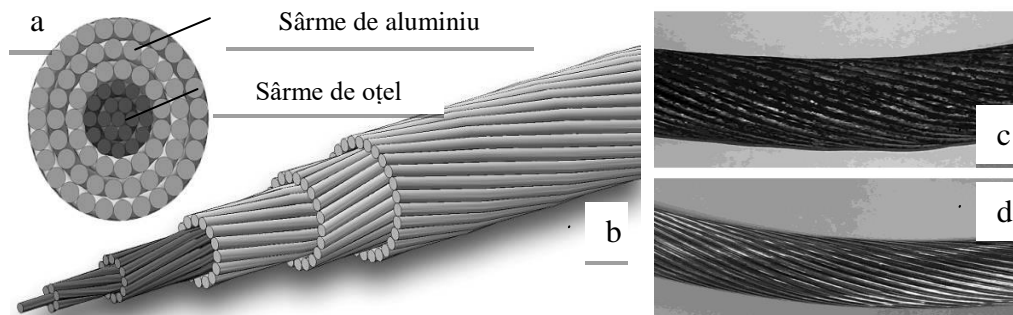


Figura 3.2. Imagine de ansamblu a conductorului: a- secțiunea conductorului; b- straturile de înfașurare; c- îmbătrânit; d- nou

3.2.1. Microgeometria sârmelor de aluminiu în starea inițială

Starea suprafețelor sârmelor, prelevate din conductorul nou, s-a determinat în baza neregularităților superficiale rezultate în urma trefilării. Caracteristicile rugozității au fost măsurate de-a lungul axei sârmelor și evidențiază microprofilul după această direcție. Măsurătorile s-au realizat în cadrul Institutului Național de Cercetare-Dezvoltare în Sudură și Încercări de Materiale, ISIM Timișoara.

Profilul micronegularităților suprafețelor sârmelor de aluminiu este descris în tabelul de mai jos.

Tabel 3.2. Caracterizarea microgeometriei sârmelor de aluminiu noi

Proba	Ra [μm]	Rq [μm]	Ry [μm]	Rz [μm]	Rt [μm]
1.1	1,09	1,51	9,57	9,57	9,57
	0,96	1,16	5,56	5,56	5,56
1.2	0,39	0,50	3,41	3,41	3,41
	0,38	0,56	3,88	3,88	3,88
1.3	0,23	0,29	2,88	2,88	2,88
	0,20	0,32	4,54	4,54	4,54
2.1	0,42	0,86	12,06	12,06	12,06
	0,26	0,42	4,05	4,05	4,05
2.2	0,25	0,34	3,35	3,35	3,35
	0,32	0,46	4,17	4,17	4,17
2.3	0,34	0,44	3,94	3,94	3,94
	0,43	0,71	5,26	5,26	5,26
3.1	0,88	1,37	12,83	12,83	12,83
	0,91	0,41	11,34	11,34	11,34
3.2	0,29	0,40	3,61	3,61	3,61
	0,21	0,41	8,37	8,37	8,37
3.3	0,19	0,25	1,45	1,45	1,45
	0,17	0,25	2,55	2,55	2,55

Unde:

Ra – media aritmetică a tuturor vârfurilor de pe probă

Rq – abaterea medie pătratică a parametrului Ra

Ry – adâncimea maximă de rugozitate

Rz – înălțimea maximă de rugozitate

Rt – adâncimea totală de rugozitate

Măsurarea de-a lungul axei liniare este folosită pentru a determina calitățile de retenție a lubrifiantului pe suprafețele de așezare, pentru caracterizarea defectelor de suprafață și pentru caracterizarea tipului de interacțiune ce va avea loc la suprafața sârmelor conductorului. Dispunerea și densitatea golurilor superficiale au o influență deosebită asupra comportamentului și dispunerii particulelor în suspensie și asupra tipului de contacte dintre sârme.

3.3. Evaluarea efectului de îmbătrânire folosind metoda spectroscopiei cu raze X

3.3.1. Considerații generale privind microscopia electronică

Dezvoltarea microscopiei electronice începând cu anul 1931, s-a axat pe două tipuri de microscopie electronice, fundamental diferite: microscopul electronic de transmisie, cunoscut în literatura de specialitate ca TEM (Transmission Electron Microscope) și microscopul electronic de baleiaj, SEM (Scanning Electron Microscope) [Vizureanu, 2011].

Deși a fost dezvoltat mult mai târziu decât cel cu transmisie, SEM este astăzi cel mai folosit microscop electronic în fizica și ingineria materialelor, datorită unor avantaje majore cum ar fi: posibilitatea obținerii morfologiei, topografiei și compoziției fizice a suprafeței. Microscopul electronic cu baleiaj (SEM) se bazează pe aceleași principii ca și microscopul optic, cu singura deosebire că sursa de lumină este, în acest caz, un fascicol de electroni, iar lentilele nu sunt optice, sunt electromagnetice examinate. Acestea permit o rezoluție bună asociată cu adâncime de câmp mare și un domeniu întins și continuu al măririi.

3.3.2. Detecția cu raze X pe conductoare noi și îmbătrânite

Pentru determinări s-au folosit conductoare noi și îmbătrânite, din care s-au prelevat sârme de aluminiu pregătite la lungimi impuse de dimensiunile suportului microscopului electronic din cadrul Facultății de Chimie Industrială și Ingineria Mediului al Universității Politehnica Timișoara. Având în vedere conductivitatea termică a acestora, nu a fost necesară încărcarea probelor cu electroni absorbiți, iar imaginile obținute au fost stabile. În ambele cazuri, conductoare noi și îmbătrânite, supra-fețele sârmelor nu au fost decontaminate pentru a putea avea o imagine clară a diferenței de aspect, formă și dimensiunea particulelor superficiale, a defectelor superficiale, a stratului de lubrifiant și a topografiei suprafeței.

În cazul conductoarelor îmbătrânite, obținerea de imagini evidențiază existența abaterilor de la caracteristicile generale ale sârmelor în funcție de poziția ocupată în cadrul LEA și de zona de prelevare. Microanaliza a făcut posibilă determinarea distribuțiilor de elemente chimice pe sârmele de aluminiu, concentrația elementului principal pe direcția longitudinală și determinarea stratului protector de oxid. Intensitățile cu raze X au fost măsurate prin numărătoarea de fotoni, iar precizia obținută este limitată de eroarea statică. Precizia analitică generală este de $\pm 2\%$.

Aspectul atât de diferit al celor două suprafețe este dat, în principal, de existența unor incluziuni de tip și natură diferite, în materialul de bază. Determinarea semi-cantitativă a compoziției chimice a probei s-a făcut prin stabilirea intensităților relative ale radiației X caracteristice pentru elementele prezente în probă, în punctul analizat, prin raportarea intensităților absolute la intensitățile corespunzătoare emise de probe etalon pure, de obicei monocristale, datorită omogenității structurale.

Figura 3.3 prezintă aspectul suprafețelor a două sârme de aluminiu: (a) sârmă de aluminiu prelevată dintr-un conductor nou; (b) sârmă dintr-un conductor îmbătrânit.

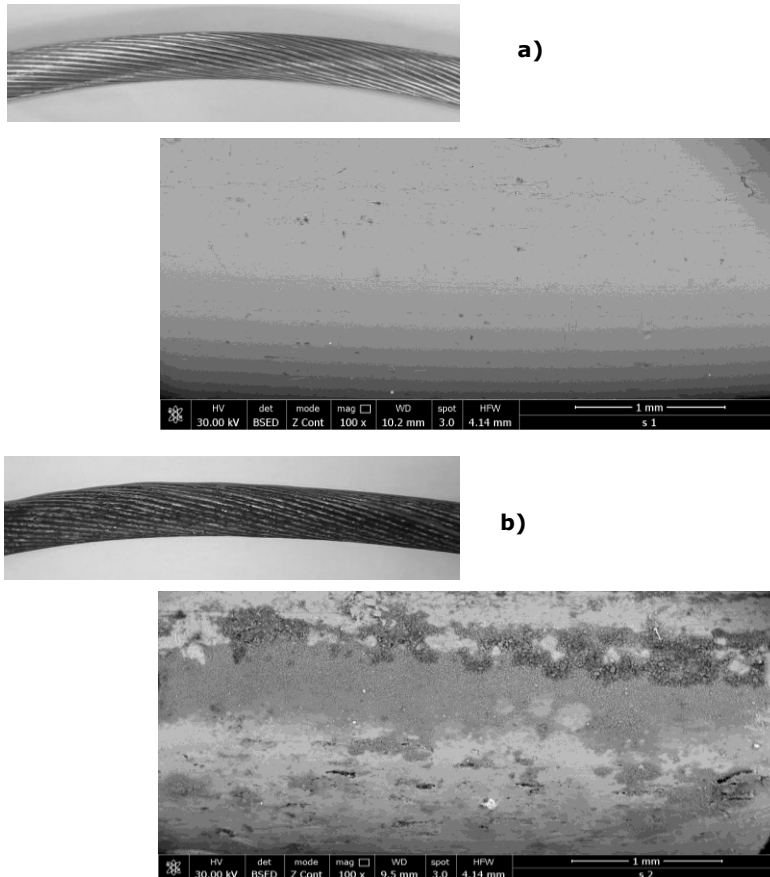


Figura 3.3. Imagine de pe suprafața sârmelor de aluminiu: a) sârmă nouă; b) sârmă îmbătrânită

Particulele în suspensie, datorită dimensiunilor foarte mici și a stării de agregare solide sau lichide, sunt capabile să se deplaseze pe distanțe mari și să se depună pe suprafața conductoarelor. La punerea în funcțiune a conductorului, când stratul de lubrifianț este mai gros, particulele solide aderă în cantitate mai mare, iar cele lichide crează mediul propice pentru dezvoltarea de reacții chimice. Este influențată, în primă instanță, suprafața sârmelor de aluminiu unde în funcție de dimensiuni, formă și proveniență, particulele pot adera la suprafața conductoarelor sau chiar să patrundă în masa acestora odată cu apariția mișcărilor relative dintre sârme. Totodată, este influențată grosimea stratului de lubrifianț, ca urmare a acțiunii diversilor compusi chimici, rezultând condiții favorabile de uzură prin frecare și oboseală prin frecare. Existența acestora pe suprafețele sârmelor reliefează un nou profil și poate crea îndepărtare de material cu formare de cavități, ca în imaginea de mai jos.

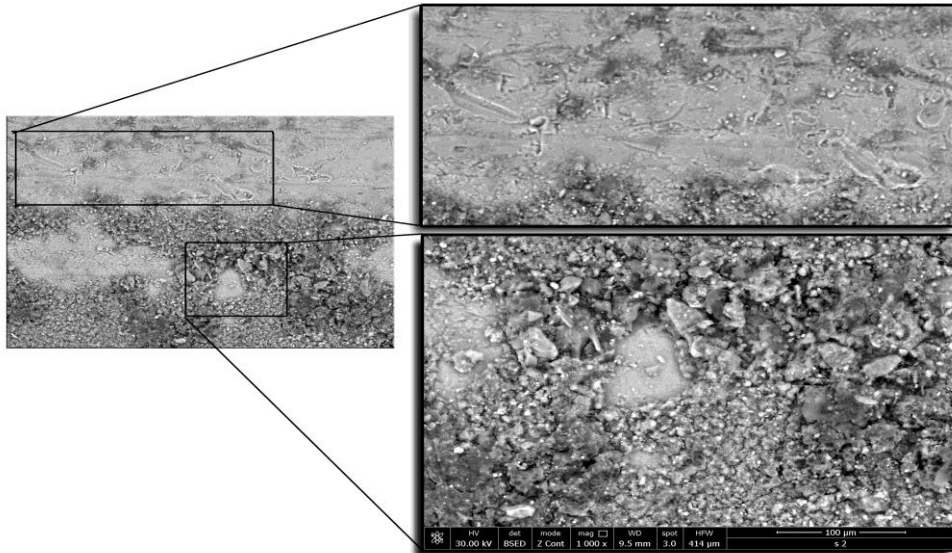


Figura 3.4. Formațiuni de particule de la suprafața conductoarelor

Datorită zonelor geografice pe care le strabate lina LEA, urban și extraurban, dimensiunile particulelor sunt variate, existând particule cu diametrul $\leq 2.5\mu\text{m}$, cu diametrul cuprins între $2,5-10\mu\text{m}$ și cu diametrul între $10-100\mu\text{m}$. Aglomerarea de particule se face în zona de contact dintre sârme din stratul superior, dar și la contactul interstrat, particulele fiind întâlnite chiar și pe suprafața sârmelor de oțel în cazul probelor prelevate în zonele clemelor de fixare.

3.3.3. Spectroscopia de radiație X cu dispersie de energie

Variația anumitor proprietăți din probe s-a determinat studiind profilul concentrației elementelor chimice pe o anumită direcție. Intensitatea relativă a radiației X emisă de probele astfel obținute reprezintă, cu aproximație, concentrația fiecărui element prezent în probă, în punctul analizat. Analiza cantitativă presupune determinarea unui factor k definit prin raportul dintre intensitatea radiației X pentru elementul a cărui concentrație este necunoscută și intensitatea radiației aceluiași element într-o probă standard și efectuarea corecțiilor de număr atomic, de absorbție și de fluorescență.

Analiza chimică are loc în momentul ionizării paturilor interne, prin intermediul transferului de energie. Emisia de radiații X caracteristice se realizează atunci când vacantele electronice sunt ocupate de electroni de pe paturi exterioare, ceea ce se întâmplă la un interval de timp de aproximativ 10-14 secunde. Spectrele de radiație X caracteristică, analizate pentru sârmele noi și îmbătrânite, furnizează atât informații calitative cât și cantitative despre alcătuirea chimică.

În figurile de mai jos 3.5 și 3.6, se prezintă microanaliza cu raze X a sârmelor de aluminiu prelevate din conductoare noi și îmbătrânite LEA cu ajutorul modulului de spectrometrie cu energie dispersată cu raze X. Aceasta este o componentă a SEM, folosită pentru identificarea elementelor chimice existente în probele analizate. Pe abscisă este reprezentată scara energiei, având ca unitate de măsură keV- kiloelectron-volt-ul, un multiplu zecimal al electrovoltului. Folosind

intervale de valori similare ale energiei, în care sunt aplicate raze X continuu, se pot distinge vârfurile caracteristice.

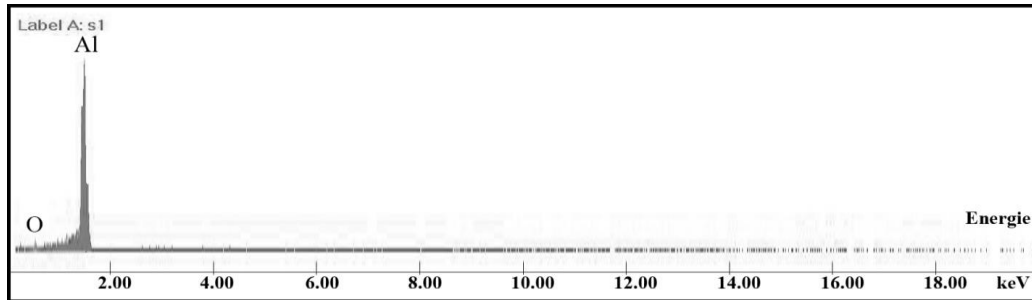


Figura 3.5. Spectrul de radiație X caracteristic pentru sârma nouă

Având în vedere specificul sârmei pe care s-au făcut determinările, singurul vârf caracteristic în care se înregistrează alt element chimic decât Al este dat de cel al oxigenului. Aceasta, datorită proprietății importante a aluminiului de a forma un strat protector de oxid (aproape instantaneu), cu rol de protecție la coroziune.

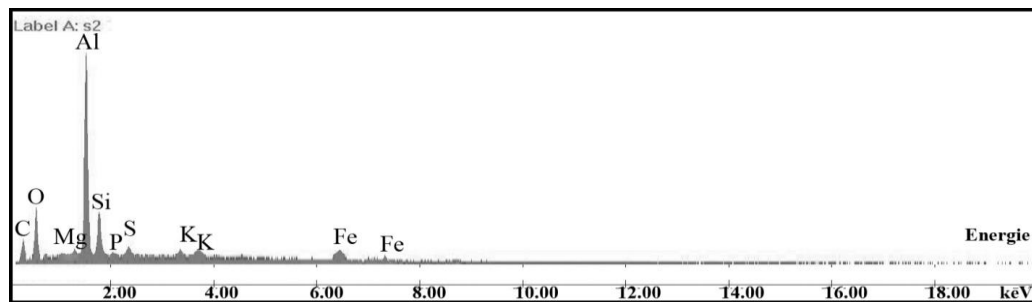


Figura 3.6. Spectrul de radiație X caracteristic pentru sârma îmbătrânită

Pe lângă cele două elemente întâlnite la sârmele noi, sârmele îmbătrânite prezintă o serie de elemente a căror proporție variază odată cu poziția de unde se face prelevarea. Astfel, unele elemente sunt specifice zonelor puternic industrializate, zonelor preponderent agricole și zonelor urbane. O variație a stratului de oxid este dată de timp, astfel încât, în cazul sârmelor îmbătrânite se observă o creștere substanțială a vârfului caracteristic oxigenului. Se mai întâlnesc următoarele elemente: carbon, magneziu, siliciu, fosfor, sulf, potasiu, fier și compusi ai acestora cum ar fi fluoruri, clorură, azotați, oxizi și sulfat.

Înțelegerea influenței acestora asupra elementului studiat presupune cunoașterea proprietăților lor. În tabelul de mai jos, Tabelul 3.3 se găsesc informații despre elementele întâlnite [wikipedia 2016].

Tabel 3.3. Proprietățile elementelor chimice întâlnite pe suprafața sârmelor

Nume	Simbol	Nr. atomi c	Masă atomică [g/mol]	Densitate la 20 °C [g/cm ³]	Punct de topire [°C]	Punct de fierbere [°C]
Aluminiu	Al	13	26,981539	2,70	660,5	2467
Carbon	C	6	12,011	3,51	3550	4827
Oxigen	O	8	15,9994	0.00133	-218,4	-182,9
Magneziu	Mg	12	24,305	1,74	648,8	1107
Siliciu	Si	14	28,0855	2,33	1410	2355
Fosfor	P	15	30,973762	1,82	44 (P ₄)	280 (P ₄)
Sulf	S	16	32,066	2,06	11	444,7
Potasiu	K	19	39,0983	0,86	63,7	774
Fier	Fe	26	55,847	7,87	1535	2750

Straturile de produse de coroziune variază ca grosime pe suprafețele de contact ale sârmelor cu mediul ambient, dar au efecte scăzute datorită proprietății aluminiului de a forma un strat de oxid, care îi crește rezistența la coroziune.

O variație se observă și în cazul modificării locației geografice care, în funcție de factori ca vremea, direcția vântului, precipitații, temperatură, cantitatea și tipul de poluanți, precum și apropierea de corpurile naturale de apă, accelerează procesul.

Prezența compușilor chimici atmosferici modifică comportarea în timp a conductoarelor pentru tipuri similare de solicitări. Dioxid de sulf (SO₂) contribuie la acidifierea precipitațiilor, care se constituie în agent de accelerare al coroziunii metalelor, din cauza formării acizilor. Oxizii de sulf pot eroda piatra, zidaria, vopselurile, fibrele, hârtia, pielea și componentele electrice. La temperatura mediului ambiental, monoxidul de carbon (CO) este un gaz incolor, inodor, insipid, de origine atât naturală cât și antropică. Monoxidul de carbon se formează în principal prin arderea incompletă a combustibililor fosili.

Oxizii de azot (NO_x) sunt un grup de gaze foarte reactive, care conțin azot și oxigen în cantități variabile. Favorizează acumularea nitraților la suprafața conductoarelor, care pot provoca alterarea echilibrului ecologic ambiental prin degradarea metalelor.

Prezența mineralelor de fier FeO(OH) pe firele de oțel galvanizat ajută la deteriorarea stratului de zinc de pe suprafața sârmelor de oțel galvanizat.

3.3.4. Aplicarea termografiei pentru analiza sârmelor de aluminiu

Folosind o metodă a analizei termice, denumită DSC (Differential Scanning Calorimetry) s-au determinat modificările proprietăților de material odată cu temperatura. Probele din conductor, supuse sau nu îmbătrânirii au fost caracterizate prin DSC, ceea ce a permis studiul proceselor de absorbție de căldură (cantitatea de căldură absorbită de probă) precum și determinarea entalpiei de topire înainte și după îmbătrânire. Această tehnică permite determinarea fluxului de căldură schimbată de o substanță, în funcție de temperatură; integrarea acestui flux în timp dă consumul de căldură, sau variația entalpiei probei.

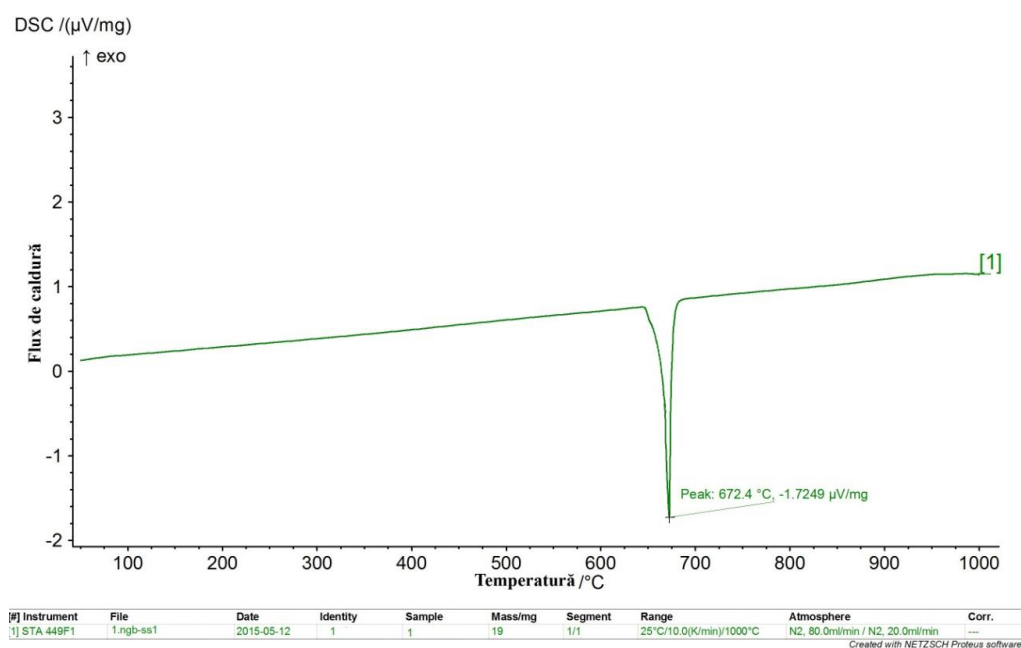


Figura 3.7. Termograma DSC - sârmă de Al nouă

O analiză făcută pe probele de aluminiu este cea care face referire la efectul îmbătrânirii asupra materialului de bază, în ceea ce privește transportul de energie electrică. În Figurile 3.7 și respectiv 3.8 sunt prezentate termogramele obținute pentru sârme noi, neîmbătrânite respectiv, utilizate în transportul de energie electrică, supuse procesului de îmbătrânire. Picul descrie un proces endoterm, în care proba absoarbe căldură, iar cel de-al doilea pic descrie un proces exoterm, datorat unor modificări fizice sau chimice ale probei care, în acest caz, degajă căldură.

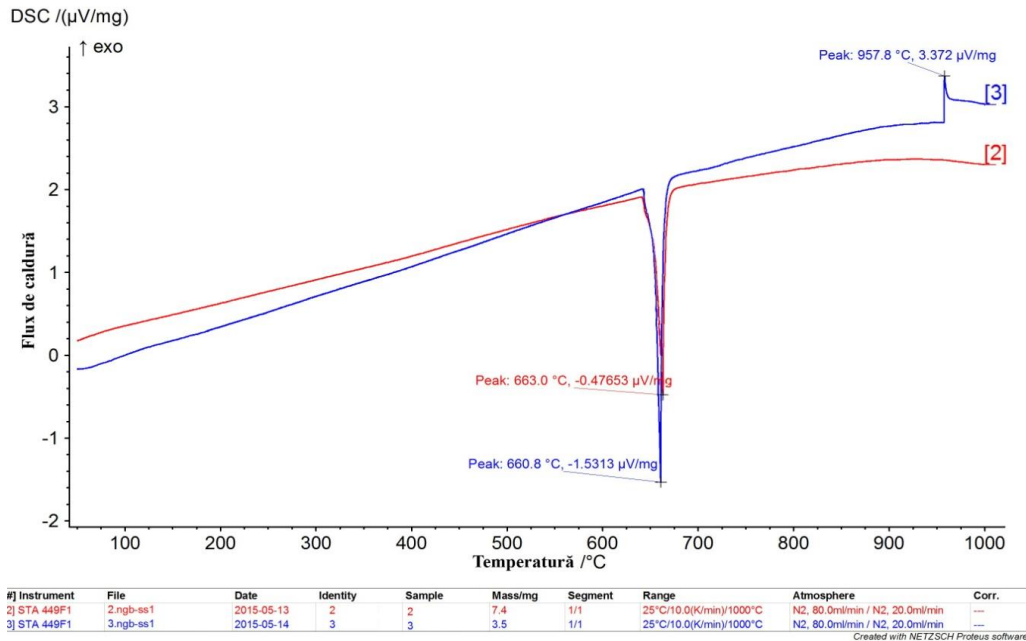


Figura 3.8. Termograma DSC - sârme de Al îmbătrânite: [2] - probă din câmp; [3] - probă din clemă

Deosebirea principală dintre cele două termograme constă în faptul că linia de bază, determinată de fluxul de căldură dat de creșterea tensiunii, pe unitatea de masă a materialului, absorbită de acesta în domeniul elastic, este în jurul valorii de $0.15\mu\text{V/mg}$ pentru sârma nouă și $0.2\mu\text{V/mg}$, respectiv $-0.2\mu\text{V/mg}$ la sârma îmbătrânită. Temperatura la care se obține picul, corespunzător regiunii de curgere viscoelastică și topirii materialului, este destul de diferită, 672°C cu $-1.725\mu\text{V/mg}$, respectiv 661°C cu $-1.531\mu\text{V/mg}$ și 663°C cu $-0.476\mu\text{V/mg}$. Se constată variații destul de mari ale termogramelor sârmelor îmbătrânite ca urmare a conținutului diferit de elemente prezente pe masa de material. Odată cu creșterea conținutului, linia de bază este mai scăzută la valori mai mici și crescută la valori mari ale tensiunii, în timp ce temperatura picului este puțin mai scăzută, dar cu o diferență mai mare a tensiunii $\mu\text{V/mg}$.

3.3.5. Particularități ale coroziunii conductoarelor după perioade lungi de exploatare

Mediul înconjurător și regimul dinamic de exploatare modifică proprietățile conductoarelor prin dezvoltarea fenomenului de coroziune. Acesta este un proces similar cu gravarea chimică sau anodizarea, cu diferența că procesul este unul de durată. Este întâlnită atât în cazul sârmelor de aluminiu care, deși este un metal pasiv, are reactivitate chimică mare, cât și cazul sârmelor din oțel odată cu degradarea stratului galvanic. Coroziunea aluminiului implică distrugerea stratului de oxid de aluminiu, rezultat în urma pasivizării, prin adsorbție de anioni. Această reacție chimică de dizolvare este urmată de atacul direct al metalului [Havard,1992].

În cazul sârmelor de aluminiu îmbătrânite s-au întâlnit mai multe tipuri de coroziune:

- coroziunea continuă** – Figura 3.9 a, apare la suprafața sârmelor datorită modificării PH-ului din mediul înconjurător, dat de elementele chimice predominante. Reacția aluminiului cu apă eliberează o cantitate foarte mare de energie. De exemplu, aluminiul sub formă de pulbere este utilizat drept carburant solid pentru propulsia navetelor spațiale [Havard, 1992, II].
- coroziunea atmosferică** – Figura 3.9 a, apare datorită expunerii continue la aer și la poluanții săi. Are caracter continuu și este influențată de tipul și concentrația poluanților atmosferici. Așa cum s-a observat în cadrul spectroscopiei de radiație X, prezența elementelor chimice indică dezvoltarea unui mediu poluant, al cărui efecte se vad pe suprafața sârmelor și variază de la o poziție geografică la alta.
- coroziunea din golurile materialului** – Figura 3.9, se dezvoltă în defectele de material sau în fisuri de suprafață. Aceasta se datorează prezenței apei cu sare care intră în aceste interstiții, unde au loc fenomenele de dislocare și dispariție a aluminiului.

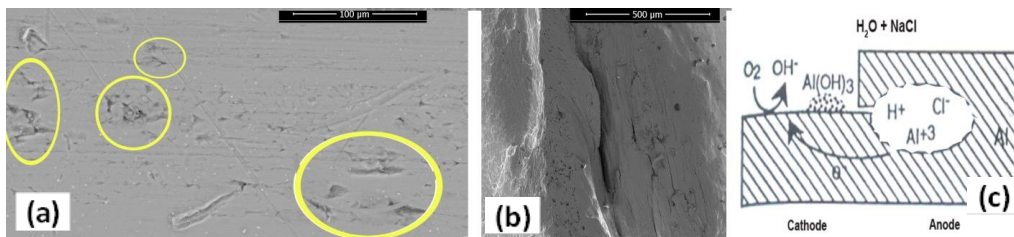


Figura 3.9. Aspectul golurilor din material; (a)goluri de suprafață; (b) goluri de profunzime; (c)-[Azom, 2016]) reacție chimică specifică golurilor din material

- Petele de coroziune** – Figura 3.10 (a), acestea apar sub formă de pete aleatorii pe suprafața sârmelor, în condiții de umiditate și temperatură normale. Localizarea este ca și în cazul coroziunii din goluri, în defectele de superficiale de material.

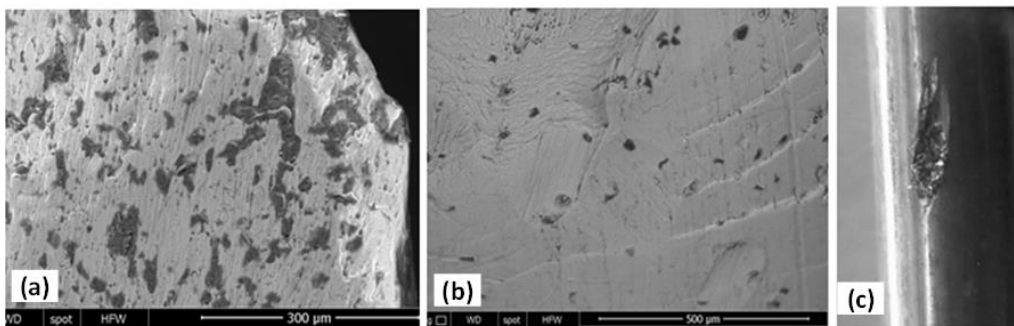


Figura 3.10. Tipuri de coroziune: (a) pete de coroziune; (b) coroziunea de oboseală; (c) coroziunea prin frecare

- e. Coroziunea prin frecare** – Figura 3.10 (c), apare ca urmare a frecărilor dintre suprafețele sârmelor și are aspectul unei pete negre acoperite cu praf. Aceasta se datorează presiunii de contact în urma careia particulele de material dislocate se lipesc între ele apoi se rup și se lipesc din nou.
- f. Coroziunea de oboseală** – Figura 3.10 (b), este des întâlnită datorită caracterului repetitiv al tensiunilor mici ce se exercită asupra sârmelor de aluminiu aflate în mediul de lucru. Fisurile sau deformațiile plastice superficiale, datorate mișcărilor și tensiunilor din sârme crează zone în care coroziunea se poate dezvolta.

În cazul sârmelor de oțel coroziunea apare acolo unde pelicula de gresare dispare, iar stratul galvanic este deteriorat datorită frecărilor dintre sârmele conductorului. Coroziunea mai poate avea loc prin dizolvare și precipitarea zincului în medii acide, astfel încât produsele de coroziune se acumulează pe suprafață. Analiza probelor din componența LEA indică existența produselor amorfe (care nu prezintă o structură cristalină regulată) pe suprafețele sârmelor de aluminiu și oțel galvanizat, iar pe suprafețele răzuite din interiorul și exterior toronului s-au constatat structuri cristaline cu goluri.

În general coroziunea atmosferică a conductoarelor LEA indică faptul că sunt necesare multe date complete de mediu pentru a determina corozivitatea atmosferică a locației. În baza măsurărilor de teren asupra materialelor corozive, particulelor în suspensie și concentrațiile lor în aer, se poate dezvolta un indice de coroziune, particularizat pe zone [Havard, 1992, II].

3.4. Contribuții privind influența vitezei vântului asupra presiunii dinamice folosind simularea numerică a curgerii

Prezentul subcapitol cuprinde o serie de simulări, calcule și rezultate care au fost posibile ca urmare a colaborării cu departamentele Mașini Hidraulice și Pneumatice; Termotehnică, Mașini Termice și Autovehicule Rutiere din Universitatea Politehnică Timișoara.

În general, conductoarele se calculează la încărcări statice date de greutatea proprie, care corespund unei fracțiuni din rezistența la rupere a conductorului și a forței de întindere, datorată pozării conductoarelor. La calculul mecanic LEA curbele de montare ale conductoarelor se determină prin puncte, cu ajutorul ecuației de stare la diverse temperaturi. În literatura de specialitate curbele de montare se referă la variația efortului σ și a sașeții f în funcție de temperatura t . Cu ajutorul ecuației de stare se exprimă legătura între mărimile ce caracterizează o stare cunoscută și cele care aparțin unei stări cunoscute doar parțial, corespunzătoare greutății conductorului acoperit de chiciură, și acțiunii vântului.

$$\alpha(t_a - t_b) + \frac{1}{E} (\partial_{0a} - \partial_{0b}) = \frac{l_e^2}{24} \left[\left(\frac{g_a}{g_{0a}} \right)^2 + \left(\frac{g_b}{g_{0b}} \right)^2 \right] \quad (3.1)$$

$$f_i = \frac{g_b \cdot l_i^2}{8 \cdot g_{0b}} \quad (3.2)$$

unde sunt implicate următoarele mărimi:

- α - coeficient de dilatare liniară
- E - modulul lui Young
- f_i - săgeata în deschiderea i
- l_e - lungimea deschiderii echivalente
- l_i - lungimea deschiderii panoului i

O relație de calcul finală este scrisă simplificat folosind coeficientii u, v, w și parametrul t :

$$f(x) = x^3 + (u + v \cdot t)x^2 - w = 0 \quad (3.3)$$

În cazul LEA 220 kV parametrii au următoarele valori: $u=484,52$; $v=1,4975$; $w=2,0565 \times 10^5$ iar temperature are valori cuprinse între -30°C și 40°C .

Un rol deosebit de important în degradarea conductoarelor îl au sarcinile variabile care apar datorită acțiunii vântului. Pornind de la acest aspect, în cadrul acestui capitol este studiat un model de abordare numerică a stărilor de tensiune și deformație ce se exercită asupra unui conductor aflat sub acțiune vântului.

3.4.1. Particularități ale curgerii aerului peste un conductor

Datorită energiei cinetice a vântului exercitate pe suprafață conductoarelor aflate pe direcție perpendiculară celei de curgere, se exercită o presiune dinamică. Curgerea aerului peste conductoare produce efecte de antrenare a acestuia și prezintă un real interes pentru înțelegerea, studierea și caracterizarea fenomenului curgerii aerului și efectele create asupra conductorului. Antrenarea este de natură vâscoasă, generată de frecarea aerului de conductor și de natură inerțială, generată de presiunea dinamică a aerului asupra acestora. Fenomenul complex ce caracterizează mișcările și performanțele echipamentelor electrice aflate în funcționare, influențează în mod direct durata de viață a acestora.

La valori mici ale vitezelor aerului, forțele vâscoase sunt suficient de mari pentru ca să mențină mișcarea acestuia în straturi paralele. La valori mari ale vitezelor, apar efecte inerțiale importante, mișcarea devenind turbulentă. O curgere turbulentă se generează și dacă pe direcția de curgere se găsesc corpuri solide. Formarea în dâra corpului solid a unor structuri de vârtej cauzează fluctuații ale forței de presiune, defecte în zonele de prindere sau chiar ruperea conductoarelor. Acest fenomen a fost pus în evidență de către von Karman încă din 1912, prin analiza stabilității structurilor de vârtej din aval de un corp neprofilat, stabilind o relație teoretică dintre structura vârtejurilor formate la curgerea peste un corp neprofilat și rezistența la înaintare a corpului. În 1966 Gerrard prezintă o descriere amănunțită a mecanismului de formare al vârtejurilor din dâra unui corp solid.

Vântul antrenează conductoarele în oscilații mecanice cu amplitudini și frecvențe variabile. Există o stransă legătură între amplitudinea și frecvența care, în literatura de specialitate, conduce la separarea în trei a mecanismelor de excitație: vibrații galopante, vibrații eoliene și oscilații secundare ale conductorului. O curgere a aerului perpendicular pe conductor provoacă în dâra vârtejuri, care sunt influențate de viteza de curgere și de numărul lui Reynold.

Formarea vârtejurilor se bazează pe interacțiunea dintre două straturi adiacente de fluid având valori ale efortului tangențial diferite [Șandor, 2005].

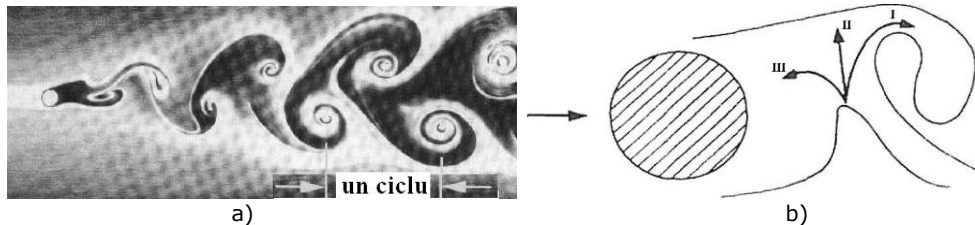


Figura 3.11. Modul de formare al vârtejurilor la curgerea peste un cilindru
a) Karman - 1912 [Irvine, 2005] b) Gerrard - 1966[Șandor, 2005]

În figura de mai sus este descris modul de formare a vârtejurilor, cu mențiunea că Gerrard descrie modul de mișcare a aerului în cadrul unui ciclu descris de Karman. În zona din imediata vecinătate a cilindrului, cele trei direcții indicate de săgeți descriu dezvoltarea rapidă a unui vârtej (directia I) în zona periferică, iar odată cu creșterea tensiunii de forfecare (directia II), se desprind particule de fluid care formează vârtejuri ce au sens de rotație opus (directia III) cu generearea unei zone de amestec.

Curgerea peste conductor scoate în evidență complexitatea fenomenului studiat prin instabilitatea curgerii în dâră, analiza separării curgerii în aval de conductor și prin dezvoltarea structurilor de vârtejuri nestationare de tip von Karman.

În Figura 3.12 se poate observa cum se transformă regimul curgerii, din laminar în turbulent, la trecerea aerului peste conductorul studiat și cum se dezvoltă vârtejurile. Pentru aceasta s-a conceput o instalație de marcarea curgerii fluxului de aer peste conductorul 450/75, folosind un marcator de curgere laminară, produs de Tintschl BioEnergie und Strömungstechnik AG.

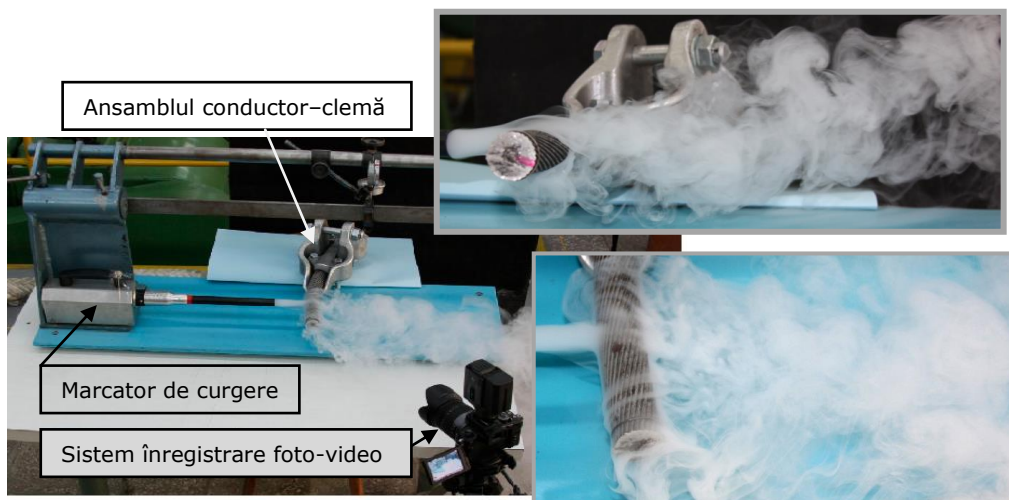


Figura 3.12 Instalației de marcarea curgerii fluxului de aer. Detalii de curgere peste profilul conductorului

Tranziția curgerii aerului de la regim laminar la regim turbulent duce la crearea de vârtejuri atât în plan vertical, cât și în plan orizontal, ca urmare a apariției amestecului descris de Gerrard, care definește complexitatea curgerii prin

trei tipuri de curgere și anume: curgerea în stratul limită, curgerea în stratul de desprindere și curgerea în dâră. Doi parametri foarte importanți în analiza apariției și dezvoltării vârtejurilor sunt numărul Reynolds - care caracterizează regimul unei curgeri și numărul Strouhal - care descrie mecanismele de curgere oscilante. Dâra formată se rupe sub forma unor vârtejuri alternate odată cu ajungerea la valori mari ale numărului Reynolds $Re=104$, așa numitele vârtejuri Bernard-Karman.

O relație empirică între aceste numere, pentru o secțiune circulară, este prezentată de Blevins, [Blevins, 1984], iar valorile corespunzătoare se găsesc în tabelul de mai jos.

Tabel 3.4. Corespondența între numărul Reynolds și numărul Strouhal pentru o secțiune circulară

Numarul Reynolds Re	Numarul Strouhal S
< 30	0
50	0,13
500	0,20
1000	0,21
10^4	0,20
10^5	0,19
10^6	0,21
10^7	0,23

Se cunoaște că numărul Reynolds Re se poate calcula cu relația:

$$Re = \frac{U \cdot D}{\nu} \quad (3.4)$$

unde:

U - viteza fluidului liber

D - diametrul conductorului

ν - coeficientul de vâscozitate cinematică

În cazul aerului, coeficientul de vâscozitate cinematic are valoarea

$$\nu = 1,49(10^{-5}) \text{ m}^2/\text{s}.$$

Numărul Strouhal S se calculează cu relația:

$$S = f_s \frac{D}{U} \quad (3.5)$$

unde:

f_s - este frecvența de cicluri complete ale vârtejurilor de curgere [Hz]
cunoscută sub numele de frecvența Strouhal

În literatura de specialitate, unii autori, numesc această frecvență ca fiind frecvența de oscilație pe verticală și este calculată cu relația:

$$f_s = \frac{S \cdot U}{D} \quad (3.6)$$

În cazul conductoarelor, termenul de rezonanță poate fi luat în discuție doar dacă frecvența Strouhal coincide cu frecvența naturală a liniei de înaltă tensiune [Irvine, 2005].

3.4.2. Tipuri de vibrații generate de vant și efectele acestora asupra conductoarelor

Conductoarele sunt structuri cu răspuns dinamic la vânt, la care ponderea componentei rezonante este de obicei dominantă față de ponderile celorlalte componente, ce corespund frecvențelor unor moduri superioare de vibrație [Ordinul, 2012]. Acțiunea vântului se poate reprezenta ca o distribuție echivalentă de presiuni aplicate static pe suprafața conductorului și care produc valorile maxime ale deplasărilor și eforturilor secționale, cauzate de acțiunea dinamică a vântului.

În conformitate cu prevederile de proiectare a structurilor, acțiunea vântului poate fi reprezentată de:

- presiunile exercitate de vânt pe față conductorului;
- presiunile totale (rezultante) exercitate de vânt pe ambele suprafețe ale conductorului;
- forțele și momentele rezultante din acțiunea vântului;
- forțele și momentele pe unitatea de lungime, exercitate de vânt de-a lungul axei conductorului;
- forțele tangențiale exercitate de vânt pe suprafețele paralele cu direcția.

Sub efectele vântului, elementele cele mai importante ale LEA suferă daune care pot duce la eșec catastrofal. Acțiunea vântului asupra conductoarelor diferă în funcție de direcția și viteza de deplasare a maselor de aer. Poziția conductoarelor pe durata exploatarei favorizează vibrațiile din vânt, ale căror amplitudini și frecvențe sunt variabile în timp și spațiu. Astfel, în lungul conductorului efectele vântului se modifică odată cu creșterea distanței față de punctele de fixare. Tensionarea conductorului și presiunea de contact din clemele de suspensie induce tensiuni între conductor și clemă și între sârmele conductorului. Oscilațiile periodice, orizontale și verticale, ale conductoarelor provocate de vânt formează pe lungimea deschiderii o serie de unde stationare cu amplitudine variabilă.

Vibrațiile eoliene aplică o încărcare alternată și produc alunecări ale punctelor specifice de contact. Vibrațiile cresc odată cu deschiderea între stâlpi și tracțiunea în conductor [Rucăreanu, 1989]. Totodată, direcția de deplasare a maselor de aer precum și profilul conductorului duc la modificări ale traiectoriei și ciclicității în mișcare a conductoarelor, ca urmare a cursului de aer. Acțiunea și efectele vântului variază odată cu înălțimea conductoarelor deasupra solului. Deși o creștere în înălțime este defavorabilă, aceasta nu se poate evita datorită criteriilor de siguranță în exploatare, cum ar fi săgeata, distanța minimă între sol și LEA.

Mișcarea maselor de aer induce conductoarelor oscilații care, în funcție de viteza de deplasare a aerului și de frecvența acestora formează trei tipuri de vibrații:

- **vibrații galopante**
- **vibrații eoliene**
- **oscilații secundare**

Caracteristicile principale și valorile definitorii ale domeniilor în care se înscriu acestea au fost sintetizate de către [Wind, 1979] în Tabelul 3.5, așa cum se poate vedea mai jos.

Tabel 3.5. Principale caracteristici ale vibrațiilor conductoarelor

Parametru	Vibrații galopante	Vibrații eoliene	Oscilații secundare
Frecvența [Hz]	0,08-3	3-150	0,15-10
Amplitudine [exprimată în diametre de conductor]	5-300	0,01-1	0,5-80
Viteza vântului [m/s]	7-20	1-7	5-20
Tipul suprafeței	Depunere de gheață asimetrică	Depunere de gheață uniformă	Conductor fără depuneri

Vibrațiile galopante sunt produse de interacțiunea forțelor orizontale și verticale generate de vânt și reprezintă vibrații la care amplitudinea are valori mari, de ordinul metrilor, vitezele vântului sunt crescute și conductorul are depuneri neregulate. În general, aceste oscilații sunt în plan vertical și au frecvența de aproximativ 1Hz [Suzanne, 2011; Azevedo, 2002] și sunt favorizate de instabilitatea atmosferică care le favorizează dezvoltarea. Deși acest tip de vibrații este caracterizat de valori mari ale parametrilor, ele nu reprezintă vibrații de rezonanță datorită diferenței de frecvență față de vibrația naturală. Mișcările ample ale conductoarelor iau forma unor elipse alungite sau a unor înlănțuiri de două sau trei elipse și se întâlnesc atunci când masele de aer se mișcă cu viteze mari și se înregistrează depuneri de gheață, preponderent în sezonul rece.

Vibrațiile eoliene sunt consecințele directe ale turbulențelor produse de vântul care suflă asupra conductorului și induce vibrații de înaltă frecvență, datorită creării de vârtejuri în avalul conductorului, provocând încovoieri alternante. Acestea apar la viteze relativ mici de deplasare ale maselor de aer față de liniile de transport care sunt poziționate perpendicular vântului dominant. Mult mai periculoase decât vibrațiile galopante, acestea sunt vibrații la care amplitudinea are valori mici, de ordinul milimetrilor, dar cu frecvențe mari și care ajută la formarea turbionilor [ERPI, 2006]. Tipul și numărul vârtejurilor depind de viteza și de numărul Reynolds și de numărul Strouhal.

Oscilațiile secundare ale conductorului cauzate de instabilitățile create de vânt în aval de conductor produc o oscilație clasică orizontal-eliptică a conductorului la frecvențe joase, de aproximativ 1Hz. Sunt influențate de volumul de fluid turbionar lăsat în urma conductorului la mișcarea aerului, așa numitele vibrații de siaj, care au amplitudini de centimetri cu frecvențe relativ mici. Mișcările se pot dezvolta atât în plan orizontal cât și în cel vertical și pot duce la torsiuni ale conductoarelor ca efect al interacțiunii dintre forțele verticale și cele orizontale.

Toate aceste vibrații produc conductorului un cumul de efecte, cum ar fi tracțiune, încovoiere, presiuni locale concentrate, care duc la apariția și dezvoltarea fenomenului de oboseală. Imaginile de mai sus prezintă aspectul conductorului în vecinătatea clemelor de fixare, zone critice din punct de vedere al siguranței în exploatare. Ca urmare a vibrațiilor aeriene, caracterizate de amplitudini joase, frecvențe ridicate și forme modale cu numeroase bucle pe lungimea unei deschideri, conductoarele sunt supuse la oboseală. Pe lângă fenomenul de oboseală de contact, aceste vibrații produc și solicitarea de încovoiere alternantă. Tensiunile produse de această solicitare afectează, în special, tronsonul de conductor din imediata apropiere a lunetelor de prindere [Suzanne, 2011; A.A. Fadel, 2012; McGill, 1986]; Ramey, 1981].

Alți parametri necesari în clarificarea vulnerabilității la vibrațiile create de vânt sunt constituiți de raportul dintre tensiunea creată de sarcina de tracțiune inițială și de greutatea conductorului, pe unitatea de lungime respectiv, raportul dintre produsul dintre lungime și deschidere, și produsul dintre diametrul conductorului cu masa, pe unitatea de lungime [Guerard, 2011].

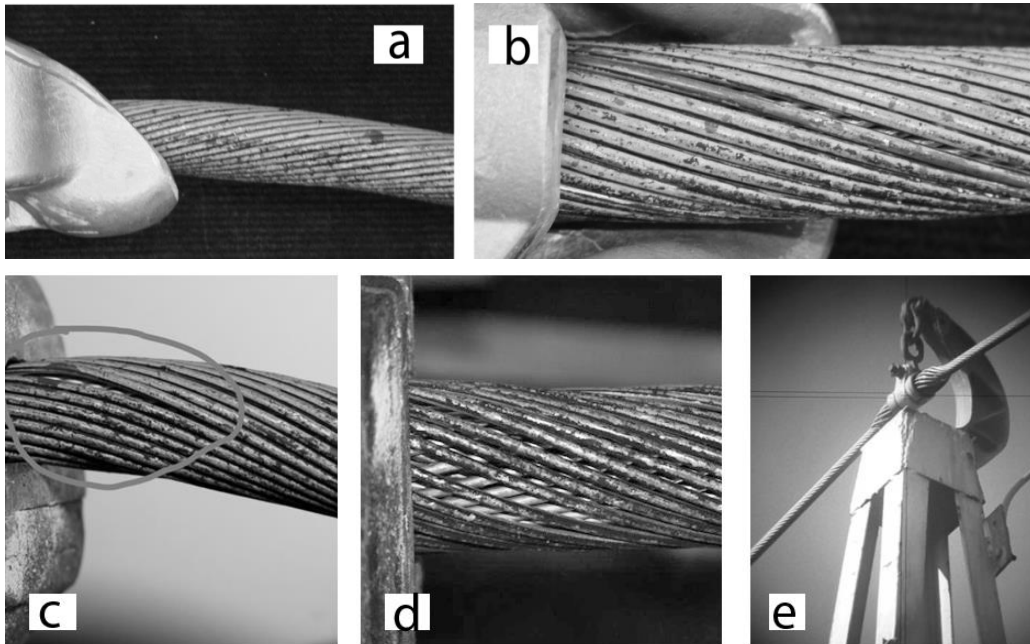


Figura 3.13. Aspectul conductorului în vecinătatea clemei:
a) conductor în staționare, vedere laterală; b) conductor încovoiat, vedere de sus;
c) conductor încovoiat, vedere laterală; d) conductor torsionat, vedere de sus;
e) conductor torsionat, vedere de ansamblu

3.4.3. Simularea curgerii aerului peste conductorul 450/75

Condiții de analiză și definirea domeniului de simulare

Evidențierea aspectului fizic al curgerii aerului în jurul unui conductor suspendat se poate face cu ajutorul unei analize bidimensionale, a mișcării unui curent de fluid, într-un domeniu stabilit. Un factor important pentru obținerea unor rezultate numerice valide, în concordanță cu fenomenul real studiat, îl constituie definirea domeniului de analiză.

Figura 3.14 prezintă domeniul de analiză, respectiv condițiile la limită aferente analizei numerice. Datele geometrice ale domeniului de studiu, respectiv condițiile pe frontiere sunt prezentate în Tabelul 3.6.

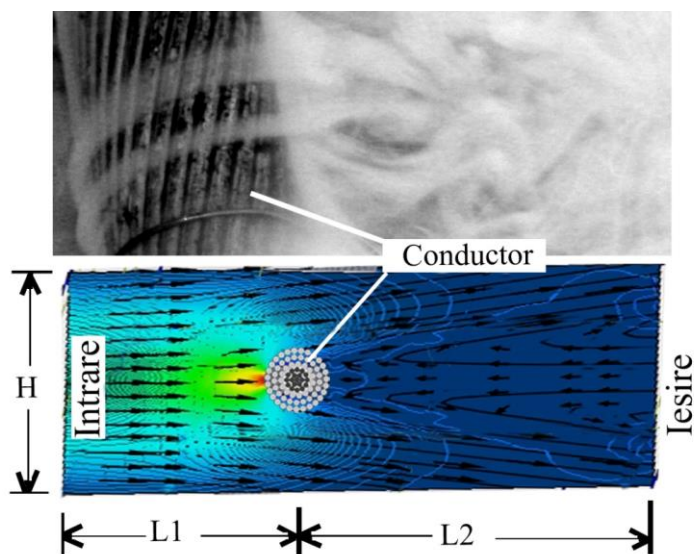


Figura 3.14. Domeniul de analiză și condițiile limită pe frontieră

Tabel 3.6. Definierea domeniului de analiză și a condițiilor limită

Dimensiunile domeniului de analiză		
D	diametrul conductorului	D=29,25 [mm]
H	înălțimea canalului	H=280 [mm]
L ₁	lungimea domeniului în amonte de conductor	L ₁ =140 [mm]
L ₂	lungimea domeniului de analiză în aval de conductor	L ₂ =560 [mm]
Condițiile limită pentru cazul studiat		
U ₀	viteza de intrare	U ₀ =variabil [m/s]
Re	nr. Reynolds echivalent vitezei U ₀	Re=variabil
-	fluidul de lucru	aer
ρ	densitatea fluidului la 20°C	ρ=1,205 [Kg/m ³]
ν	coeficientul vâscozității cinematice	ν=1,49*10 ⁻⁵ [m ² /s]

Având în vedere forma secțiunii conductorului ca fiind foarte apropiată de cea a unui cerc și faptul că în utilizare interstițiile dintre suprafețele sârmei, exterioare zonei de contact, au tendința de a se acoperi cu particule, s-a ales ca în cadrul simulării acesta să fie substituit de un cilindru.

Viteza vântului poate fi estimată prin observarea presiunii pe care o exercită mișcarea aerului asupra obiectelor de la suprafața terestră, la înălțimea de 10m. O astfel de clasificare a vânturilor este dată de scara *Beaufort*. Ținând cont de condițiile de exploatare ale conductoarelor, am ales ca simularea să se facă la 5 valori diferite ale vitezei vântului. În tabelul de mai sus, alături de informațiile despre evaluarea vizuală a intensității vântului, preluate din [Meteorologie, 2016], sunt prezentate vitezele la care s-au făcut simulările, numerele Reynolds și Strouhal corespondente.

Tabel 3.7. Grade Beaufort ale intensității vântului folosite pentru simulare

Intensitate vânt [°Beaufort]	Denumire vânt	Viteza vântului [m/s]	Viteza vântului [km/h]	Efectele produse de vânt	Re
1	Vânt perceptibil	1,6	5,76	Se mișcă unele frunze. Fumul se ridică înclinat spre direcția vântului	$3,14 \times 10^3$
2	Vânt ușor	3	10,8	Simțim adierea vântului pe față. Frunzele foșnesc din când în când. Pânza steagului se mișcă ușor	$5,89 \times 10^3$
3	Vânt slab	5	18	Frunzele și ramurile mici sunt în mișcare continuă. Iarba și grânele se mișcă cu amplitudine mică. Pânza steagului este în mișcare continuă	$9,82 \times 10^3$
5	Vânt semnificativ	10	36	Se leagănă ramurile și tulpinile subțiri ale arborilor. Pânza steagului mare se menține întinsă	$1,96 \times 10^4$
8	Vânt extrem de puternic	20	72	Se leagănă arborii mari, se rup ramurile subțiri și crenguțele uscate. Devine foarte greu a înainta contra vântului. Lovirea valurilor de țărnișă se aude la distanțe enorme	$3,93 \times 10^4$
10	Furtună puternică	27	97	Se semnalează distrugerii. Unii arbori pot fi defrișați	$5,30 \times 10^4$

3.4.4. Modelul de discretizare și procesarea rezultatelor numerice

În vederea obținerii unei soluții numerice corecte s-a ales o discretizare adecvată la domeniul analizat, ținându-se cont de faptul că se dorește obținerea de concluzii asupra următoarelor fenomene:

- formarea structurilor de vârtej în dâra cilindrului;
- fenomenul de desprindere în stratul limită și evidențierea modului de formare a zonelor de recirculare din aval;
- distribuția presiunii pe suprafața conductorului și presiunea totală aplicată acestuia;
- evidențierea curgerii în stratul limită.

Ținând cont de condițiile enunțate anterior, ecuațiile de curgere au fost soluționate utilizând programul folosit în dinamica fluidelor pentru simularea curgerii ANSYS Fluent. Analiza curgerii a fost realizată folosind o rețea medie de discretizare, structurată în elemente de discretizare de tip patrulater, cu următoarele caracteristici:

188 x 125 noduri; 26,490 celule

Mișcarea aerului s-a simulat cu ajutorul ecuațiilor ce guvernează o mișcare bidimensională în regim nestaționar, calculându-se ecuațiile de curgere Navier-Stokes:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (3.7)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (3.8)$$

unde se impun următoarele condiții:

- unde u și v reprezintă componenta tangențială, respectiv normală a câmpului vitezelor fluidului
- la intrare: $u=U_0; v=0$
- condiția de impenetrabilitate a pereților: $u=v=0$
- la ieșire, pentru fiecare variabilă de timp t : $\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} = 0$ (3.9)

Spre deosebire de cazul clasic al curgerii peste un cilindru, în care o importanță majoră o reprezintă identificarea procesului de formare a zonelor de recirculare în aval, în cazul conductoarelor, o importanță deosebită o are presiunea. Apariția vârtejurilor de tip Karman, precum și observarea mecanismului de generare și dezvoltare a acestora în dăra cilindrului influențează distribuția presiunilor pe suprafața conductorului și vibrațiile acestora.

La viteze mici, acest fenomen duce la formarea și dezvoltarea unor vârtejuri de ambele părți ale axei de simetrie a curgerii. Odată cu creșterea vitezei, în partea inferioară a axei de simetrie, se formează vârtejuri cu dimensiuni mai mari decât cele dezvoltate în partea superioară a axei. Acest ciclu de creștere are loc până se atinge suprafața de curent exterioră zonei de recirculare.

În condițiile mișcării fluidului în jurul unui cilindru, pentru valori mai mari ale numărului Re, fluidul din stratul limită laminar nu mai poate urmări conturul corpului pe întreaga suprafață a acestuia, producându-se fenomenul de desprindere. Desprinderea stratului limită are loc atunci când în lungul conturului corpului apare o zonă în care presiunea prezintă o tendință de creștere, moment urmat de desprinderea particulelor de fluid din stratul limită și transportul lor în curentul de fluid exterior [Șandor, 2005].

Figura 3.15 prezintă evoluția liniilor de curgere peste cilindru odată cu creșterea vitezei, punând în evidență formarea regiunii de recirculare în aval de acesta, respectiv formarea de vârtejuri care se rotesc alternativ, numită alee de vârtejuri Kannan [Șandor, 2005].

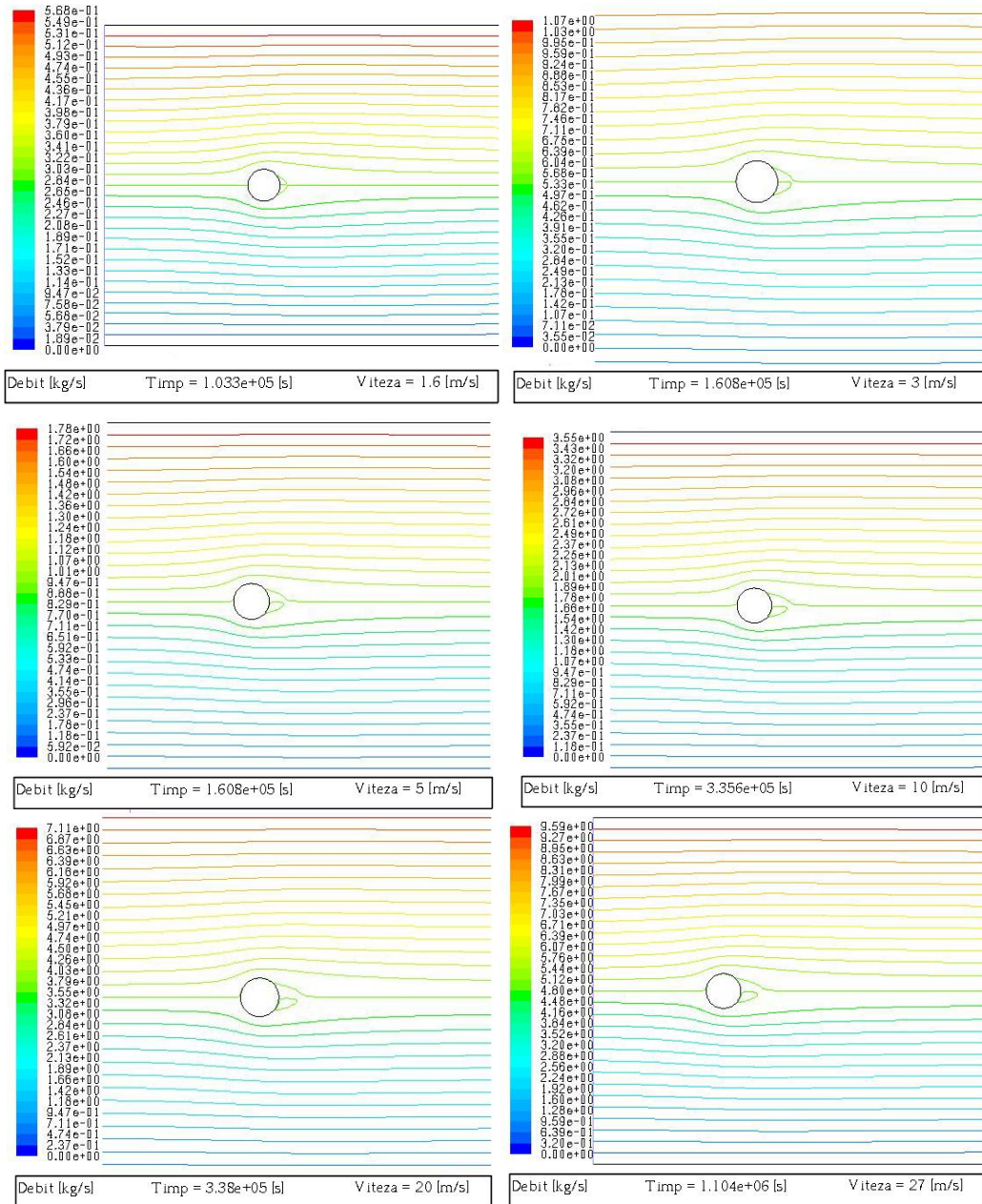


Figura 3.15. Evoluția zonei de recirculare în aval de cilindru, la diferite viteze de curgere (menționate în Tabelul 4.4)

În Figura 3.16 sunt marcate punctele caracteristice tipului de curgere care, odată cu modificarea poziției relative de pe suprafața cilindrului, influențează vibrația acestuia. Considerând curgerea de intrare laminară, în lungul axei orizontale

și cu viteză de până la 1.6m/s, distribuția presiunii de suprafață este determinată de punctele caracteristice 1; 2.1; 2.2; 3; 4.1; 4.2.

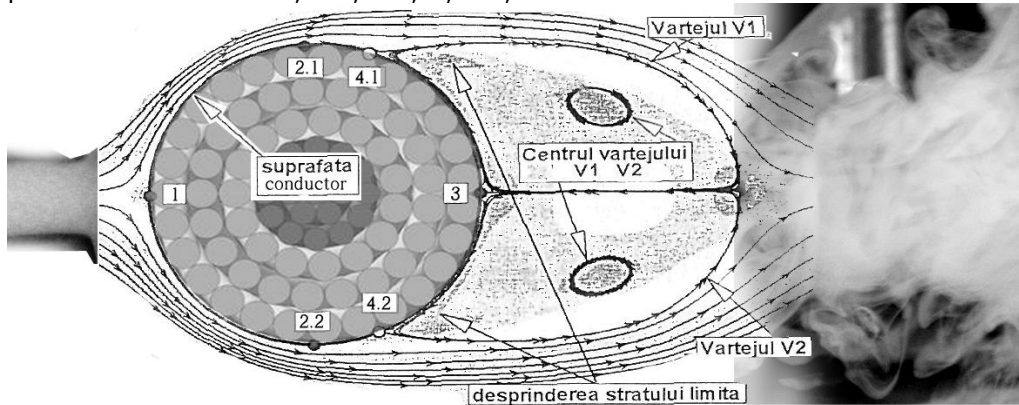


Figura 3.16. Descrierea stratului limită dat de liniile de curgere

Zona de recirculare compusă din două vârtejuri (vârtejul V1 și V2) care se rotesc în sensuri contrare, creează o presiune de sens contrar celei create de mișcarea aerului. Viteza aerului variază în funcție de poziția relativă la cilindru, cu tendința de scădere până la 0 în centrul vârtejurilor. Începând cu punctul de impact 1, unde presiunea este maximă, și continuând către punctele 2.1 și 2.2 valoarea presiunii scade, datorită frecărilor cu suprafața cilindrului. Traseul dintre punctele 2 și 3 este unul în care fluidul are o mișcare decelerată și începe să se desprindă de suprafața cilindrului, în punctele 4.1 și 4.2, ca urmare a creșterii de presiune în sens contrar.

În aerodinamică este cunoscut faptul că asupra unui punct aflat în curent de aer și care este supus acțiunii unei forțe ce acționează în direcția curgerii fluidului, denumită forță de rezistență la înaintare, respectiv unei forțe ce acționează perpendicular pe direcția de curgere a fluidului denumit forță de portanță. Pentru a înțelege cum variază presiunea de la suprafața conductoarelor, s-au făcut simulări folosind diferite viteze ale vântului.

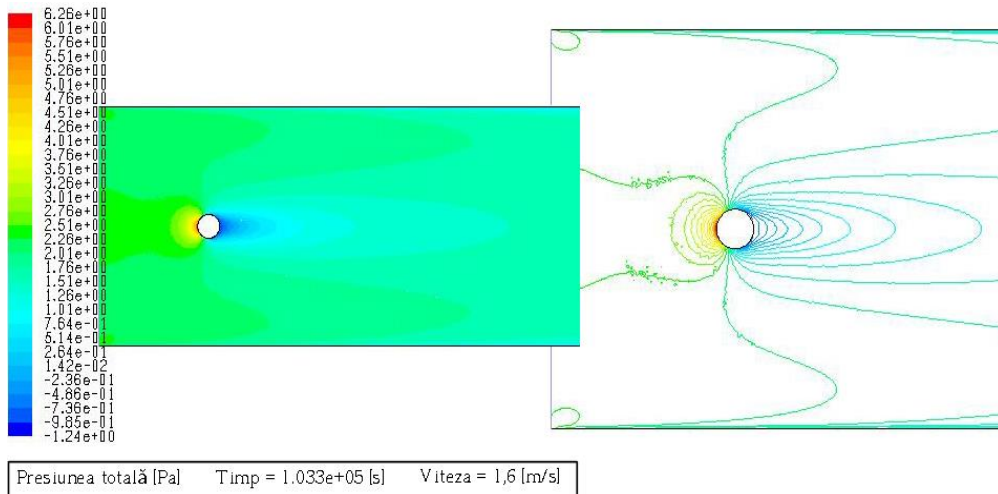


Figura 3.17. Variația presiunii totale și a liniilor de curgere pentru viteza de 1,6m/s

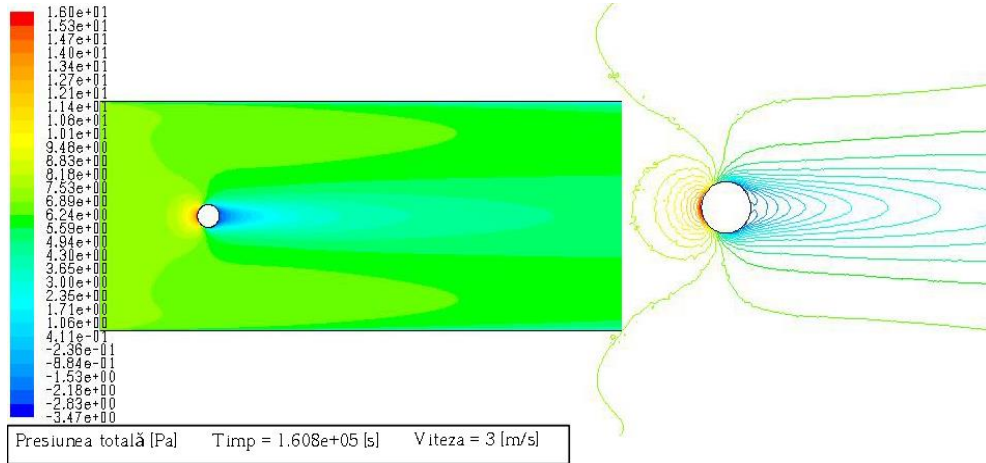


Figura 3.18. Variația presiunii totale și a liniilor de curgere pentru viteza de 3m/s

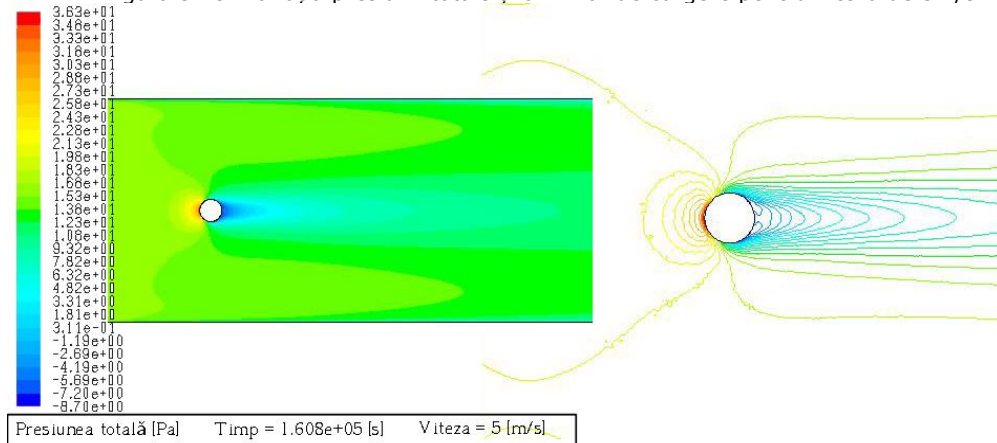


Figura 3.19. Variația presiunii totale și a liniilor de curgere pentru viteza de 5m/s

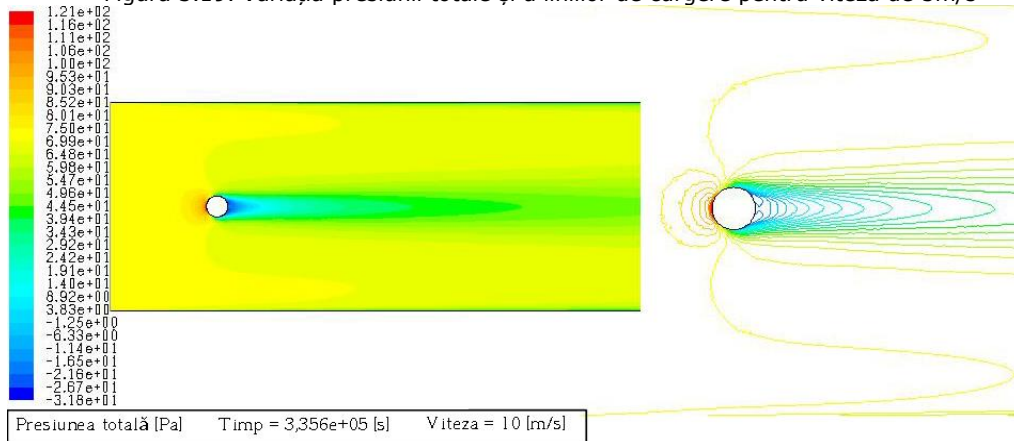


Figura 3.20 Variația presiunii totale și a liniilor de curgere pentru viteza de 10m/s

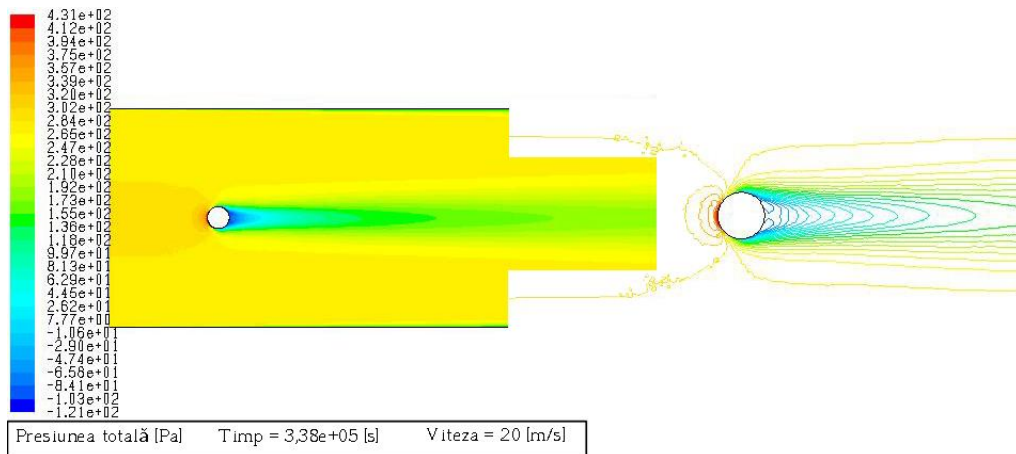


Figura 3.21. Variația presiunii totale și a liniilor de curgere pentru viteza de 20m/s

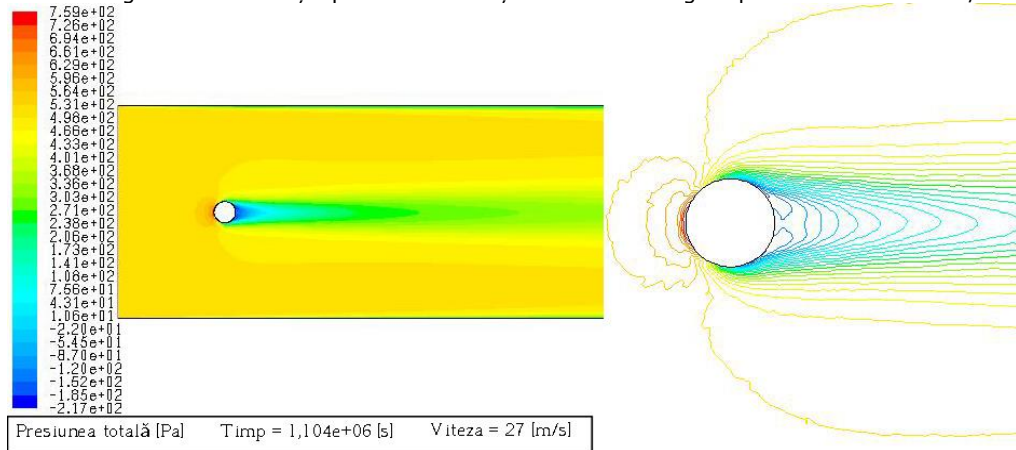


Figura 3.22. Variația presiunii totale și a liniilor de curgere pentru viteza de 27m/s

3.4.5. Prelucrarea și interpretarea rezultatelor

Prelucrarea și interpretarea datelor s-a făcut prin prezentarea calitativă și cantitativă a rezultatelor numerice obținute în baza simulării numerice. Reprezentarea calitativă a rezultatelor s-a realizat sub forma de hartă de culori pentru vitezele menționate anterior, în timp ce o analiză cantitativă a presupus realizarea de grafice, accesarea și calculul de mărimi caracteristice fenomenului fizic studiat.

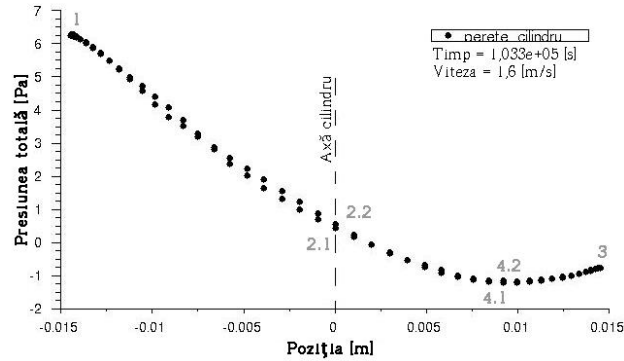


Figura 3.23. Diagrama de distribuție a presiunii pe suprafața cilindrului la viteza de 1,6m/s

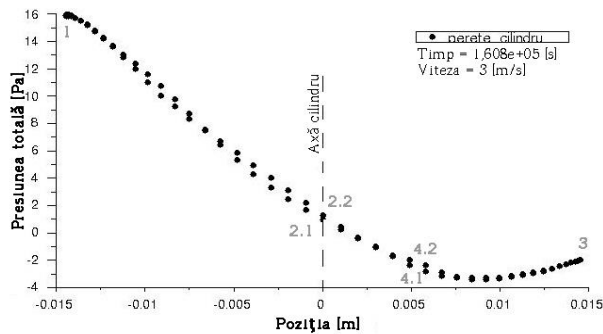


Figura 3.24. Diagrama de distribuție a presiunii pe suprafața cilindrului la viteza de 3m/s

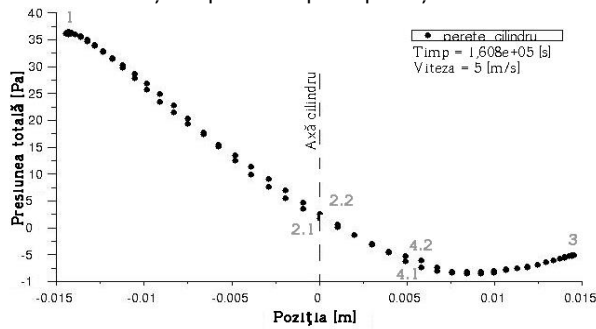


Figura 3.25. Diagrama de distribuție a presiunii pe suprafața cilindrului la viteza de 5m/s

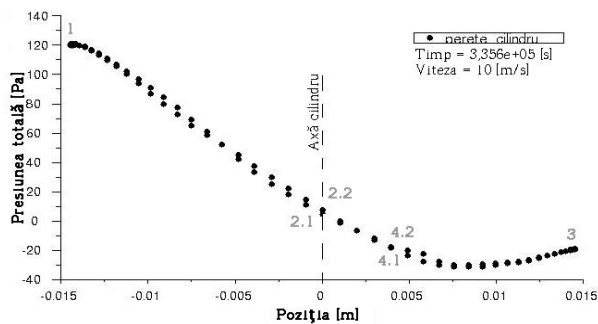


Figura 3.26. Diagrama de distribuție a presiunii pe suprafața cilindrului la viteza de 10m/s

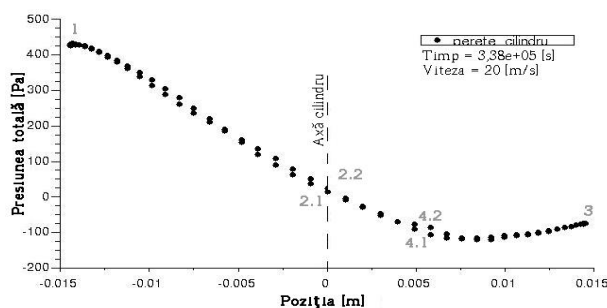


Figura 3.27. Diagrama de distribuție a presiunii pe suprafața cilindrului la viteza de 20m/s

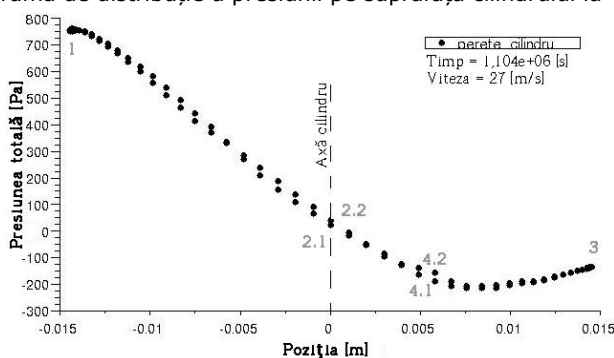


Figura 3.28. Diagrama de distribuție a presiunii pe suprafața cilindrului la viteza de 27m/s

Diagramele de mai sus arată distribuția și valorile presiunilor de pe suprafața cilindrului pentru viteze de curgere la valorile de 1,6; 3; 5; 10; 20; 27 m/s. Odată cu creșterea vitezei de curgere și modificarea numărului Reynolds, caracteristicile mișcării se dovedesc a fi foarte diferite. Distribuția presiunii în jurul cilindrului în cazul unei mișcări lente $Re \rightarrow 0$ este diferită de cazul curgerii la care frecarea este neglijabilă $Re \rightarrow \infty$. Se constată că fluidul înconjoară aproape complet suprafața cilindrului, dacă viteza este mică, sau că se inițializează instabilități în dâră de fluid odată cu creșterea vitezei, cu modificarea poziției punctelor de desprindere 4.1 și 4.2. Instabilitatea dărei de fluid în aval de cilindru primește un caracter mai pronunțat, iar în dâră se formează nuclee de vârtej care la început sunt simetrice și stabile. Odată cu creșterea vitezei, vârtejurile formate în dâră își pierd stabilitatea și simetria, dobândind un caracter alternant, care ajunge să formeze așa numita alee de vârtejuri de tip Karman. La viteze și mai mari, vârtejurile devin neregulate, formându-se, în aval de cilindru, o mișcare haotică.

În practică, creșterea vitezei de curgere induce conductorului o stare de instabilitate dinamică și duce la apariția vibrațiilor cu amplitudini și direcții diferite. Presiunea exercitată de fluid pe suprafața cilindrului induce acestuia o tendință de deplasare pe orizontală, în direcția de curgere. Existența presiunii negative indică faptul că în aval de cilindru se creează o presiune care acționează pe aceeași direcție cu cea dată de curgere, dar cu sens opus. Apariția, formarea și dezvoltarea diferită a turbionilor, aflați de o parte și de alta a axei de curgere, este influențată de valoarea diferită a presiunii de pe jumătatea superioară față de cea inferioară, a cilindrului. Astfel, odată cu variația presiunii pe cele două jumătăți ale cilindrului și cu formarea de presiune negativă, cilindru începe să oscileze pe verticală, mișcarea cilindrului transformându-se în una complexă. Ca urmare, pentru vibrații cu amplitu-

dini mari, frecvența curgerii turbionare poate rămâne constantă față de vibrația conductorului, iar vibrațiile eoliene pot continua să existe chiar dacă se modifică viteza de curgere.

Ținând cont de direcția și sensurile de aplicare, o clasificare a presiunilor ce acționează pe suprafața cilindrului poate fi făcută astfel:

- *presiunea principală* - acționează pe direcția și în sensul curgerii;
- *presiunea secundară* - acționează pe direcția curgerii, dar în sens opus.

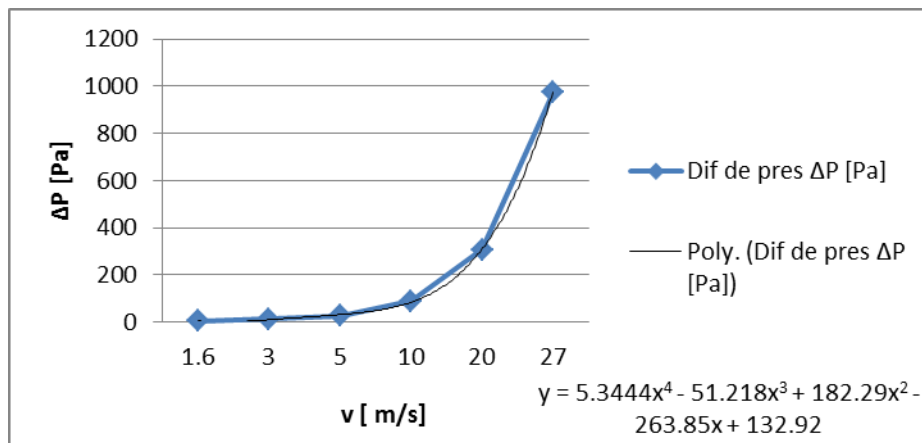


Figura 3.29. Diagrama de variație a diferenței de presiune

Diferența de presiune ΔP s-a determinat prin însumarea celor două presiuni (cea principală și cea secundară) și reprezintă valoarea presiunii care trebuie luată în considerare, pentru determinarea deplasării cilindrului pe direcția de curgere. Aceasta are valoare mai mică decât presiunea principală și are tendința de a induce cilindrului o mișcare rectilinie.

Tabel 3.8. Valorile maxime ale presiunilor

P principal [Pa]	P secundar [Pa]	Procent P [%]	ΔP [Pa]	v [m/s]
6,26	-1,24	20	5,02	1,6
15,95	-3,47	22	12,48	3
36	-8,7	24	27,3	5
120,75	-31,73	26	89,02	10
427,43	-120,9	28	306,53	20
758,78	217,12	29	975,9	27

Cu ajutorul rezultatelor obținute ca urmare a simulării curgerii aerului peste un cilindru s-au înregistrat valorile celor două presiuni și s-a determinat procentul de presiune pe care îl ocupă presiunea secundară din cea principală, așa cum se vede în Tabelul 3.8. Din calculul lui ΔP s-a constatat că valoarea presiunii secundare crește, în raport cu cea principală, odată cu creșterea vitezei de curgere. La valoare mică a vitezei, $v=1.6\text{m/s}$, presiunea secundară are o valoare de 20% din valoarea

presiunii principale și crește până la 29% pentru $v=27\text{m/s}$. Creșterea valorii presiunii secundare induce cilindrilor o creștere a amplitudinii oscilațiilor verticale.

Din diagrama de variație a diferenței de presiune s-a dezvoltat o ecuație polinomială de ordin 4, cu care se poate calcula diferența de presiune în funcție de viteza de deplasare a fluidului.

$$\Delta P = 5.344 \cdot v^4 - 51.21 \cdot v^3 + 182.2 \cdot v^2 - 263.8 \cdot v + 132.9 \quad (3.10)$$

Vântul induce conductorului o stare de vibrații a căror parametri se modifică odată cu viteza de curgere. Vibrațiile eoliene și oscilațiile secundare generează cicluri de oboseală care pot dura perioade mari de timp și care favorizează dezvoltarea și propagarea fisurilor de oboseală. Variațiile de viteză duc la intercalarea celor trei tipuri de vibrații și induc tensiuni mecanice între elementele conductorului sau între conductor și elementele cu care acesta este în contact.

3.5. Evaluarea stărilor de deformații pe baza săgeților reale ale conductorului

3.5.1. Determinarea săgeții conductorului 450/75

Întinderea conductoarelor trebuie să asigure contact electric sigur, o rezistență mecanică de 95% din rezistența mecanică a conductorului și o distribuție uniformă a tensiunilor în sârmele ce compun straturile conductorului [Rucăreanu, 1989]. După stabilirea pozițiilor conductorului în deschiderile dintre stâlpi, la calculul mecanic al conductoarelor, este necesar să se determine săgețile (deplasarea pe direcție normală la axa conductorului a centrului de greutate al secțiunii din mijlocul deschiderii) în fiecare deschidere și valoarea săgeții maxime. În felul acesta, se crează posibilitatea verificării distanțelor minim admisibile ale conductoarelor față de celelalte conductoare ale LEA, precum și față de elementele stâlpilor legate la pământ sau față de diferite obstacole pe care le traversează ori de care se apropie traseul LEA.

Pentru conductoarele LEA se fac calcule cu ajutorul cărora se determină curbele pe care trebuie să le descrie conductoarele, așa numitele săgeți de montaj. Săgeata de montaj se determină soluționând ecuația de stare a conductorului (relația 3.11) [Rucăreanu, 1989], ținând cond de temperatura de montaj pentru două stări: *a* - stare cunoscută și *b* - parțial cunoscută.

Mărimile de stare caracteristice pentru starea *a* sunt:

g - greutatea specifică [N/m³]

t - temperatura [°]

σ - efortul unitar [N/mm²]

Mărimea de stare caracteristică ce nu se cunoaște în starea *b* este efortul unitar.

$$\alpha(t_a - t_b) + \frac{1}{E}(\sigma_{0a} - \sigma_{0b}) = \frac{l_e^2}{24} \left[\left(\frac{g_a}{g_{0a}} \right)^2 + \left(\frac{g_b}{g_{0b}} \right)^2 \right] \quad (3.11)$$

În care:

α - coeficient de dilatare liniară	
f - săgeata	[m]
l - deschiderea	[m]
l_e -lungimea deschiderii echivalente	[m]

Dacă se notează cu x necunoscuta σ_{ob} se poate scrie o ecuație simplificată:

$$f(x) = x^3 + (u + v \cdot t) \cdot x^2 - w = 0 \quad (3.12)$$

Pentru LEA 22kV temperatura t este un parametru în dependență cu coeficienții numerici specifici: $u=484,52$, $v=1,4975$, $w=2,0565 \times 10^5$.

În ceea ce privește săgeata, în literatura de specialitate, relația de calcul este de forma:

$$f = \frac{g_b \cdot l^2}{8 \cdot \sigma_{ob}} \quad (3.13)$$

Așadar, alături de celelalte proprietăți mecanice, calculul și montarea cu săgeata preliminară joacă un rol foarte important în viața și comportarea conductoarelor. În tabelul de mai jos sunt date valorile tensiunii unitare, calculate în baza relației de mai sus (3.13), și ale săgeții pentru o deschidere $l=258m$, în dependență cu variația temperaturii de montaj.

Tabel 3.9. Săgeata și tensiunea de montaj a conductoarelor

t	-30	-20	-10	0	10	20	30	40
σ	21,127	20,799	20,486	20,186	19,898	19,623	19,38	19,103
f	13,54	13,75	13,96	14,17	14,38	14,58	14,76	14,98

În teorie se constată o modificare a săgeții de aproximativ 0,2m și o modificare a efortului unitar cu aproximativ $0,3N/mm^2$ pentru fiecare decadă a temperaturii.

La calculul săgeților se ia în considerare temperatura la momentul montajului. În realitate aceste săgeți nu rămân constante pe durata exploatării. Modificarile săgeților au loc odată cu temperatura din mediul ambiant.

Pentru a înțelege cum variază săgeata conductorului într-o deschidere la variații de temperatură, am efectuat măsurători ale conductoarele active aflate pe traseul rețelei LEA, tronsonul Timisoara-Arad. Aceste măsurători au fost efectuate cu ajutorul unui tahimetru electronic, de tip stație totală prevăzută cu sistem de măsurare cu unde electromagnetice, Figura 3.30.

La realizarea măsurătorilor am folosit stația totală LEICA TCRM 1103+, ce are o precizie de măsurare a unghiurilor de 3cc și a distanțelor de 1ppm. Prelucrarea datelor s-a realizat cu softul Leica Geo Office și, ulterior, punctele calculate au fost raportate în AutoCad cu ajutorul căruia s-a realizat proiecția conductoarelor în plan vertical.



Figura 3.30. Tahimetru electronic Leica 1103+

În prima fază s-au determinat puncte de staționare cu coordonate cunoscute și mai apoi s-au făcut determinări de poziție ale unor puncte de pe conductoarele LEA. Punctele astfel măsurate furnizează informații despre poziția în spațiu a conductoarelor, iar cu ajutorul acestora am determinat săgeata reală și unghiul făcut de conductor după clemă de fixare.

Măsurătorile au avut loc pe aceleași deschideri, la temperaturi și condiții atmosferice diferite, pentru a evidenția modificările poziției conductoarelor față de elementele fixe ale rețelei. Valorile caracteristice ale mediului ambiant în cazul celor două seturi de măsuratori sunt prezentate mai jos.

Condiții meteo CM I:

Temperatura:	-10 °C
Starea vremii:	Cer noros cu depunere de chiciură
Presiune atmosferică:	771mmHg
Umiditate:	94%
Indice ultraviolete:	1
Vânt:	2km/h dinspre est

Condiții meteo CM II:

Temperatura:	20 °C
Starea vremii:	Cer parțial noros, fără precipitații
Presiune atmosferică:	764mmHg
Umiditate:	54%
Indice ultraviolete:	1
Vânt:	1km/h dinspre nord

În Figura 3.31 sunt prezentate curbele pe care le descrie conductorul, în plan vertical, atunci când condițiile meteo corespund celor două cazuri CM I și CM II. Săgeata reală variază foarte mult în cele două cazuri, diferența între fiI și fiII fiind de 0,75m pentru o deschidere l de 258m. Totodată, modificarea acestei curbe influențează poziția relativă conductor-clemă de susținere, prin modificarea principalilor parametri, arătați în Figura 3.32, ce se iau în considerare pentru calculul duratei de viață a conductorului.

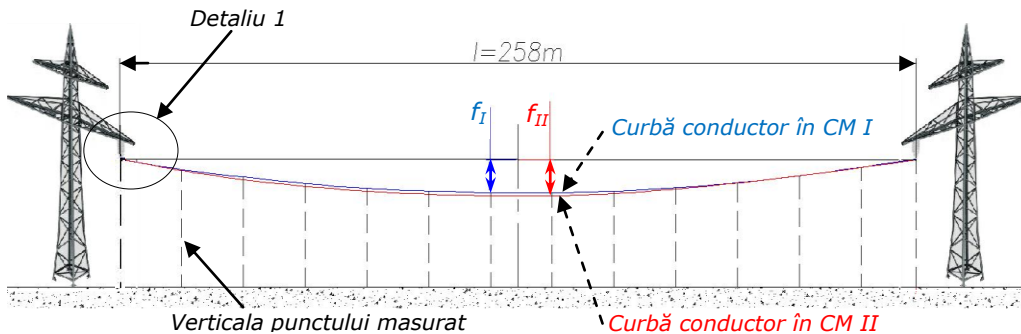


Figura 3.31. Aspectul curbelor conductorului în cazul CM I și CM II

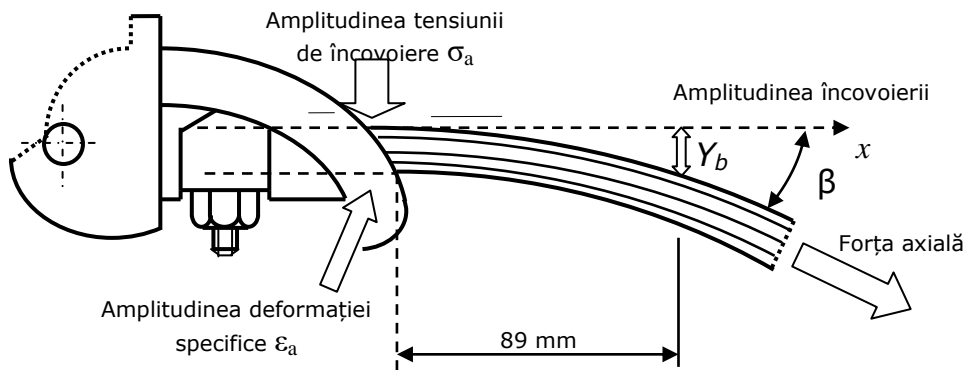


Figura 3.32. Detaliu 1 - fixarea conductorului în clema de susținere

Săgeata de pozare ține cont de temperatura de la momentul montării, însă valorile sașetilor reale variază foarte mult odată cu modificarea temperaturii. Diferența între valorile sașetilor măsurate și cele de pozare, pentru cazul celor două temperaturi este de 140mm, adică o creștere a sașetii reale cu 23% mai mult decât în cazul celei de pozare.

Tabel 3.10. Determinarea sașetii reale a conductorului

Tip CM	f_i [m]	β [°]	Y_b [mm]	Y_t [mm]	x [mm]
CM I	9	7,5	12	26,63	89
CM II	9,75	9	14,5	29,13	89

Un calcul complet la oboseală al conductorului trebuie să conțină o variație a unghiului de înclinare corectat, a conductorului față de clema de susținere, ca urmare a modificării valorii sașetii în corelare cu valorile reale, obținute prin măsurători. Valoarea reală a sașetii variază foarte mult față de cea a sașetii de pozare, mai ales după îmbătrânirea conductorului și modificarea proprietăților materialului.

3.5.2. Aplicarea ecuației Poffenberger–Swart pentru calculul tensiunilor din conductor

Pentru determinarea duratei de viață a unui ansamblu clemă–conductor se stabilește limita de oboseală în funcție de tensiunea de încovoiere care apare în conductor, întrucât aceasta poate fi calculată în funcție de amplitudinile deplasărilor pe verticală. Deplasările pe verticală pot fi măsurate la 89mm față de ultimul punct de contact dintre clemă și conductor [Suzanne, 2011].

În cele mai multe cazuri, reprezentările curbilor de oboseală sau curbele Wöhler se fac în coordonatele $Y_b - N$ sau $\sigma_a - N$. Trecerea de la Y_b la σ_a se face cu ajutorul ecuației *Poffenberger–Swart* (3.13). În cadrul acesteia, tensiunea de încovoiere din conductor poate fi calculată în funcție de amplitudinile deplasărilor pe verticală.

$$\sigma_a = \frac{D \cdot E_a \cdot p^2 \cdot Y_b}{4(e^{-p \cdot x} - 1 + p \cdot x)} \quad (3.14)$$

$$p = \sqrt{H/EI} \quad (3.15)$$

Parametrii folosiți:

σ_a – amplitudinea tensiunii, la încovoierea sârmei de aluminiu de pe stratul exterior;

ε_a – deformația la încovoiere a sârmei de aluminiu de pe stratul exterior

f_i – săgeata conductorului

EI – rigiditatea la încovoiere a conductorului;

D – diametrul toronului sau diametrul conductorului;

$E_a = E_{Al}$ – modulul de elasticitate longitudinal al aluminiului;

H – forța axială aplicată conductorului (încărcarea inițială);

Y_b – deplasarea pe verticală;

β – unghiul de înclinare al conductorului față de clema de susținere;

p – panta axei conductorului în raport cu direcția forței H

x –distanța de la secțiunea unde se măsoară Y_b față de secțiunea din încastrarea conductorului.

y_t – distanța dintre axa conductorului și axa Ox ;

FRN – forța de rupere nominală

Calculul și valorile parametrilor ecuației *Poffenberger–Swart*, pentru tipul de conductor 450/75 (studiat):

$$D = 29,25[mm]$$

$$E_a = 0,62 \cdot 10^5 [N/mm^2]$$

$$FRN = 164090[N]$$

$$H = 0,2 \cdot FRN = 32818[N]$$

$$EI_{\min} = 0,62 \cdot 10^5 \cdot 63 \frac{\pi \cdot 2,95^4}{64} + 2,1 \cdot 10^5 \cdot 19 \frac{\pi \cdot 2,25^4}{64} = 195,4 \cdot 10^5 [N \cdot mm^2]$$

$$p = 40,98 \cdot 10^{-3} [1/mm]$$

$$y_b = 0,4[mm]$$

$$e^{-px} = e^{40,98 \cdot 10^{-3} \cdot 89} = 2,6 \cdot 10^{-2}$$

$$\sigma_a = \frac{29,25 \cdot 0,62 \cdot 10^5 \cdot (40,98 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 0,4}{4(2,6 \cdot 10^{-2} - 1 + 40,98 \cdot 10^{-3} \cdot 89)} = 113,93[N/mm^2]$$

$$\varepsilon_a = \frac{\sigma_a}{E_a} = 1,63 \cdot 10^{-3}$$

Parametrii Y_b , ε_a , σ_a și β se utilizează ca parametri de evaluare a durabilității atunci când se analizează fenomenul de oboseală, în raport cu secțiunea de încăstrare a conductorului în clema de susținere. Determinarea săgeții reale ajută la aplicarea corectă a calculelor și la determinarea tensiunilor și mișcărilor relative din apropierea clemelor de fixare. Chiar dacă acestea sunt stabilite teoretic, în practică săgețile au variații mari, date de schimbarea parametrilor mediului înconjurător și durata de exploatare.

Rolul foarte important al săgeții în calculul și determinarea duratei de viață a conductoarelor este demonstrat de relația Poffenberger–Swart. Parametrii Y_b și β sunt dependenți de valoarea reală a săgeții și de modificările continue ale acesteia. Astfel, chiar și pentru valori similare ale vitezei vântului se pot înregistra amplitudini diferite ale oscilațiilor verticale, ca urmare a modificării săgeții conductorului.

3.6. Observații și concluzii

Spectrul de radiație X, caracteristic pentru sârmele analizate, arată că stratul protector, de oxid se îngroașă în timp și că sârmele îmbătrânite prezintă în stratul superficial o serie de elemente noi, diferite de materialul de bază.

Poluarea atmosferică influențează gradul de deteriorare a sârmelor, precum și natura chimică a depozitelor și produsele de coroziune existente pe suprafața sârmelor.

Repartiția geografică a concentrațiilor de poluanți atmosferici, compoziția și aciditatea precipitațiilor, precum și condițiile meteorologice face ca efectele create asupra conductoarelor să varieze de la o poziție geografică la alta.

Temperatura la care se obține picul, corespunzător regiunii de curgere vâscoelastică și topirii materialului, diferă în funcție de impuritățile din material.

Coroziunea aluminiului implică distrugerea stratului de oxid de aluminiu urmată de atacul direct al metalului prin manifestări diferite, date de condițiile de utilizare ale conductoarelor.

Umiditatea ridicată, sulfurile, clorurile și mediile acide sunt componente prezente în cazul conductoarelor, care grăbesc fenomenul de coroziune.

Chiar dacă coroziunea nu reprezintă un factor de degradare cu dezvoltare rapidă, mentenanța LEA impune inspectarea conductoarelor în vederea identificării unor eventuale deteriorări cauzate de aceasta.

Efectul dinamic provocat de desprinderea vârtejurilor vântului produce o acțiune fluctuantă perpendiculară pe direcția vântului.

Formarea în dâra corpului solid a unor structuri de vârtej cauzează fluctuații ale presiunilor, defecte în zonele de prindere sau chiar ruperea conductoarelor.

Vântul antrenează conductoarele în oscilații mecanice cu amplitudini și frecvențe dependente de viteza de curgere și influențează distribuția presiunilor pe suprafața conductorului.

Creșterea vitezei vântului influențează formarea vârtejurilor din dără, care își pierd stabilitatea și simetria, dobândind un caracter alternant.

În lungul conductorului, efectele vântului se modifică odată cu creșterea distanței față de punctele de fixare.

Se pot identifica două presiuni care acționează pe suprafața conductorului: cea principală și cea secundară.

La valoarea mică a vitezei, $v=1.6\text{m/s}$, presiunea secundară are o valoare de 20% din valoarea presiunii principale și crește până la 29% pentru $v=27\text{m/s}$.

Diferența de presiune funcție de viteza de deplasare a fluidului se poate calcula cu ecuația dezvoltată cu ajutorul simulărilor.

Variațiile de viteză duc la intercalarea celor trei tipuri de vibrații care contribuie la dezvoltarea fenomenului de oboseală a conductoarelor.

În practică săgețile conductoarelor au variații mari pe perioada unui an, ca urmare a modificării parametrilor de funcționare, a condițiilor de exploatare și a duratei de exploatare. Determinarea săgeții reale ajută la aplicarea corectă a calculului și la determinarea tensiunilor și mișcărilor relative din apropierea clemelor de fixare.

Parametrii Y_b și β ai ecuației Poffenberge–Swart sunt dependenți de valoarea reală a săgeții și de modificările continue ale acesteia.

Măsurătorile săgeților reale ale conductoarelor indică diferențe mari față de cele de pozare, săgeata reală fiind cu până la 25% mai mare decât în cazul celei de pozare.

Mediul înconjurător influențează coroziunea conductoarelor și proprietățile conductoarelor, iar existența unor indici ar putea prezice durata de viață preconizată a conductoarelor în diferite părți ale traseului LEA.

Oscilațiile periodice orizontale și verticale provocate de vânt formează pe lungimea deschiderii o serie de unde staționare cu amplitudine variabilă.

4. ANALIZA STĂRILOR DE TENSINI ȘI DEFORMAȚII LA CONTACTUL DINTRE SÂRMELE CONDUCTORULUI

4.1. Considerații generale privind contactul sârmelor în clemele de fixare ale conductorului

Complexitatea mecanismului ce caracterizează contactul dintre elemente face ca analiza tensiunilor să fie aproximată și, tot din acest motiv, este foarte dificil să se determine din măsurători care este starea de tensiune a unui conductor. Conductoarele sunt supuse la inconvoiere maximă în apropierea elementelor de susținere, precum și la forțe de compresiune maxime exercitate de dispozitivele de prindere. Tensiunile de contact într-o regiune de prindere pot fi împărțite în două categorii: statice și ciclice.

Sarcinile statice sunt date de:

- tensiunea axială constantă (dată de greutatea etalon)
- încovoiere (schimbarea de curbură a conductorului peste clemă)
- presiunea de prindere locală (din clemele de prindere) și presiunea din armături [Azevedo, 2009].

Rolul transportului curentului electric este luat de sârmele de aluminiu, iar inima de oțel reprezintă partea principală de susținere datorită rigidității sale axiale superioare. Din punctul de vedere al materialului, acesta are o deformabilitate și ductilitate mai mare decât titanul sau aliajele pe bază de nichel folosite în aerodinamică, ceea ce face ca fisurile să se inițieze și să se propage cu mai multă ușurință în sârmele de aluminiu. Totodată, aluminiul și aliajele de aluminiu prezintă o aderență foarte bună la contact fie că este vorba despre material de același fel sau diferite. Această stare de aderență poate promova o uzură de suprafață ridicată prin frecări datorate condițiilor de funcționare. Chiar dacă suprafața de frecare este redusă, scăderea locală rezistenței la oboseală poate fi substanțială. Mai mult de atât, configurația geometrică a straturilor conductorului fac contactul mult mai complex decât un contact între două sau trei corpuri ale unor ansamble.

Comportamentul conductorului în cazul încărcării multiaxiale crează, dincolo de tensiunea de contact complexă, și gradienti (mărime care prezintă modul de variație în funcție de un anumit parametru, de obicei distanța), a unei mărimi fizice a tensiunilor la limita suprafeței de contact, unde se pot crea nuclee de fisuri și propagări ale acestora. Trebuie, de asemenea, luat în considerare faptul că tensiunile locale de contact, sub acțiunea frecărilor, se distribuie diferit în funcție de geometria contactului, de presiunile și materialele de contact, tribologia suprafeței de contact (știința și tehnologia interacțiunii dintre două suprafețe în contact, aflate în mișcare relativă). Suprafețele de contact, în cazul sârmelor din componența conductoarelor, sunt sub formă de cuple neconforme sau hertziane și se modifică odată cu variația tipului de contact și comportarea materialelor aflate în contact.

Multe dintre punctele în care se dezvoltă tensiuni datorate contactului se regăsesc în zona clemelor de prindere, între straturi diferite sau între ultimul strat și corpul clemelor de prindere, așa cum se poate vedea în Figura 4.1, unde sunt

marcate cu săgeți zonele în care tensiunea are valori maxime și direcțiile de aplicare ale presiunilor de contact.

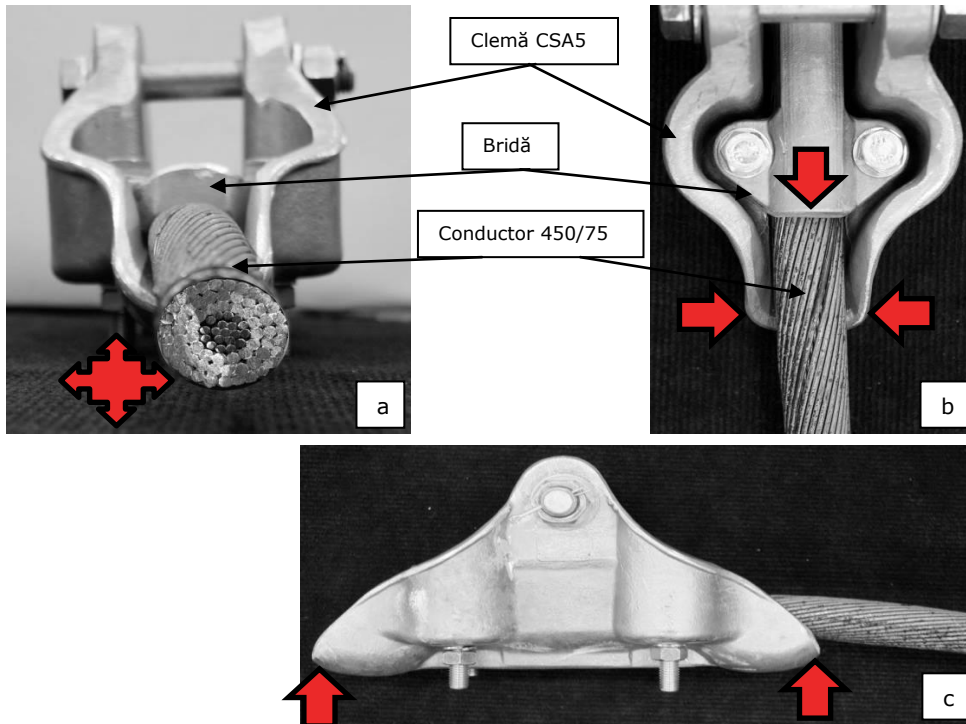


Figura 4.1. Fixarea conductorului în clemă; a) secțiune conductor - direcții și sensuri de mișcare; b) vedere de sus - zone de contact conductor-clemă; c) vedere laterală - zone de contact conductor-clemă

4.2. Elemente de mecanica și fizica contactului

Contactul este un fenomen complex și nelinear, deoarece depinde de proprietățile elastice ale corpurilor care vin în contact, de geometria lor, de condițiile de rezemare etc., dar și de evoluția încărcărilor, adică starea finală a unei suprafețe de contact depinde de felul în care sunt aplicate sarcinile. În timpul aplicării sarcinilor se modifică (uneori fundamental), formele și dimensiunile supra-fețelor de contact, precum și distribuțiile tensiunilor pe aceste suprafețe.

La limită, începe alunecarea, între componenta normală a forței, P , și cea tangențială (pe direcția de alunecare), F , există relația:

$$F = \mu \cdot P \quad (4.1)$$

unde μ este coeficientul de frecare. Această lege a fost propusă cu aproximativ patru sute de ani în urmă de către Amontov, iar frecarea de acest tip se numește frecare columbiană. Atât timp cât corpul nu se mișcă, forța de frecare nu este dată de relația de mai sus, ea fiind nedefinită.

Clasificarea tipurilor de contact se face [www.resist.pub.ro]:

- A. contact fără frecare și contact cu frecare** vizează *frecarea dintre corpuri*.
- B. contactul conform și contactul neconform** vizează *modificările suprafeței de contact*.
- C. contactul este elastic** vizează *comportarea materialului*, atunci când comportarea materialului este linear elastică și **elasto-plastic**, dacă solicitarea materialului depășește limita de elasticitate.
- D. deplasărilor mici sau deplasărilor mari**, aspectul *deplasării elementelor în contact*.

Teoria clasică a contactului este teoria lui Hertz se bazează pe ipotezele:

- a - suprafețele care intră în contact sunt continue;
- b - corpurile care mărginesc aceste suprafețe sunt omogene, izotrope și respectă de legea lui Hooke;
- c - dimensiunile zonelor de contact - contactul inițial este punctiform sau linear;
- d - distribuția tensiunilor în zona contactului se obține din teoria semispațiului elastic a lui Boussinesq.

- E. contactului de tip rigid-flexibil și flexibil-flexibil** în funcție de *rigiditățile suprafețelor de contact*.

4.3. Teoria lui Hertz cu privire la contactul corpurilor

Hertz a studiat problema contactului a doua corpuri de revoluție (sfere, elipsoizi sau cilindri). Mai precis, condițiile pe frontieră nu se referă la deplasările sau tensiunile din zona de contact, ci la forța totală transmisă între cele două corpuri. Ambele corpuri sunt considerate deformabile și pot fi din materiale diferite, adică pot avea module de elasticitate diferite.

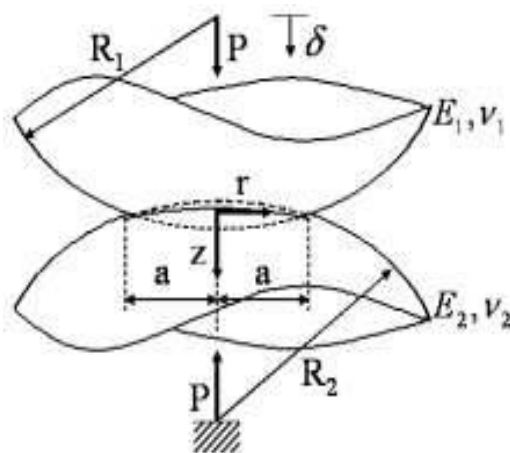


Figura 4.2. Contactul dintre două sfere [Johnson, 2010]

Se consideră geometria din figura de sus, în care două sfere cu raze R_1 și R_2 sunt în contact și sunt încărcate cu forța P . Corpurile sunt din materiale linear elastice, omogene și izotrope, și au constantele elastice E_1, ν_1 , respectiv E_2, ν_2 . Soluția acestei probleme se exprimă în funcție de o rază echivalentă, R , și de un modul de elasticitate echivalent, E^* , astfel:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}, \quad \frac{1}{E^*} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \quad (4.2)$$

Se demonstrează că suprafața de contact, în acest caz, este circulară (datorită simetriei axiale a problemei) cu raza:

$$a = \left(\frac{3PR}{4E^*} \right)^{1/3} \quad (4.3)$$

Distribuția tensiunilor pe suprafața de contact este parabolică, de forma:

$$p(r) = p_0 \sqrt{1 - (r/a)^2}, \quad r < a \quad (4.4)$$

p_0 depinde de forța totală, P , aplicată celor două corpuri și rezultă din condiția de normalizare a distribuției $p(r)$ și anume:

$$P = \int_0^a p(r) 2\pi r dr \Rightarrow p_0 = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{\pi a^2} \quad (4.5)$$

SE observă că p_0 este presiunea medie pe suprafața de contact multiplicată cu factorul 3/2. Deplasarea relativă (apropierea) a centrelor celor două sfere, δ , este:

$$\delta = \left(\frac{9P^2}{16RE^{*2}} \right)^{1/3} \quad (4.6)$$

Examinarea distribuției tensiunilor din interiorul unuia dintre corpuri duce la concluzii privind posibilitatea inițierii fisurilor sau a curgerii plastice. Distribuția este prezentată schematic în figura 4.3. Sub suprafața de contact, tensiunile normale σ_{zz} au variație parabolică, similar cu $p(r)$. Tensiunea normală $\sigma_{\theta\theta}$ -unde θ este coordonata unghiulară măsurată în jurul lui z , are o variație similară, este nenulă la marginea suprafeței de contact, dar scade spre zero foarte repede, în afara contactului.

Axa z este axă de simetrie, tensiunile de forfecare sunt nule, deci axele z și r sunt și direcții principale ale stării de tensiuni. Ambele tensiuni normale, σ_{zz} și σ_{rr} scad continuu cu distanța de la zona de contact.

$$\tau_{\max} = (\sigma_{zz} - \sigma_{rr}) / 2 \quad (4.7)$$

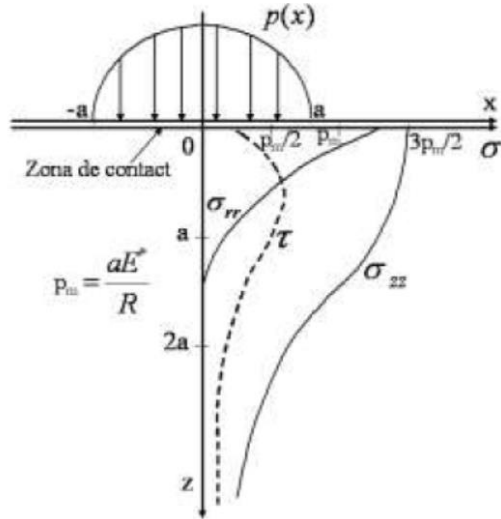


Figura 4.3. Distribuția tensiunilor din interiorul unui corp în zona de contact [Dumitru]

Totuși, tensiunea tangențială maximă (care este diferența tensiunilor principale), atinge un maxim, cu valoarea $0.31p_0$, la adâncimea $z=0.48a$ (pentru $\nu=0.3$) [Johnson, 2010]. Această valoare a lui τ_{\max} este cea mai mare din întregul câmp de tensiuni, mai mare chiar decât cea de la marginea suprafeței de contact ($z=0, r=a$). În fapt, tensiunile de sub suprafața de contact din figură sunt aproape identice cu cele obținute în cazul unei presiuni de contact constante.

4.4. Contactul cilindru-cilindru

Pentru a înțelege ce se întâmplă la contactul dintre sârmele din componența conductoarelor se consideră doi cilindri cu raze diferite, din materiale linear elastice diferite, care sunt în contact de-a lungul unei generatoare. Geometria este similară cu cea din figura contactului a doua sfere, cu excepția că forța este distribuită de-a lungul cilindrilor.

- lățimea de contact a suprafeței

$$a = \left(\frac{4PR}{\pi LE^*} \right)^{1/2} \quad (4.8)$$

- tensiunile de pe suprafața parabolică de contact

$$p(x) = p_0 \sqrt{1 - (x/a)^2}, x \in (-a, a) \quad (4.9)$$

- constanta de normalizare

$$P/L = \int_{-a}^a p(x) dx \Rightarrow p_0 = 2 \frac{P}{\pi a L} \quad (4.10)$$

Sub acțiunea forțelor exterioare, corpurile având diferite configurații geometrice se deformează astfel că, în jurul unui punct de contact inițial sau linie de contact, se formează o zonă de contact a cărei arie depinde de geometria inițială și de încărcările aplicate.

În cazul corpurilor cilindrice, aria de contact poate fi circulară sau eliptică. Mărimea suprafețelor de contact depinde de:

- profilele geometrice ale celor două corpuri;
- condițiile de încărcare;
- natura materialelor din care sunt executate cele două corpuri.

Se consideră două profile geometrice ale căror suprafețe de contact pot fi approximate prin două funcții polinomiale $\delta_1(x_1, y_1)$ sub forma [Ouaki, 1998]:

$$\begin{aligned} \delta_1(x_1, y_1) &= A_1x_1^2 + B_1y_1^2 + C_1x_1y_1 + \dots \\ \delta_2(x_2, y_2) &= A_2x_2^2 + B_2y_2^2 + C_2x_2y_2 + \dots \end{aligned} \quad (4.11)$$

în care coeficienții A_i, B_i depin de curburile celor două corpuri și de orientarea uneia față de cealaltă.

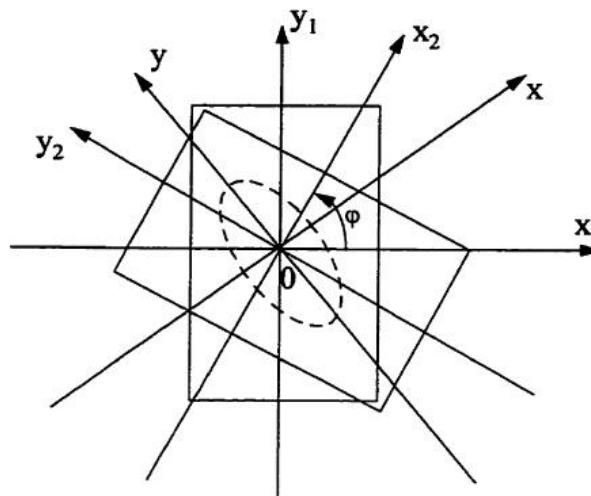


Figura 4.4. Dispunerea axelor de orientare a două sârme în contact [Dumitru]

În condițiile unui sistem de axe comun (x, y) pentru cele două corpuri, apropierea lor devine:

$$\delta(x, y) = \delta_1(x_1, y_1) - \delta_2(x_2, y_2) \quad (4.12)$$

Două suprafețe în contact se caracterizează prin $C_1=0$ și $C_2=0$; apropierea $\delta(x, y)$ care caracterizează elipsa de contact prin cele două semiaxe $\frac{1}{\sqrt{A}}$ și $\frac{1}{\sqrt{B}}$

poate fi scrisă sub forma:

$$\delta(x, y) = Ax^2 - By^2 \quad (4.13)$$

unde coeficienții A și B se obțin din ecuațiile:

$$|B - A| = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R'_1} \right)^2 + \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R'_2} \right)^2 + 2 \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R'_1} \right) \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R'_2} \right) \cos(2\varphi) \right]^{1/2} \quad (4.14)$$

$$A + B = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R'_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R'_2} \right) \quad (4.15)$$

iar R_1 și R'_1 reprezintă razele de curbură ale primului corp în planele $x_1=0$ și $y_1=0$. La fel, R_2 și R'_2 sunt razele de curbură ale celor două corpuri în planele $x_2=0$ și $y_2=0$, iar φ este unghiul de amprentare a axelor celor două corpuri.

Pe baza celor de mai sus se poate defini excentricitatea e_c , a elipsei de contact:

$$e_c = \frac{b}{a} = \left(\frac{A}{B} \right)^{1/2} \quad (4.16)$$

unde a și b reprezintă axa mare, respectiv axa mică a elipsei de contact.

În cazul sârmelor conductoarelor electrice având aceeași rază:

$$\begin{aligned} R_1 &= R_2 = \infty \\ R'_1 &= R'_2 = r \end{aligned} \quad (4.17)$$

expresiile lui A și B date de ecuațiile de mai sus devin:

$$A = \frac{1}{2r} (1 - \cos \varphi) \quad (4.18)$$

$$B = \frac{1}{2r} (1 + \cos \varphi) \quad (4.19)$$

Excentricitatea elipsei depinde numai de înclinarea dintre cele două axe ale sârmelor în contact

$$e_c = \frac{b}{a} = \left(\frac{1 - \cos \varphi}{1 + \cos \varphi} \right)^{1/2} \quad (4.20)$$

Se vede că atunci când $\varphi = \frac{\pi}{2}$, (90°), $b=a$ și, deci, zona de contact se reduce la un cerc. Când $\varphi = \pi$, (180°) elipsa devine un dreptunghi de lățime $2b$ și lungime $e_c = \infty$.

Sârmele de aluminiu folosite în cazul conductoarelor electrice sunt considerate ca niște cilindri înfășurați elicoidal, a căror rază depinde de poziția lor în cadrul stratului de care aparțin. Figura de mai jos prezintă aspectul a două sârme aflate în contact.

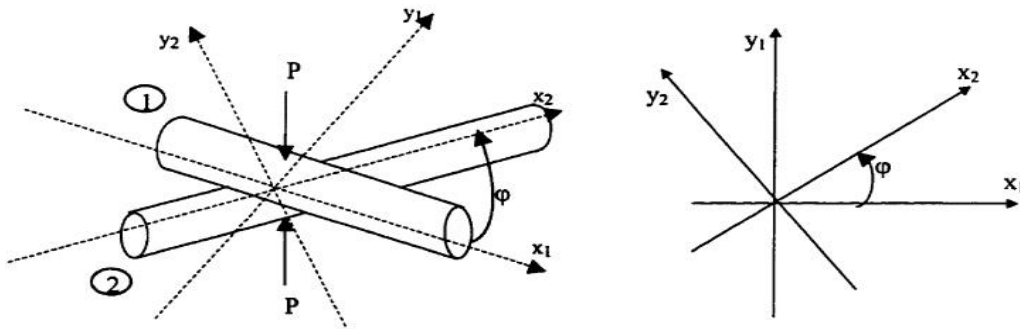


Figura 4.5. Contactul între două sârme cu același diametru

În aceste condiții, se poate scrie:

$$R_1 = \frac{\rho_1}{\sin^2 \alpha_1}$$

$$R_2 = -\frac{\rho_2}{\sin^2 \alpha_2} \quad (4.21)$$

unde $\varphi = |\alpha_1 - \alpha_2|$ și ρ_1, ρ_2 sunt razele de curbură ale celor două sârme în contact, iar α_1 și α_2 reprezintă orientările lor în raport cu direcția axială a conductorului.

Atunci când asupra corpurilor acționează o forță normală de contact se obțin deformații locale și configurația geometrică a elipsei de contact se poate modifica.

Pentru un contact Hertzian, presiunea de contact este dată de expresia:

$$p = p_0 \sqrt{1 - \left(\frac{x}{b}\right)^2 - \left(\frac{y}{a}\right)^2} \quad (4.22)$$

unde: P – forța aplicată în zona contactului

$$p_0 = \frac{3}{2} \frac{P}{\pi ab} \quad (4.23)$$

În literatura de specialitate se indică faptul că excentricitatea e_c a elipsei de contact nu depinde de forța aplicată și ea poate fi aproximată sub forma:

$$e_c = \frac{b}{a} \approx \left(\frac{B}{A}\right)^{\frac{2}{3}} \quad (4.24)$$

unde raportul B/A este dat de expresia:

$$\frac{B}{A} = \frac{\left(\frac{a}{b}\right)^2 E(e_c) - K(e_c)}{K(e_c) - E(e_c)} \quad (4.25)$$

iar $E(e_c)$ și $K(e_c)$ sunt integralele eliptice având argumentul K :

$$K(e_c) = \int_0^{\pi/2} \frac{1}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \theta}} d\theta \quad (4.26)$$

$$E(e_c) = \int_0^{\pi/2} \frac{1}{\sqrt{(1 - k^2 \sin^2 \theta)}} d\theta \quad (4.27)$$

$$k^2 = 1 - \frac{b^2}{a^2} \quad (4.28)$$

pentru:

$$e_c = \frac{b}{a} < 1 \quad (4.29)$$

4.5. Modelarea cu elemente finite a contactului dintre sârmele de aluminiu

În această capitol, studiul numeric al contactului dintre sârmele conductorului poate fi privit ca o bază de calcul în ceea ce privește apariția și dezvoltarea amprentelor validată cu ajutorul metodologiilor dezvoltate în Capitolul 5. Analiza numerică a stării de tensiune și deformație a fost realizată cu ajutorul programului de simulare ABAQUS 6.10, pe modele numerice fidele la care s-au folosit discretizări fine. Calculul numeric al parametrilor de mecanica ruperii a cuprins corpuri în stare triaxială de tensiune, cu rezultate ce pot fi comparate cu cele obținute la încercările de laborator și extrapolate pentru condiții complexe.

4.5.1. Definirea modelului geometric

În această etapă s-a definit modelul problemei fizice pe cale grafică, cu ajutorul modulului integrat de modelare. Modelul elaborat în acest studiu a fost construit pe baza sârmelor de aluminiu existente în conductorul studiat. Forma relativ simplă a sârmelor a permis realizarea unui model fidel realității ale cărui dimensiuni sunt $d = 2.95\text{mm}$ și o lungime de 20mm, considerată ca fiind suficientă

pentru contactele dintre sârme. Materialul definit a fost aluminiu cu structură omogenă și izotropă, cu puritatea 99,5% având comportamentul elastic definit de modulul de elasticitate $E = 69090 N/mm^2$ și Coeficientul lui Poisson $\nu = 0.33$. Definirea comportamentului plastic s-a făcut folosind valori ale limitei de curgere și deformațiilor plastice, obținute din trasarea curbei caracteristice de tracțiune.

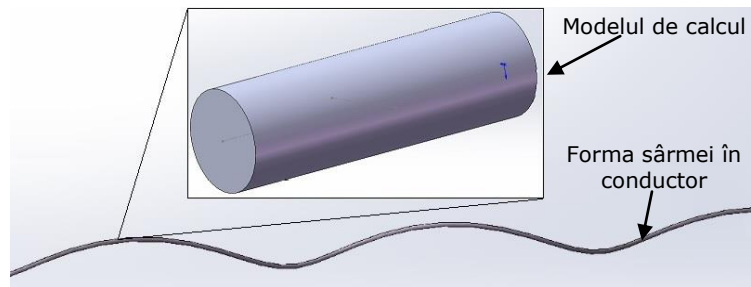


Figura 4.6. Modelul geometric al sârmei de aluminiu

4.5.2. Discretizarea modelului de calcul

Trecerea de la structura continuă la modelul discret s-a făcut pentru o precizie optimă a soluției, sârmele de aluminiu fiind modelate folosind elementele hexaedrice cu 8 noduri/element. Ansamblul celor două corpuri ale modelului de calcul s-a făcut folosind probe independente secționate de plane paralele, normale la direcția de deplasare și care conțin axele acestora.

Tabel 4.1. Schema de discretizare sârmelor de Al

Nr. elemente definite	1 508
Nr. total elemente	3 132
Nr. noduri definite	2 040
Nr. total de noduri	10 800
Nr. total de variabile din model	27 528
Unghil mediu min	73,82°
Deviația geometrică medie	$2,52 \times 10^{-8}$
Unghi element (min/max)	83,57° / 107,81°
Dimensiune muchie element (min/max)	0,275 / 0,690

Detalii despre schema de discretizare optimă pentru modelul sârmelor de aluminiu sunt prezentate în tabelul 4.1. Totodată, în Figura 4.7 se prezintă aspectul modelului, cu detalierea elementelor finite și evidențierea nodurilor.

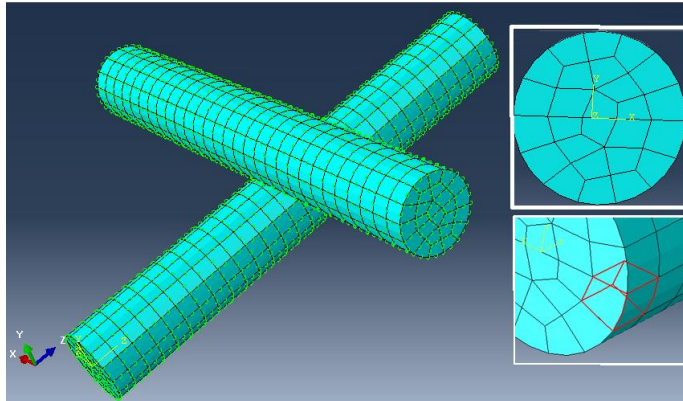


Figura 4.7. Discretizarea cu elemente finite a modelului de calcul sârmă de aluminiu

4.5.3. Condiții la limită acceptate

Interacțiunile de contact dintre sârmele de aluminiu sunt de tip contact deformabil de suprafață flexibil–flexibil, iar pentru fiecare regiune de contact sunt create numeroase perechi de contacte, compuse din suprafețe ale elementelor celor două sârme sau ale elementelor aceleiași sârmă. Au fost efectuate numeroase modele de calcul pentru a obține un set de factori optimați de rigiditate a contactului normal, pentru a obține o precizie de înaltă rezoluție, simplitate și eficiență, având în vedere neliniaritățile materiale și geometrice. Una din sârme a fost încastrată, iar cea de a doua are un grad de libertate geometrică, din cele șase posibile, translație normală pe axa sârmei.

Tipul de contact creat este unul normal de tip „Hard” și este creat de deplasarea sârmei superioare. O astfel de mișcare este întâlnită frecvent în realitate și este în concordanță cu încercările la amprentare, de laborator, așa cum se prezintă în Figura 4.8 Mișcarea sârmei superioare este dată de o presiune uniform distribuită, aplicată pe suprafața opusă contactului, care duce prin translație la crearea contactului și apariția amprentelor superficiale.

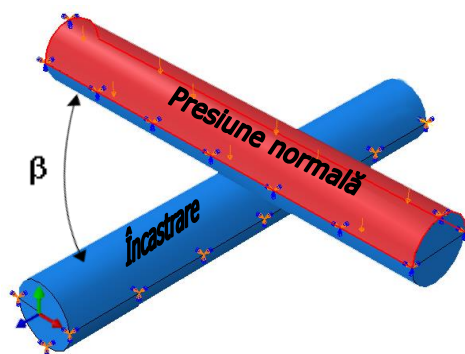


Figura 4.8. Condiții pe contur aplicate la simularea solicitării de amprentare

Analiza structurală este o problemă de contact care constă în modificarea neliniarității condițiilor de contur. Aceasta poate implica condiții specifice care guver-

nează mișcarea interfețelor în mișcare. În mecanica solidului astfel de condiții se referă de obicei la constrângerea impenetrabilității, legea acțiune-reacție (a treia lege a lui Newton) și legea privind frecarea de suprafață (cum ar fi legea clasică a lui Coulomb). În cazul analizei contactului cu elemente finite este necesar să se implementeze algoritmi de contact pentru fiecare pas de încărcare, care să asigure compatibilitatea contactelor la interfețele de contact. Elementele folosite la calculul contactelor suprafață-suprafață sunt neliniare, date de solutionarea ecuațiilor de gradul al doilea.

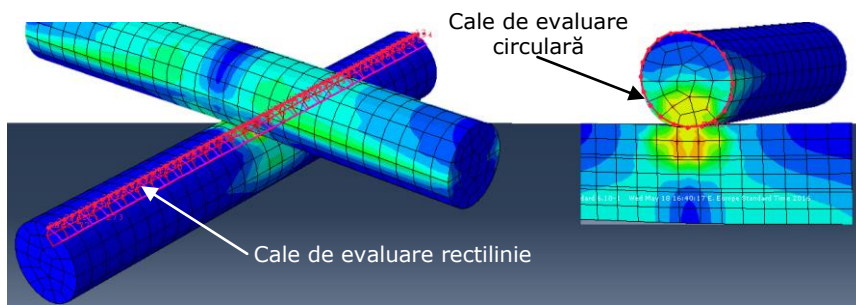


Figura 4.9. Pozițiile și tipurile cailor de evaluare de pe modele

În vederea evidențierii zonei de contact, a deformațiilor maxime și deplasărilor pe direcții date s-au creat căi de tip "Path", rectilinii și circulare, ce conțin noduri de pe suprafețele modelelor. Astfel, s-au făcut determinări ale deplasărilor și s-a analizat distribuția tensiunii pe direcțiile date. Figura 4.9 prezintă pozițiile nodurilor ce formează direcțiile.

4.5.4. Încărcări aplicate modelului de calcul

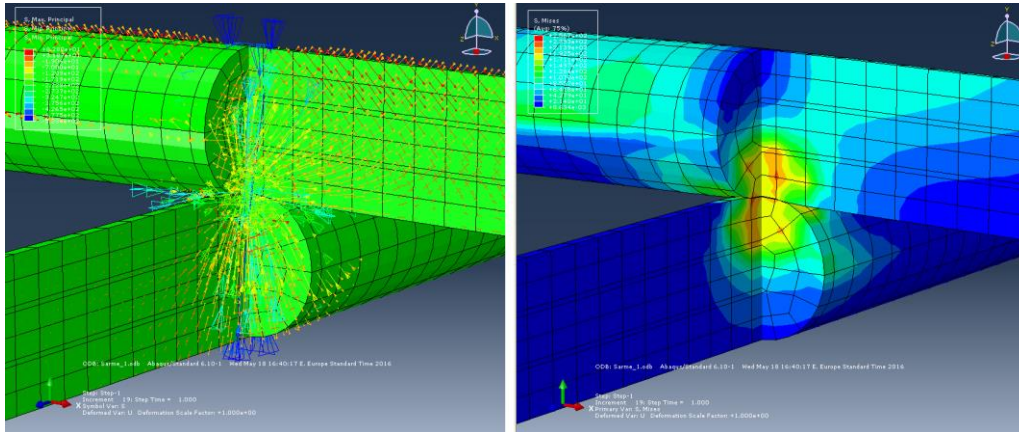
În cadrul acestor simulări s-au analizat deformațiile și tensiunile ce se crează în momentul amprentărilor dintre sârme. Pentru aceasta s-au pastrat constante tipul de discretizare, domeniul și condițiile de analiză, iar parametrii ce s-au modificat sunt: valoarea presiunii normale P și unghiul φ creat de axele modelelor, în planul normal la direcția de aplicare a forței.

Poziția și mișcarea relativă a celor doua modele, precum și variațiile presiunii normale au variat pentru un număr de 18 seturi de simulare. Valorile unghiului de amprentare φ au fost alese în concordanță cu încercările de laborator din Capitolul 5.4, cu valori de 30° , 60° , 90° . Totodată, valorile presiunilor normale au fost împărțite în 6 trepte de încărcare $0,54\text{N/mm}^2$, $1,08\text{N/mm}^2$, $1,62\text{N/mm}^2$, $2,16\text{N/mm}^2$, $2,7\text{N/mm}^2$ și $5,4\text{N/mm}^2$, corespunzătoare forțelor de amprentare din Capitolul 5.

S-a urmărit distribuția tensiunilor echivalente, σ_{ech} von Mises la nivelul elementelor și distribuția deformației plastice echivalente, pentru identificarea formei și dimensiunilor amprentelor, la varierea unghiului φ . Tensiunile s-au calculat potrivit criteriului von Mises, cu formula de mai jos.

$$\sigma_{ech} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1 \cdot \sigma_2 - \sigma_2 \cdot \sigma_3 - \sigma_3 \cdot \sigma_1} \leq \sigma_a \quad (4.30)$$

Unde: $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ - tensiunile după cele trei direcții
 σ_a - rezistența admisibilă a materialului



a) Distribuția vectorilor tensiune b) Distribuția tensiunii echivalente von Mises
 Figura 4.10. Simularea solicitării la amprentare a sârmelor de aluminiu

4.5.5. Rezultatele obținute și interpretarea lor

Scopul analizelor statice efectuate pe sârmele de aluminiu este determinarea deformațiilor care apar în zona de contact, ce au ca efect apariția de amprente. Totodată, s-a urmărit corespondența cu valorile obținute experimental și s-a observat efectul creat la valori mari ale presiunii normale. În cazul tensiunilor, s-a optat pentru prezentarea tensiunilor calculate potrivit criteriului von Mises.

Cu ajutorul datelor obținute prin analiza cu elemente finite s-a putut observa unde sunt tensiunile maxime în cazul contactului dintre sârme și care este efectul creșterii presiunii normale. Astfel, s-a observat că tensiunea maximă este pe conturul amprentelor, la punctul de graniță a contactului. Folosind modulul de analiză cu elemente finite extinse "XFEM" și criteriul de rupere bazat pe tensiunea principală maximă "MaxPS", s-a determinat punctul de inițiere și propagare al fisurilor.

Datele prelevate din simulările făcute în ABAQUS au fost introduse în programul de grafică SigmaPlot, cu care s-au trasat graficele deformațiilor plastice. Acestea prezintă variațiile tridimensionale ale amprentelor, create în zonele de contact, cu evidențierea dependenței dintre suprafața amprentată (determinată de dx și dy) și adâncimea de penetrare.

În Figura 4.11 este prezentat aspectul distribuției tensiunilor în secțiunea zonei de contact și punctul de inițiere al fisurilor, aflat la periferia amprentelor.

Valorile dx , dy și H_a au fost determinate din simularea amprentărilor pentru încărcările stabilite ale presiunii normale. S-au trasat trei grafice distincte, câte unul pentru fiecare unghi φ considerat, cu pastrarea constantă a treptelor de încărcare a presiunii normale.

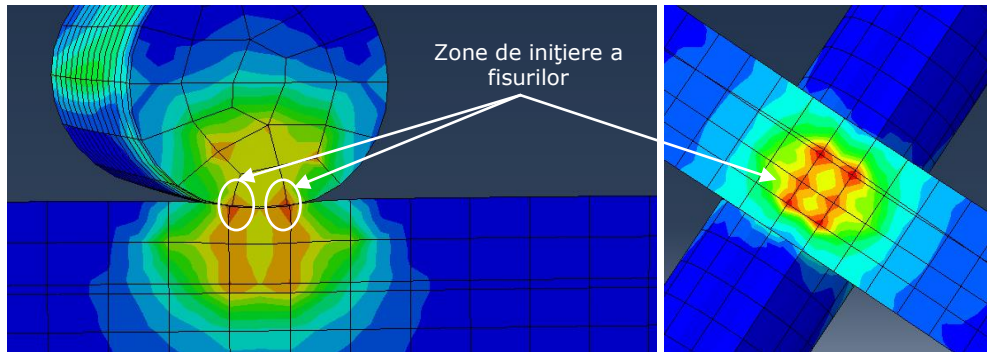


Figura 4.11. Localizarea zonelor de inițiere a fisurilor din contactul sârmelor

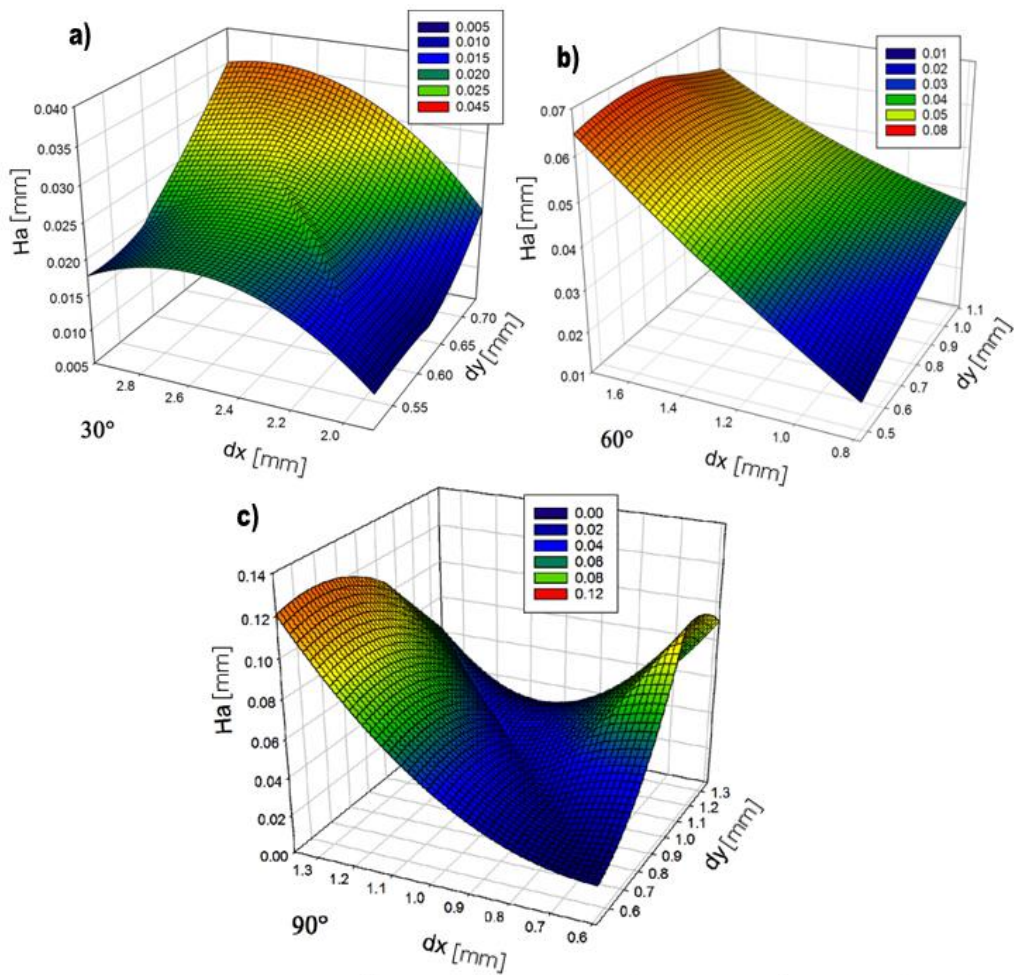


Figura 4.12. Variația tridimensională a dimensiunilor amprentelor pentru cele trei unghiuri de amprentare; a) $\varphi=30^\circ$; b) $\varphi=60^\circ$; c) $\varphi=90^\circ$;

Unde:

- φ – unghiul de amprentare
- dx – axa mare a amprentei
- dy – axa mica a amprentei
- Ha – adâncimea de penetrare

Graficele următoare prezintă variația tensiunilor echivalente von Mises pe suprafața amprentată, odata cu creșterea amprentei (determinată de dx , dy și Ha).

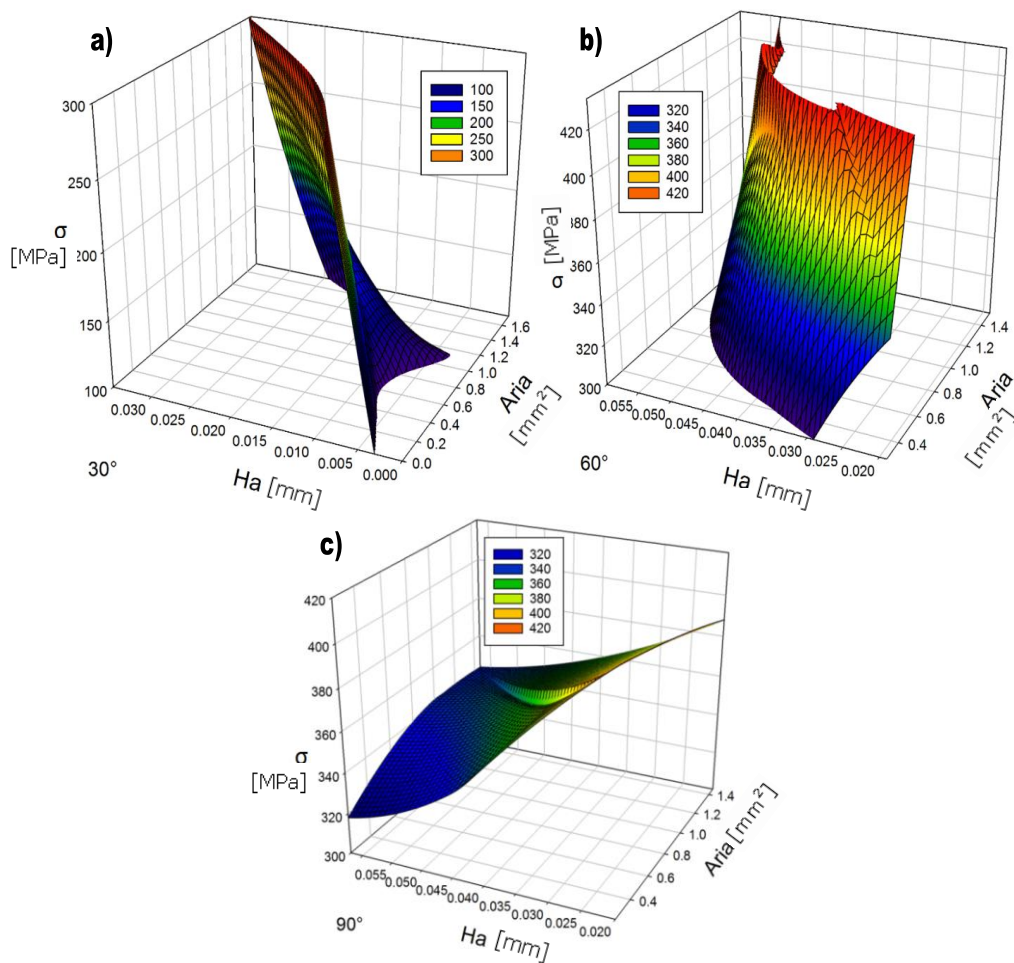


Figura 4.13. Variația tensiunilor echivalente von Mises pentru cele trei unghiuri de amprentare; a) $\varphi=30^\circ$; b) $\varphi=60^\circ$; c) $\varphi=90^\circ$;

4.6. Observații și concluzii

În jurul unui punct de contact inițial se formează o zonă de contact a cărei arie depinde de geometria inițială și de încărcările aplicate.

Intensitatea deformațiilor specifice este dependentă de adâncimea de penetrare, însă proporția variază odată cu creșterea amprentei ce se crează pe suprafață.

Modelarea contactului dintre sârme evidențiază faptul că apariția și dezvoltarea mecanismului de rupere a conductorului nu poate fi înțeles fără o abordare punctuală a fenomenelor care îl formează. Interpretarea aspectului amprentelor furnizează informații cu privire la regimul de exploatare al conductorului și la crearea premizelor apariției unor ruperi locale.

Acest studiu oferă o înțelegere mai precisă și mai clară a stărilor de contact și a stărilor de tensiune ce se dezvoltă, permițând determinarea unor parametri importanți pentru studiul diferitelor contacte, create de unghiurile de amprentare.

Analiza contactului punctiform folosind metoda clasică (Teoria lui Hertz) nu permitea obținerea unor rezultate de o asemenea precizie cu privire la starea de tensiuni de la nivelul contactului.

Determinarea tensiunilor von Mises a permis o analiză a stări de tensiune din sârmele de aluminiu și a permis cuantificarea acestei stări și a efectelor pe care le creează, adică a amprentelor.

Analiza cu elemente finite a făcut posibilă determinarea poziției punctelor de inițiere și propagare a fisurilor ca fiind dispuse perimetral amprentelor.

Pentru valori similare ale presiunii normale s-au observat diferențe mari în dezvoltarea amprentelor atât pe suprafața, cât și în profunzimea sârmelor, în funcție de unghiul de amprentare.

Folosind variații liniare ale presiunii normale s-a înregistrat o variație neliniară a tensiunii echivalente și o modificare a raportului dintre suprafața și profunzimea amprentei.

O evaluare a tensiunilor de contact care au stat la baza deformațiilor plastice nu poate fi făcută fără a lua în considerare caracteristicile amprentei.

5. CERCETĂRI PRIVIND INFLUENȚA AMPRENTELOR ȘI A ÎMBĂTRÂNIRII ASUPRA CARACTERISTICILOR MECANICE ALE CONDUCTOARELOR

5.1. Dispozitive și echipamente concepute pentru încercări la solicitări statice și variabile

Mașinile de încercări cuprinse în capitol 5 fac parte din cadrul laboratorului „Ștefan Nădășan” al departamentului de Mecanică și Rezistența Materialelor, a Facultății de Mecanică din Universitatea Politehnica Timișoara.

Dispozitivul port-piesă se constituie ca o interfață mecanică, pe de o parte între calculator și probă, iar pe de altă parte între probă și bacurile mașinilor de testat. Activitățile de concepere și proiectare ale acestui ansamblu au fost strâns legate de tipul testului ce s-a dorit a se realiza, de materialul și dimensiunile probelor și de tipul bacurilor mașinilor de încercat.

5.1.1. Proiectarea dispozitivelor port-piesă

Proiectarea dispozitivelor port-piesă de prindere a sârmelor în timpul încercărilor au fost concepute pentru un singur proces de testare și ținând seama de mașina de testat folosită. Stabilirea datelor necesare dispozitivului s-a făcut ținându-se seama de forma, dimensiunile și materialul sârmelor (aluminiiu) și de caracteristicile fenomenelor ce se întâlnesc la conductoarele LEA.

Principiile de bază ale conceperii și proiectării dispozitivelor port-piesă au fost următoarele:

1. analiza funcțională și tehnologică a sârmei de aluminiu;
2. analiza operației tehnologice și a suprafeței țintă dată de generatoarea sârmei;
3. optimizarea sistemului de bazare și fixare a sârmei pe mașina de testat;
4. conceperea unui ansamblului-dispozitiv unitar din care să rezulte o construcție mecanică formată din elemente de așezare, ghidare, fixare și mecanisme de acționare simple;
5. calculul erorilor de așezare în funcție de toleranțele de execuție ale suprafețelor țintă pentru o fixare cu strângere corespunzătoare a sârmelor
6. calculul sistemului de fixare în funcție de forțele și momentele dezvoltate în procesul de testare.

Pentru început am stabilit caracteristicile fizico-mecanice pe care trebuie să le aibă materialul din care se execută acesta. Proprietățile mecanice ale materialului sunt necesare pentru calculul regimului de încărcare și pentru calculul componentelor forței de testare. Ulterior s-au stabilit dimensiunile și forma pe care dispozitivul trebuie să le aibă, pentru ca să poată fi prins pe mașina de încercat și, totodată, pentru a putea fixa sârmele în timpul încercărilor.

Elemente definitorii pentru forma și dimensiunile dispozitivului:

- elemente de așezare-reazeme a sârmei în timpul încercărilor;
- elemente de ghidare-control a poziției relative dintre sârme;
- tipul de fixare a sârmelor (cu strângere);
- elemente auxiliare: de asamblare, elemente de poziționare, sanfrene, lungimea minimă de contact cu sârma etc.;
- corpul dispozitivului, cât mai simplu pentru un control optim în timpul testului;
- descrierea ciclului de funcționare.

5.1.2. Caracteristicile dispozitivelor pentru amprentarea sârmelor

Aceste dispozitive s-au realizat pentru încercările desfășurate în cadrul laboratorului de rezistența materialelor, în vederea fixării sârmelor pe mașina de încercat la tracțiune Zwick de 5 KN și pe mașina de încercat la tracțiune de 10 KN. Modalitatea de fixare a sârmelor a trebuit să se facă cu respectarea condițiilor de contact dintre ele și dispozitiv. Acesta trebuie să fie pe o lungime relativ mare și cu un joc cât mai mic. Pentru aceasta s-a ținut seama de două dimensiuni critice, diametrul de fixare și lungimea de așezare a sârmei. Solicitarea care se dorește a se materializa în cadrul testului este cea de contact dintre sârme ca urmare a presiunilor exterioare.

Dispozitivele au fost realizate din OLC15 care are următoarele proprietăți mecanice:

- starea N (normalizat) $T = 880-9800C$;
- $R_{p0.2} = 225 \text{ N/mm}^2$;
- $R_m = 373 \text{ N/mm}^2$;
- $A5\% = 27$;
- $HB = 197$;
- mediu = a (ambient).

În Figura 5.1 se prezintă dispozitivele și montarea acestora în bacurile mașinii de încercat.

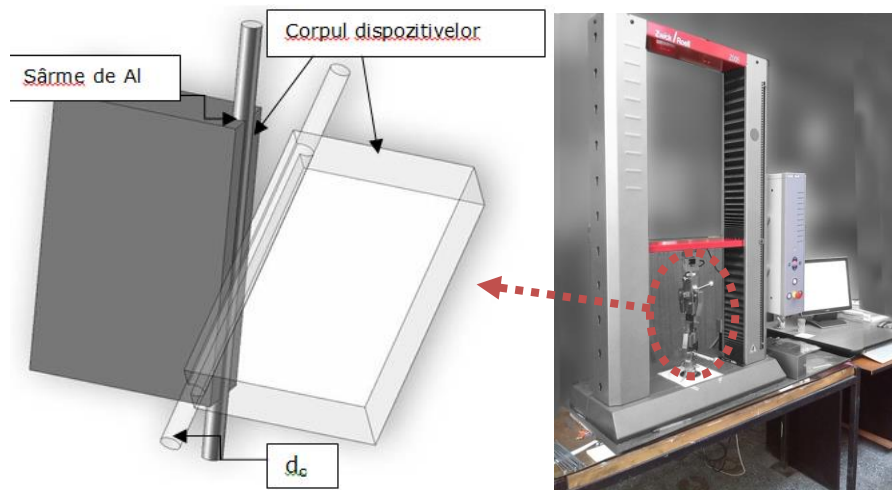


Figura 5.1. Dispozitive pentru fixarea sârmelor. Fixarea dispozitivelor pe mașina de încercat

Stadiul de prelucrare a piesei a variat în funcție de suprafața cu care aceasta vine în contact și până la operația pentru care s-a proiectat dispozitivul. Diametrul canalelor de fixare a sârmelor $d_c=3\text{mm}$, cu $0,06\text{mm}$ mai mare decât diametrul sârmelor. Aceasta dimensiune a fost aleasă pentru ca testarea să se realizeze în condiții similare cu cele din realitate, fără tensiuni suplimentare nedorite.

În cadrul încercărilor mecanice se masoară nivelul încărcărilor aplicate eșantionului de sârme de aluminiu, dimensiunile acestuia, ca și efectele produse asupra sârmei (în general deformații elastice și plastice), după care se stabilesc, folosind relații de calcul potrivite, valorile corespunzătoare ale caracteristicilor mecanice ale materialului.

Pentru asigurarea unor condiții de testare controlate și pentru facilitarea poziționării corecte a probelor în ceea ce privește unghiul făcut de axele celor două sârme aflate în contact, pe durata încercărilor, am adaptat pe mașină un dispozitiv de măsurare a unghiurilor.

5.1.3. Caracteristicile dispozitivelor pentru încercarea la oboseală a sârmelor

Pentru efectuarea încercărilor de oboseală la întindere a sârmelor de aluminiu am realizat un dispozitiv de prindere sub forma unor plăcuțe metalice cu canale superficiale. Necesitatea realizării acestor dispozitive a fost dată de tipul bacurilor de fixare și, ca urmare a încercărilor eșuate de a face teste. Diminuarea tensiunilor din zonele de fixare, pe durata încercărilor a fost necesară având în vedere caracterul acestora.

Dispozitivele au fost confecționate dintr-un profil extrudat de aliaj de aluminiu Al6060-T6 cu grosime de 5 mm , care are proprietăți mecanice mai bune decât probele și care confera posibilitatea unei fixări îmbunătățite a probelor. Aceasta se datorează aderenței foarte bune a celor două materiale, aflate în contact. Dispozitivele s-au realizat cu respectarea condițiilor impuse de mașina de încercat Walter+Bai of 10 kN . Pe fețele de strângere au fost create canale ale căror diametre sunt mai mari decât cel al sârmei cu 0.7 mm , iar în zonele de capăt de canal, cu sanfrene pe o lungime de 3.5mm .

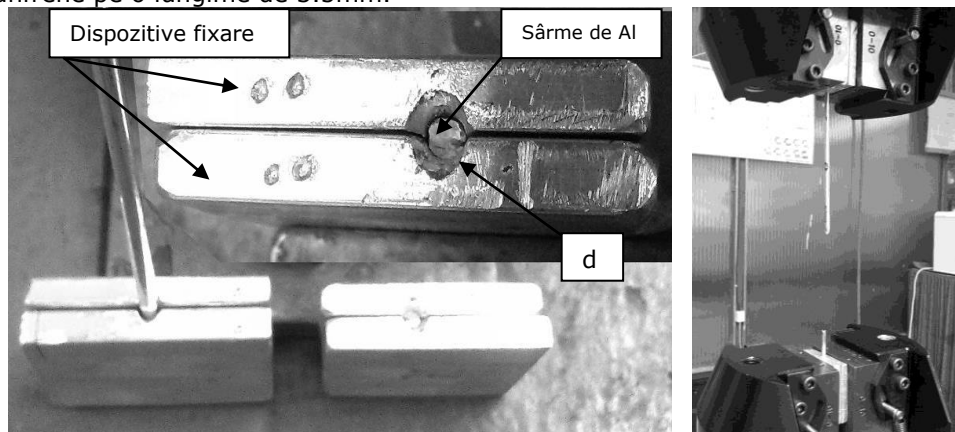


Figura 5.2. Dispozitive de fixare a sârmelor pentru încercarea la oboseală

Distribuția uniformă a forțelor pe suprafața de contact dintre sârme și placuțe a dus la diminuarea numărului de probe la care ruperile au avut loc în zona de contact.

5.2. Cercetări experimentale asupra zonelor de contact dintre sârmele de aluminiu

5.2.1. Influența presiunii de contact asupra evoluției amprentelor

Determinarea clară a zonei deformată plastic și comportarea materialului la variații ale tensiunilor este posibilă doar în cazul creării unor condiții de testare controlabile, în cadrul cărora presiunea de contact să poată fi indusă treptat. Pentru asemenea aplicații, rezultatele experimentale determină corespondența dintre presiunile de contact și amprentele create pe suprafața sârmelor. O altă caracteristică importantă a contactului este dată de poziția relativă a sârmelor în contact. Unghiul creat de proiecția axelor sârmelor în plan tangent este definitoriu pentru forma și dimensiunile amprentelor. Acest mod de deformare arată că, în forma cilindrică plină, starea de tensiuni este neomogenă. De asemenea, poate apărea și o solicitare de încovoiere, din cauza neparalelismului celor două suprafețe frontale, a neomogenității materialului sau a aplicării excentrice a sarcinii.

Între sârmele conductoarelor se întâlnesc două tipuri de contacte:

- *Contacte liniare* - reprezentate de generatoarele sârmelor de pe același strat;
- *Contacte punctiforme* - reprezentate de punctele de contact dintre sârmele aflate pe straturi învecinate sau între cele de pe ultimul strat și elementele cu care acestea vin în contact.

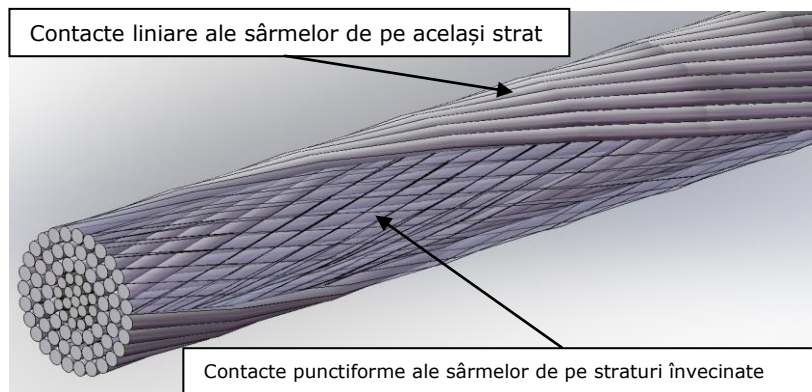


Figura 5.3. Tipuri de contacte întâlnite între sârmele conductorului

În cadrul acestor încercări de laborator s-au testat sârme aflate în contact punctiform, datorită deformațiilor mari care se dezvoltă la forțe mici de contact și datorită efectelor dezastruoase pe care acestea le au asupra conductoarelor. Cu ajutorul dispozitivelor de prindere și fixare ale sârmelor de aluminiu, s-a stabilit poziția și mișcarea relativă între sârme, controlându-se continuu forța de apăsare. În timpul testelor, dispozitivele fixează sârmele în plane paralele, cu posibilitatea de

variere a unghiului creat de axele acestora. Asupra sârmelor aflate în contact s-au aplicat forțe variabile care au fost menținute timp scurt. Încercarea s-a repetat pe mai multe eșantioane, atât din stratul exterior, cât și din straturile intermediare ale sârmelor de Al. Pentru a putea stabili o relație cât mai precisă între forță și deformare, am optat pentru aplicarea progresivă a forțelor pe eșantioane diferite de sârme, la diferite unghiuri de apăsare. În imaginea de mai jos se arată cum variază unghiul și care este poziția probelor în timpul încercărilor. Unghiurile alese pentru desfasurarea testelor sunt 30°, 60°, 90° și sunt în concordanță cu cele întâlnite în practică.

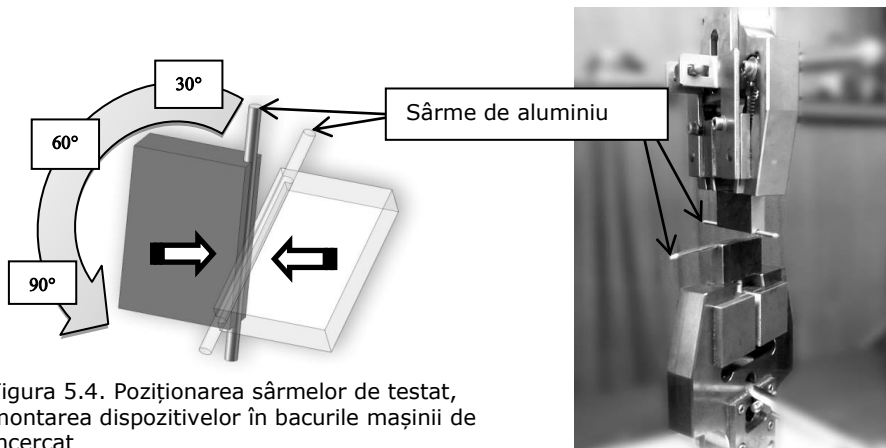


Figura 5.4. Poziționarea sârmelor de testat, montarea dispozitivelor în bacurile mașinii de încercat

Testele de amprentare s-au aplicat pe sârme din componența conductoarelor noi și îmbătrânite 42 de ani în transportul de energie electrică de înaltă tensiune. Sârmele cu lungime de 200mm și diametrul de 2.95mm au fost amprentate cu ajutorul mașinii de încercat mașină de încercat la tracțiune-compresiune ZWICK ROEL, la o temperatură a mediului ambiant de 20°C. Măsurătorile amprentelor s-au făcut cu ajutorul unui soft cu capacități avansate de analiză a datelor denumit SigmaSCAN, pe imagini preluate cu un microscop de precizie Krüss-Optronic.

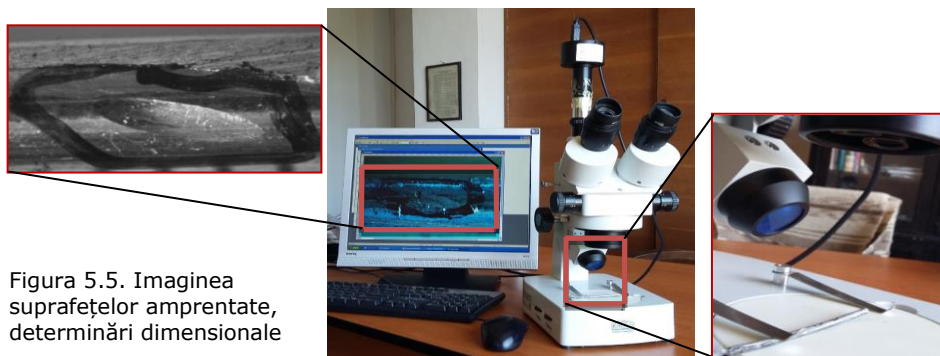


Figura 5.5. Imaginea suprafețelor amprentate, determinări dimensionale

În tabelul următor se prezintă media măsurătorilor de pe amprentele nou create pe suprafețele sârmelor noi și îmbătrânite.

Tabel 5.1. Caracteristicile geometrice ale amprentelor

Forța	φ	Sârme noi				Sârme îmbătrânite			
		dx	dy	Aria	Ha	dx	dy	Aria	Ha
[N]	[°]	[mm]		[mm ²]	[mm]	[mm]		[mm ²]	[mm]
100	30	1,893	0,515	0,765	0,010	1,368	0,333	0,358	0,009
	60	0,779	0,460	0,281	0,019	0,889	0,511	0,357	0,022
	90	0,590	0,520	0,242	0,020	0,644	0,648	0,327	0,025
200	30	2,099	0,578	0,952	0,017	1,914	0,498	0,748	0,018
	60	1,067	0,631	0,528	0,035	1,220	0,703	0,673	0,036
	90	0,831	0,819	0,535	0,035	0,903	0,902	0,639	0,039
300	30	2,227	0,581	1,016	0,021	2,271	0,593	1,058	0,022
	60	1,079	0,818	0,693	0,039	1,495	0,862	1,012	0,045
	90	1,042	1,021	0,836	0,042	1,112	1,108	0,967	0,048
400	30	2,679	0,660	1,388	0,028	2,833	0,669	1,488	0,038
	60	1,539	0,956	1,155	0,055	1,721	0,990	1,337	0,075
	90	1,232	1,193	1,154	0,057	1,282	1,278	1,287	0,072
500	30	2,996	0,735	1,729	0,035	3,176	0,763	1,902	0,047
	60	1,746	1,110	1,522	0,060	2,057	1,130	1,825	0,078
	90	1,366	1,361	1,459	0,062	1,456	1,456	1,665	0,080
1000	30	4,754	1,197	4,469	0,093	4,886	1,200	4,604	0,106
	60	2,812	1,526	3,371	0,180	2,850	1,589	3,560	0,201
	90	1,962	1,966	3,029	0,185	1,987	1,990	3,105	0,203

Unde:

- F – este forța normală
 φ – unghiul de amprentare
dx – axa mare a amprentei
dy – axa mica a amprentei
Ha – adâncimea de penetrare

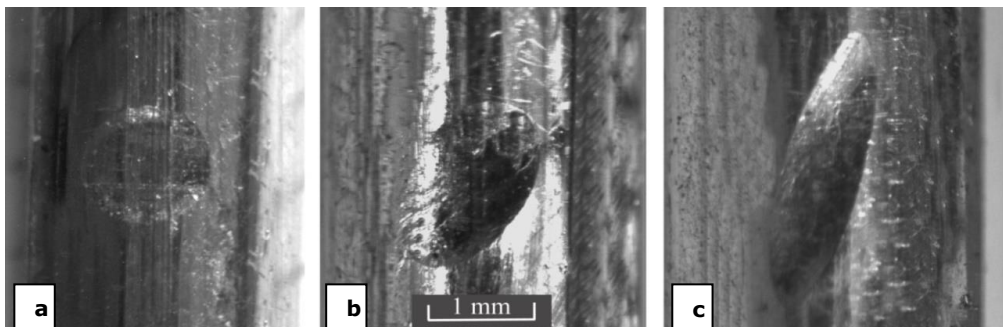


Figura 5.6. Aspectul amprentatelor la diferite unghiuri de amprentare; a-90°, b-60°, c-30°

Forma amprentelor dezvoltate în punctele de contact este dependentă de unghiul de amprentare, așa cum se arată în imaginea de mai jos.

Încercarea la amprentare se aplică pe sârmele din componența conductoarelor pentru obținerea unei stări de tensiune concentrată și localizată. Contactul elastic dintre două corpuri cilindrice nu poate fi analizat aplicând doar teoria lui Hertz, pentru că trebuie să se țină cont atât de formele și dimensiunile corpurilor, cât și de poziționarea relativă a acestora. Astfel, lățimea de contact este o funcție a forței de apăsare dintre cele două corpuri, a razei cilindrului, respectiv a modului de elasticitate compus [Ramey, 1981]. Problema contactului normal în cazul în care deformațiile plastice sunt mult superioare celor elastice este deosebit de dificilă. În plus, profilul convex al sârmelor aduce complicații suplimentare. Intensitatea deformațiilor specifice este dependentă de adâncimea de penetrare, însă proporția variază odată cu creșterea amprentei ce se crează pe suprafață.

Ținându-se cont de unghiul de amprentare φ , care influențează aspectul și dimensiunile amprentelor, s-a stabilit dependența între forța de apăsare și dezvoltarea amprentelor de pe suprafețele sârmelor noi.

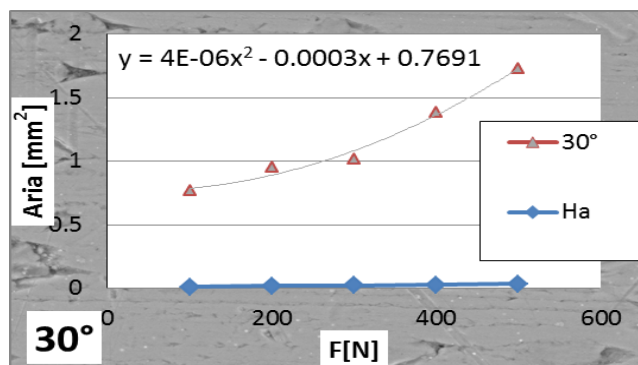


Figura 5.7. Variația suprafeței amprentei în funcție de forța de apăsare, pentru sârmele noi și $\varphi = 30^\circ$

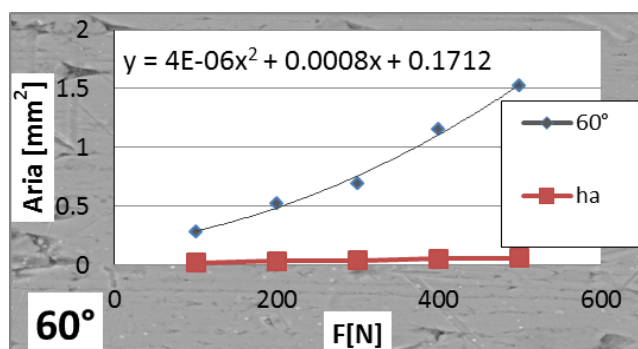


Figura 5.8. Variația suprafeței amprentei în funcție de forța de apăsare, pentru sârmele noi și $\varphi = 60^\circ$

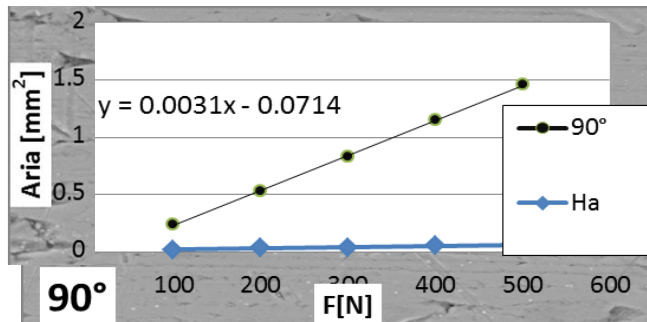


Figura 5.9. Variația suprafeței ampreței în funcție de forța de apăsare, pentru sârmele noi și $\varphi = 90^\circ$

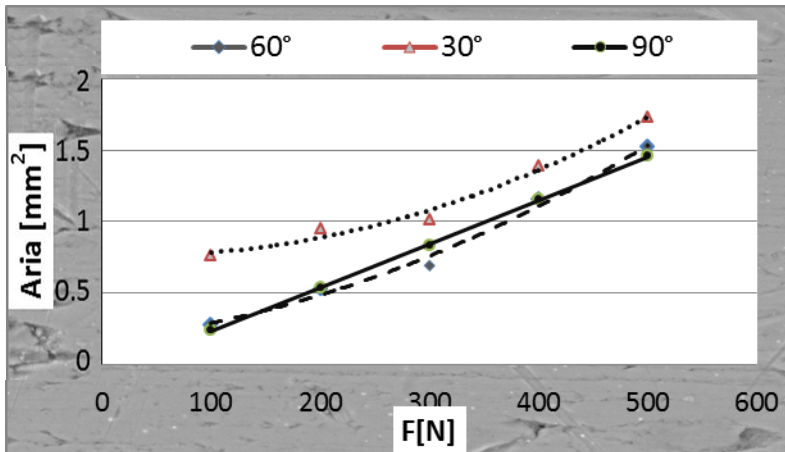


Figura 5.10. Variația comparativă a suprafeței amprețelor în funcție de forța de apăsare, pentru sârmele noi și φ variabil

Figurile 5.7; 5.8; 5.9, 5.10 sunt reprezentative pentru sârme de aluminiu noi. Din diagramele de variație a suprafeței de amprețare s-au dezvoltat o serie de ecuații polinomiale cu care se poate calcula aria suprafeței deformată, de presiunea de contact, în funcție de valoarea forței de apăsare. Aceste ecuații pot fi folosite și în cazul amprețelor existente, când se dorește determinarea forțelor de apăsare.

$$A_{n30} = (4 \cdot 10^{-6})F^2 - 0,0003 \cdot F + 0,7691 \quad (5.1)$$

$$A_{n60} = (4 \cdot 10^{-6})F^2 - 0,0008 \cdot F + 0,1712 \quad (5.2)$$

$$A_{n90} = 0,0031 \cdot F + 0,0714 \quad (5.3)$$

unde: A_{n30} - Aria suprafeței ampreței, pentru sârma nouă și $\varphi=30^\circ$
 A_{n60} - Aria suprafeței ampreței, pentru sârma nouă $\varphi=60^\circ$
 A_{n90} - Aria suprafeței ampreței, pentru sârma nouă $\varphi=90^\circ$

Utilizând aceleași condiții impuse, date de unghiul de amprentare și de valorile forțelor, s-a stabilit dependența între forța de apăsare și dezvoltarea amprentelor de pe suprafețele sârmelor îmbătrânite, Figurile 5.11; 5.12; 5.13, 5.14.

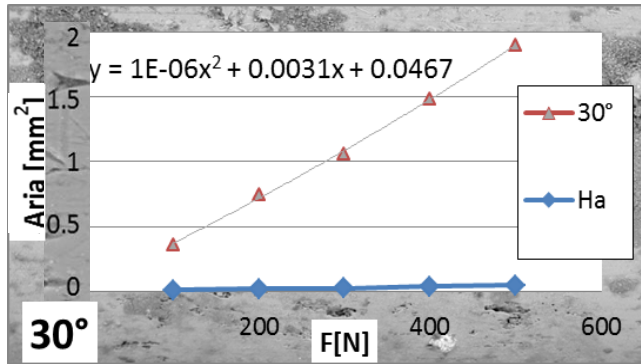


Figura 5.11. Variația suprafeței amprentei în funcție de forța de apăsare, pentru sârmele îmbătrânite și $\varphi = 30^\circ$

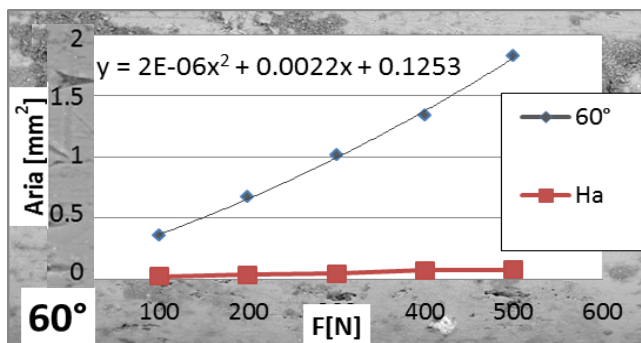


Figura 5.12. Variația suprafeței amprentei în funcție de forța de apăsare, pentru sârmele îmbătrânite și $\varphi = 60^\circ$

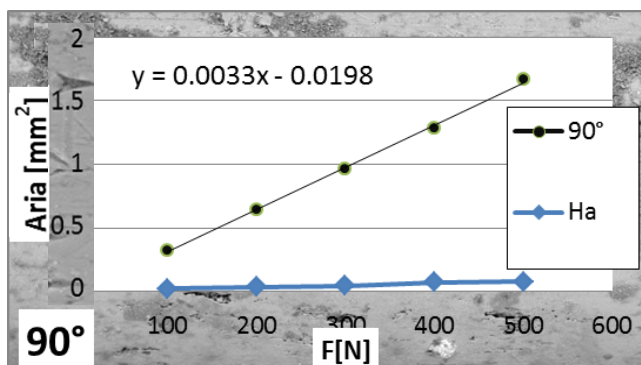


Figura 5.13. Variația suprafeței amprentei în funcție de forța de apăsare, pentru sârmele îmbătrânite și $\varphi = 90^\circ$

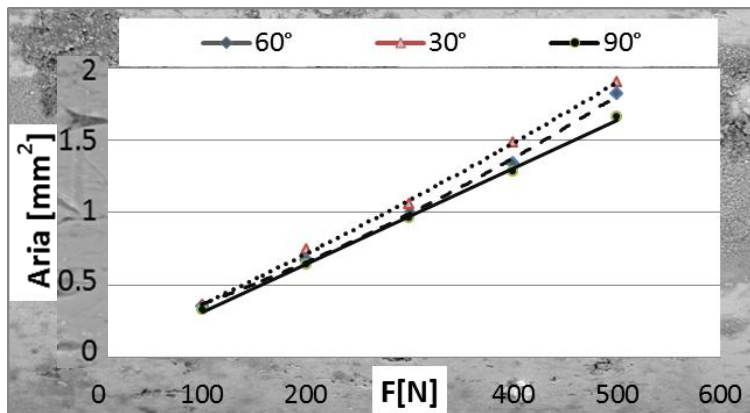


Figura 5.14. Variația comparativă a suprafeței amprentelor în funcție de forța de apăsare, pentru sârmele îmbatrânite și φ variabil

Cu ajutorul valorilor din diagramele de variație a suprafeței de amprentare s-au dezvoltat o nouă serie de ecuații polinomiale, specifice sârmele îmbatrânite. Aceste ecuații pot fi folosite ca bază de calcul, în cazul conductoarelor cu durată similară de exploatare, sau ca factor de corecție pentru aplicarea ecuațiilor 5.1, 5.2, 5.3 în cazul conductoarelor cu durată mai mare de exploatare.

$$A_{i30} = 10^{-6} \cdot F^2 + 0,0031 \cdot F + 0,0467 \quad (5.4)$$

$$A_{i60} = (2 \cdot 10^{-6})F^2 + 0,0022 \cdot F + 0,1253 \quad (5.5)$$

$$A_{i90} = 0,0033 \cdot F - 0,0198 \quad (5.6)$$

unde:

A_{i30} - Aria suprafeței amprentei, pentru sârma îmbatrânită și $\varphi=30^\circ$

A_{i60} - Aria suprafeței amprentei, pentru sârma îmbatrânită și $\varphi=60^\circ$

A_{i90} - Aria suprafeței amprentei, pentru sârma îmbatrânită și $\varphi=90^\circ$

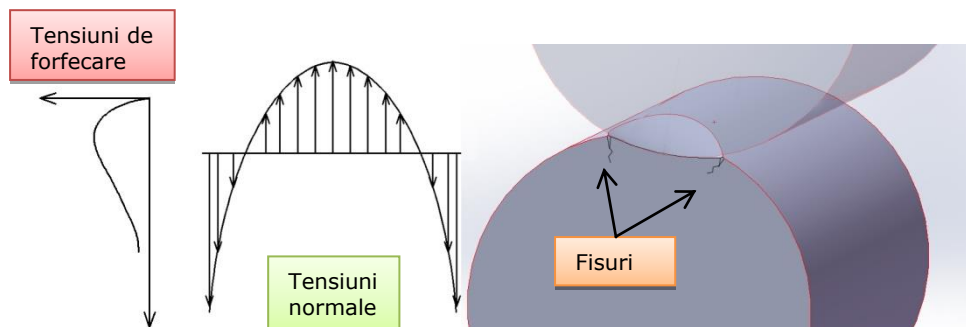


Figura 5.15. Schema formării fisurilor în zona de contact și variația tensiunilor

La frontiera amprentelor, acolo unde se întâlnește zona deformată cu cea în starea inițială, se inițiază microfisuri datorită deplasărilor transversale ce au loc în material și a ecrisării diferite din cele două zone.

Formarea fisurilor microstructurale, cu o lungime comparabilă cu dimensiunile microstructurii, marchează stadiul I ce caracterizează faza de incipență a degradării prin oboseală. Încărcările axiale ale conductorului și duritatea mai scăzută a materialului în proxima vecinătate a amprentei favorizează propagarea fisurilor nou create.

5.2.2. Influența duratei de exploatare asupra durității sârmelor de aluminiu

Cercetarea legilor privind duritatea stratului superficial în funcție de modul și regimul de lucru, studiul formării tensiunilor în procesul de trefilare și influența lor în funcționare fac ca starea fizică a suprafețelor aflate în contact să exercite o mare influență asupra proprietăților de exploatare ale materialelor ce compun sârmele. Astfel, se poate spune că starea fizică a suprafeței participă, alături de microtopografie, la creșterea duratei de viață și că suprafețele au caracteristici diferite datorită proceselor fizico-mecanice pe care le suportă.

Pentru determinarea capacității sârmelor de aluminiu de a se opune acțiunii de pătrundere a unui corp dur în masa lor s-a recurs la metoda de determinare a durității Vickers. Pentru încercarea Vickers s-au folosit penetratoare cu unghiuri identice la vârf, obținându-se astfel urme geometrice identice, indiferent care ar fi forța de încercare, motiv pentru care se poate spune că duritatea este independentă de mărimea sarcinii și, deci, determinările de duritate pot fi aplicate în cazul profilului sârmelor.

Determinarea valorilor de duritate Vickers s-a făcut conform STAS 492/1-85, cu ajutorul unui microscop dotat cu durimetru, model HPO 10 realizat de VEB Werkstoffprüfmaschinen din Leipzig, adaptat cu un dispozitiv electronic de preluare a imaginilor. Probele supuse încercării s-au constituit din sârme de aluminiu din conductorul nou și sârme de aluminiu din conductorul îmbătrânit. Determinările s-au făcut pe suprafețele sârmelor fără amprente și în zona amprentată a probelor rezultate din încercările de amprentare descrise în capitolul anterior.

Caracteristicile mașinii HPO 10 folosite în cadrul încercărilor și parametrii de testare sunt:

-	forțe de compresiune (dată de forța unui arc)	5 daN
-	eroarea limită a forței de apăsare	±1%
-	eroarea limită pentru micrometru ocular	±1μm
-	penetrator piramidă de diamant cu baza un pătrat și unghiul la vârf de 136°	
-	adâncimea de penetrare	1/7d _v
-	durata de menținere a sarcinii de încercare	30s

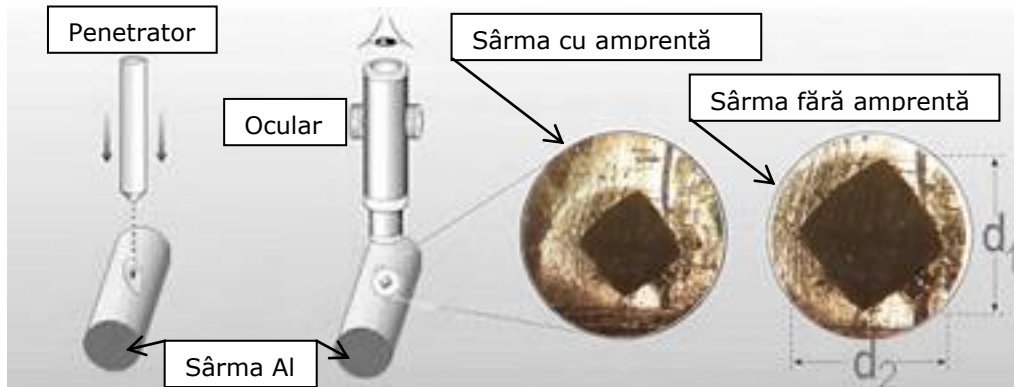


Figura 5.16. Aspectul suprafeței sârmelor în zona determinărilor de duritate Vickers

Duritatea Vickers s-a determinat cu relația:

$$HV = \frac{1,8544 \cdot F}{d_v^2} \text{ [MPa]} \quad (5.7)$$

Unde:

- F - forța de apăsare
 d_v - diagonala amprentei

În Tabelul 5.2 se arată cum variază duritatea în zona amprentată, odată cu modificarea forței de amprentare.

Duritatea este dependentă de defectele microscopice referitoare la omogenitatea materialului suprafeței (inclusiuni de particule nemetalice sau goluri) și de defectele suprafeței provenite din procesul de trefilare (în cazul sârmelor noi) sau din procesul de uzare de tip adeziv sau abraziv (în cazul sârmelor îmbătrânite) cum ar fi zgârâieturi, crăpături, pete, gropi.

Determinările s-au concentrat pe suprafața sârmelor ce nu prezentau suprafețe cu abateri de la cilindricitate. În cazul amprentelor de contact, determinările s-au făcut în zona cu deformarea cea mai mare de pe suprafața acestora. Urma este considerată ca o piramidă dreaptă cu baza pătrată, cu diagonala d_v , având la vârful același unghi cu cel al penetratorului.

Determinarea Vickers vizează obținerea informațiilor cu privire la modificarea proprietăților mecanice în zonele de contact, prin apariția ecruisării localizate. Aceasta influențează apariția și dezvoltarea amprentelor, posibilitatea pătrunderii de particule în masa sârmelor și dezvoltarea de fisuri la frontiera zonelor de contact. Valorile apropiate ce s-au obținut indică importanța deosebită pe care o au neomogenitățile din material. Cu toate acestea, există o tendință de creștere a durității odată cu creșterea forței de amprentare, ceea ce impune o modificare a proprietăților mecanice ale sârmelor pe lungimea acestora.

Un alt aspect important întâlnit în cadrul încercărilor de laborator este legat de valoarea diferită a durității celor două tipuri de sârme. În cazul sârmelor îmbătrânite, proprietatea materialului de a se opune penetratorului să intre în material este mai scăzută, înregistrându-se valori mai mici ale durității Vickers, decât în cazul celor noi. Rezistența și duritatea sârmelor de aluminiu scad în raport

100 Cercetări privind influența amprentelor și a îmbătrânirii asupra conductoarelor

cu trecerea timpului în exploatare și, deci, pentru aceleși tip și intensitate a solicitărilor, efectele produse sunt amplificate.

Tabel 5.2. Caracteristicile de stare ale suprafeței sârmelor de aluminiu pentru diferite forțe de amprentare

Nr. Crt.	Tip sârmă Nou/ Îmbătrânit	Timp [s]	Amprentă											Diagonala	HV		
			F ă r ă	1 0 0 N	2 0 0 N	3 0 0 N	4 0 0 N	5 0 0 N	6 0 0 N	7 0 0 N	8 0 0 N	9 0 0 N	1 0 0 N				
1	N	30	•												0.475	41.1	
2	N			•												0.471	41.8
3	N				•											0.446	46.6
4	N					•										0.495	37.8
5	N						•									0.52	34.3
6	N							•								0.491	38.5
7	N								•							0.463	43.3
8	N									•						0.472	41.6
9	N										•					0.48	40.2
10	N											•				0.46	43.8
11	N												•			0.4715	41.7
12	Î			•												0.544	31.3
13	Î				•											0.488	38.9
14	Î					•										0.485	39.4
15	Î						•									0.486	39.4
16	Î							•								0.48	40.2
17	Î								•							0.481	40.1
18	Î									•						0.483	39.7
19	Î										•					0.479	40.4
20	Î											•				0.484	39.6
21	Î												•			0.482	39.9
22	Î													•		0.478	40.6

5.3. Evaluarea influenței duratei de exploatare a sârmelor de aluminiu pe baza rezistenței la forfecare

Realizarea testelor s-a făcut cu respectarea standardului STAS 7927-67 care stabilește terminologia, condițiile impuse mașinii de încercare și epruvetelor, precum și condițiile pentru executarea încercării la forfecare. Încercările au fost executate pe sârme de aluminiu noi și îmbătrânite cu ajutorul unor dispozitive de fixare, asupra cărora s-a aplicat o solicitare de forfecare pură. Modul desolicitare a sârmei a fost unul de încovoiere, cu variație liniară a momentului încovoietor și cu momentul nul în secțiunea în care se produce.

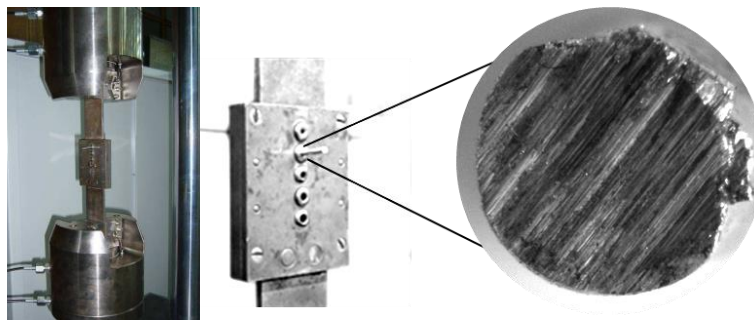


Figura 5.17. Aspectul sârmei forfecate de Al

Încercarea la forfecare ajută la determinarea caracteristicilor mecanice și elastice similare cu cele obținute prin solocitarea la tracțiune și reflectă modificările apărute în sârmele îmbătrânite. Cu ajutorul datelor cunoscute – diametrul, și al datelor prelevate din încercări – forța de forfecare, se determină rezistența la forfecare cu formula de mai jos, ținându-se cond de suprafața dublă de forfecare:

$$\tau_r = \frac{2F}{\pi d_0^2} \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (5.8)$$

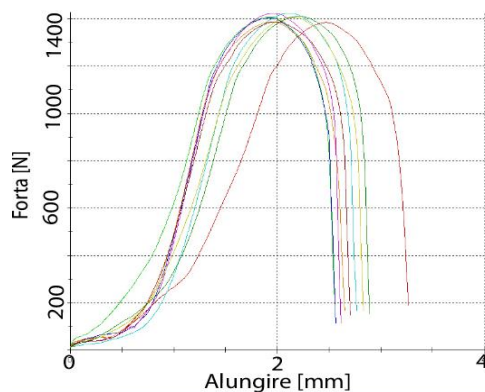


Figura 5.18. Curbele caracteristice la forfecarea sârmelor de Al

102 Cercetări privind influența amprentelor și a îmbătrânirii asupra conductoarelor

Cu datele prelevate din timpul încercărilor am realizat un tabel centralizator ce conține date relevante pentru cele două tipuri de sârme.

Tabel 5.3. Valorile rezistenței la forfecare pentru sârmele de Al

Nr. Crt.	S ₀	Sârme Al îmbătrânite		Sârme Al noi	
		F _{max}	τ _r	F _{max}	τ _r
1	2	3	4	5	6
1	6,83	1 380	100,95	1 380	100,952
2	6,83	1 380	100,95	1 410	103,147
3	6,83	1 279	93,564	1 400	102,415
4	6,83	1 210	88,516	1 390	101,684
5	6,83	1 230	89,979	1 420	103,878
6	6,83	1 250	91,442	1 420	103,878
7	6,83	1 240	90,711	1 410	103,147
8	6,83	1 301	95,173	1 390	101,684
9	6,83	1 201	87,858	1 410	103,147
10	6,83	1 370	100,22	1 400	102,415
11	6,83	1 260	92,174	1 400	102,415
12	6,83	1 200	87,784	1 390	101,684
13	6,83	1 301	95,173	1 420	103,878
14	6,83	1 301	95,173	1 420	103,878
15	6,83	1 250	91,442	1 420	103,878
16	6,83	1 180	86,321	1 410	103,147
17	6,83	1 230	89,979	1 400	102,415
18	6,83	1 311	95,904	1 430	104,61
19	6,83	1 250	91,442	1 390	101,684
20	6,83	1 250	91,442	1 420	103,878
21	6,83	1 240	90,711	1 420	103,878
22	6,83	1 250	91,442	1 420	103,878
23	6,83	1 130	82,664	1 390	101,684
24	6,83	1 200	87,784	1 390	101,684
25	6,83	1 240	90,711	1 420	103,878
26	6,83	1 250	91,442	1 400	102,415
27	6,83	1 240	90,711	1 400	102,415
28	6,83	1 210	88,516	1 400	102,415
29	6,83	1 260	92,174	1 400	102,415
30	6,83	1 240	90,711	1 390	101,684
31	6,83	1 220	89,247	1 420	103,878

1	2	3	4	5	6
32	6,83	1 380	100,95	1 390	101,684
33	6,83	1 220	89,247	1 400	102,415
34	6,83	1 240	90,711	1 370	100,221
35	6,83	1 230	89,979	1 410	103,147
36	6,83	1 210	88,516	1 390	101,684
37	6,83	1 210	88,516	1 410	103,147
38	6,83	1 380	100,95	1 420	103,878
39	6,83	1 350	98,757	1 420	103,878
40	6,83	1 200	87,784	1 390	101,684
41	6,83	1 250	91,442	1 390	101,684
42	6,83	1 260	92,174	1 420	103,878
43	6,83	1 289	94,295	1 410	103,147
44	6,83	1 279	93,564	1 390	101,684
45	6,83	1 250	91,442	1 410	103,147
46	6,83	1 260	92,174	1 420	103,878
47	6,83	1 200	87,784	1 420	103,878
48	6,83	1 311	95,904	1 380	100,952
49	6,83	1 250	91,442	1 410	103,147
50	6,83	1 200	87,784	1 400	102,415
51	6,83	1 290	94,368	1 390	101,684
52	6,83	1 240	90,711	1 420	103,878
53	6,83	1 250	91,442	1 420	103,878
54	6,83	1 260	92,174	1 410	103,147
55	6,83	1 300	95,1	1 390	101,684
56	6,83	1 320	96,563	1 410	103,147
57	6,83	1 300	95,1	1 420	103,878
58	6,83	1 240	90,711	1 420	103,878
59	6,83	1 230	89,979	1 380	100,952
60	6,83	1 230	89,979	1 410	103,147
61	6,83	1 279	93,564	1 410	103,147
62	6,83	1 260	92,174	1 400	102,415
63	6,83	1 250	91,442	1 420	103,878

Datele prelevate din prelucrarea rezultatelor au constituit drept bază de date în trasarea graficului ce evidențiază variația rezistenței la forfecare a celor două tipuri de sârme.

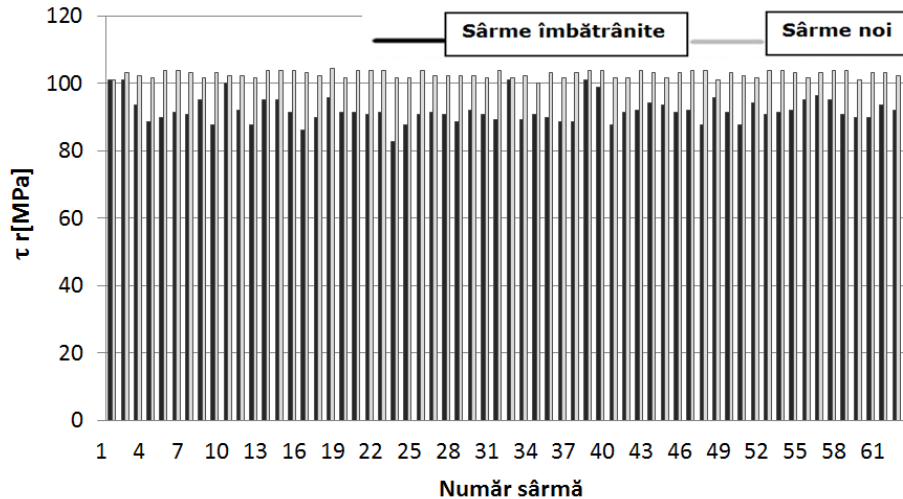


Figura 5.19. Variația rezistenței la forfecare pentru sârmele de Al

Sârmele îmbătrânite manifestă o rezistență la forfecare cu 10–15% mai scăzută decât cea a sârmelor noi, înregistrând o valoare medie $\tau_{rm} = 92 \text{ N/mm}^2$ și o forță medie la rupere de 1,2kN, față de $\tau_{rm} = 103 \text{ N/mm}^2$ și o forță medie la rupere de 1,4kN. O diferențiere între straturile componente ale conductorului, în cazul rezistenței la forfecare, nu se poate face, dar s-a constatat că s-au înregistrat valori într-o plajă mult mai largă pentru conductorul îmbătrânit, cuprinsă între 165 și 202N/mm² față de cazul conductorului nou.

5.4. Particularități ale îndoirii alternante a sârmelor de aluminiu

Încercarea la îndoire alternantă s-a făcut folosind sârme de Al din componența conductoarelor noi și din componența conductoarelor îmbătrânite, descrise în Capitolul 3. Aceasta a avut ca scop evidențierea proprietăților fizice și a modificărilor acestora, ca urmare a îmbătrânirii materialului. Totodată, s-a urmărit cum variază proprietățile celor două tipuri de sârme pe un eșantion de probe.

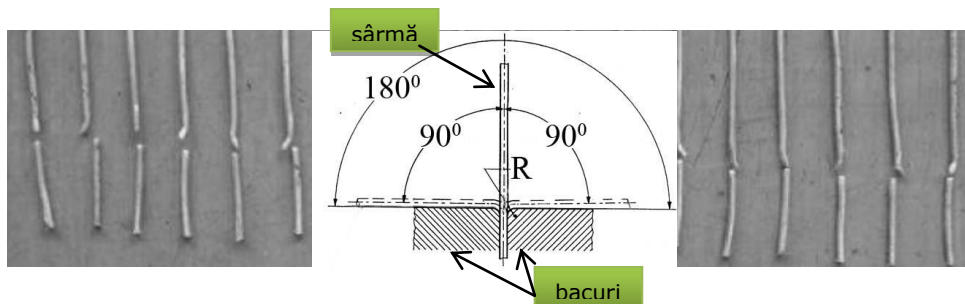


Figura 5.20. Aspectul probelor rupte și descrierea metodei de lucru

Realizarea testelor s-a făcut cu respectarea standardului SR ISO 7801:1993 care stabilește terminologia, condițiile impuse mașinii de încercat și epruvetelor, precum și condițiile pentru executarea încercării la îndoire alternantă a sârmelor cu diametre sau grosimi de 0,3 până la 10mm. S-a folosit dispozitivul manual de testare la îndoire alternantă, cu contorizarea numărului de îndoiri până la rupere, descris în Figura 5.20. În scopul determinării capacității de deformare la rece și a verificării calității sârmelor în condițiile absenței defectelor de suprafață, îndoirea alternantă a constat în îndoirea la 90° într-un plan în sensuri opuse și repetarea operațiunii până la ruperea probei. Astfel, s-a contorizat numărul de îndoiri alternante peste bacurile prevăzute cu muchie rotunjită, cu raza R, și s-au prelevat date referitoare la numărul maxim de îndoiri.

Cu datele prelevate în timpul încercărilor am realizat un tabel centralizator, cu ajutorul căruia s-a trasat graficul de variație al ruperilor sârmelor din componența celor două tipuri de conductoare.

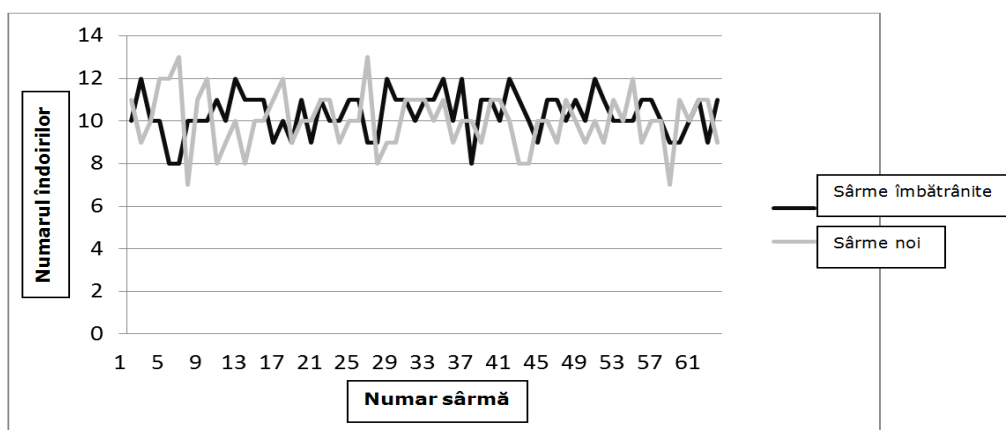


Figura 5.21. Variația numărului de îndoiri a sârmelor de Al

Rezultatele arată că pentru ambele tipuri de sârmă numărul de îndoiri este foarte asemănător. Acest tip de solicitare evidențiază o modificare favorabilă a proprietăților sârmelor îmbătrânite, observându-se o comportare mai bună la îndoire a acestora. Media de îndoiri este 10.3 pentru cele îmbătrânite și 10 pentru cele noi. Diferența mică este dată de elasticitatea diferită a materialului, de inițierea deformărilor plastice la valori mai mici ale tensiunilor și la propagarea mai facilă a microfisurilor.

5.5. Particularități privind ruperea la răsucire a sârmelor conductorului 450/75

Realizarea testelor s-a făcut cu respectarea standardului SR ISO 7800:2011 care specifică o metodă de încercare pentru determinarea capacității de deformare plastică a sârmei metalice cu diametre sau grosimi de la 0,3mm până la 10mm inclusiv, prin solicitarea de răsucire simplă, pe o singură direcție. Am folosit sârme din aluminiu atât din conductorul nou, cât și din conductorul îmbătrânit, pentru toate sârmele din cele trei înfășurări. Dispozitivul cu care s-au făcut testele este un

dispozitiv de încercat la răsucire la care axa longitudinală a sârmei a coincis cu axa elementelor de fixare a sârmelor, cu domeniul de răsucire 360°, ca în Figura 5.22.

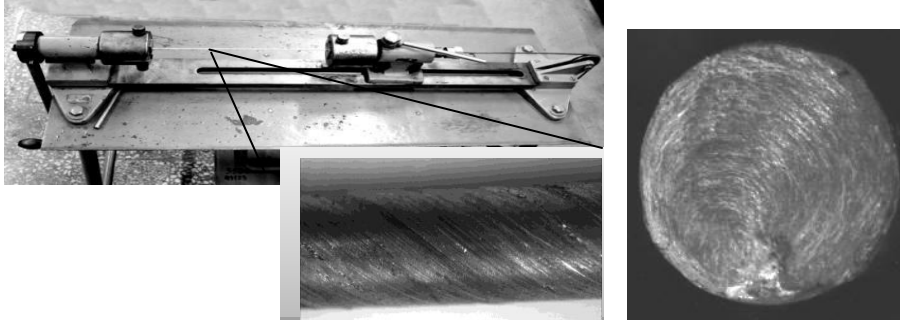


Figura 5.22. Dispozitiv de încercat la răsucire. Aspectul sârmei răsucite

Această încercare are ca scop evidențierea proprietăților fizice ale celor două tipuri de materiale și compararea acestora pentru a înțelege modul cum variază ele, datorită îmbătrânirii materialului. Cu ajutorul dispozitivului manual de testare, cu contorizarea numărului de răsuciri până la rupere, s-au făcut încercările pe un eșantion de sârme și s-a trasat graficul ce evidențiază variația rezistenței la răsucire pentru cele două tipuri de material.

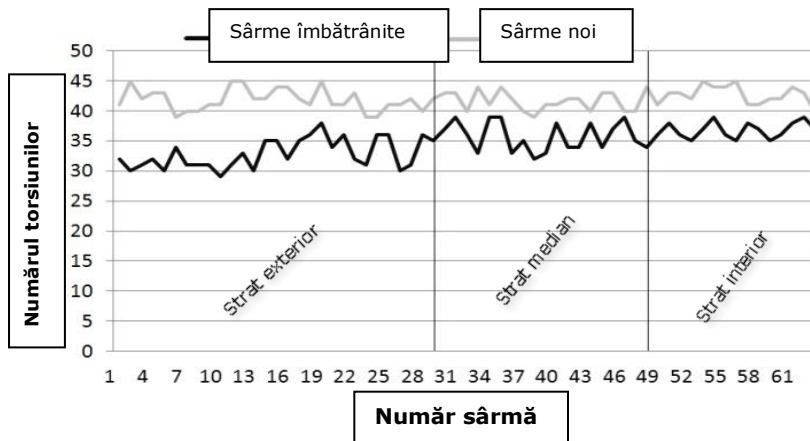


Figura 5.23. Variația specifică la răsucire a sârmelor de Al

Indiferent de stratul din care fac parte sârmele, în cazul rezistenței la torsiune poate fi observată o diferență substanțială între rezultate. Sârmele îmbătrânite au rezistența la torsiune mai mică decât cele noi, așa cum se arată în Figura 5.23. Rezistența la torsiune în cazul celor îmbătrânite cunoaște o creștere treptată cu avansarea spre straturile interioare, însă este mai scăzută cu 17% decât a celor noi.

5.6. Influența amprentelor și a îmbătrânirii asupra caracteristicilor mecanice ale sârmelor de aluminiu

În cazul sârmelor de aluminiu nu se pot executa epruvete cu capete proeminente, așa cum se întâmplă în celelalte cazuri. Din acest motiv, încercarea la tracțiune a sârmelor s-a efectuat pe probe prelevate din conductor, conform STAS SR EN ISO 6892-1/2010. Acesta face referire la sârme cu secțiunea rotundă, patrată sau hexagonală cu dimensiunea nominală de până la 10mm și la sârme cu secțiunea dreptunghiulară, trapezoidală, semicirculară etc. cu grosimea de până la 3mm și raportul laturilor, sub 4. Cu ajutorul încercării la tracțiune se determină o serie de caracteristici mecanice care permit o apreciere asupra comportării materialului în solicitările la care va fi supus în timpul utilizării sale.

Încercările experimentale pentru determinarea caracteristicilor mecanice ale sârmelor au fost făcute pe mașina de încercat la tracțiune Zwick/Roell de 5KN, pe probe descrise în Capitolul 3, particularizate după cum urmează:

- sârme de Al din componența unui conductor nou;
- sârme de Al din conductorul nou, amprentate la 30°, 60° și 90°;
- sârme de Al din componența unui conductor îmbătrânit 42 de ani;
- sârme de Al din conductorul îmbătrânit 42 de ani, amprentate la 30°, 60°, 90°.

Lungimea totală a epruvetei s-a stabilit a fi de $L_0=150\text{mm}$, cu excepția cazului în care interesul a fost îndreptat către secțiunea la rupere, caz în care s-au folosit epruvete scurte, cu $L_0=100\text{mm}$.

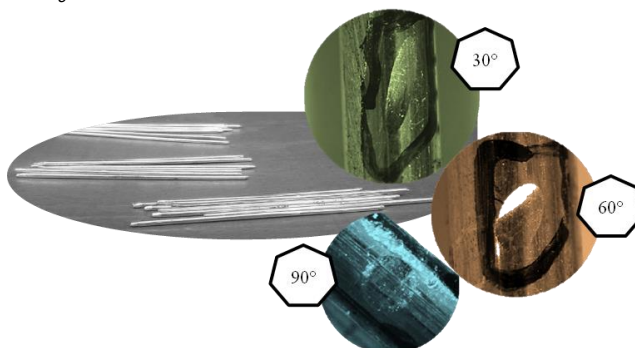
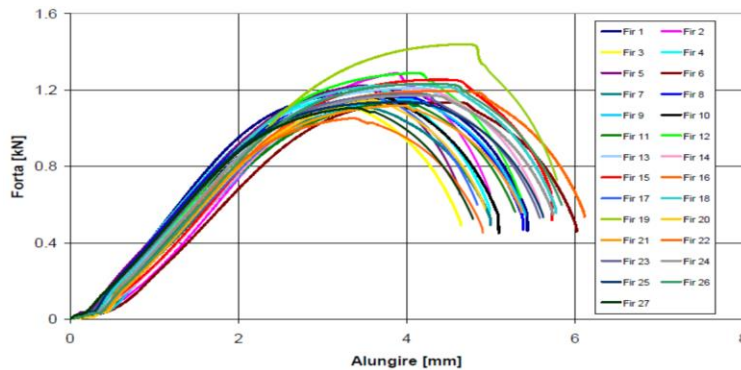


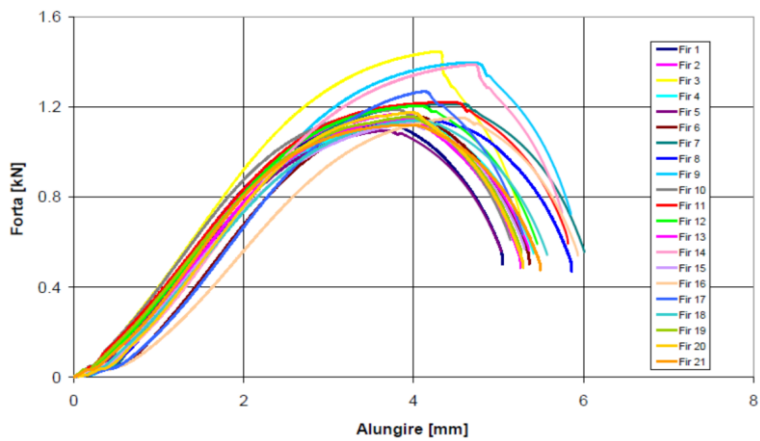
Figura 5.24. Aspectul sârmelor de Al pregătite pentru încercarea la tracțiune

Caracteristicile mecanice ale sârmelor încercate au fost determinate pentru fiecare epruvetă astfel: secțiunea inițială, lungimea inițială între repere, funcția limită de curgere, forța de rupere, limita de curgere, rezistența de rupere, lungimea la rupere între repere, lungimea specifică la rupere, diametrul și dimensiunile secțiunii de rupere, suprafața specifică la rupere, gătuirea la rupere etc.

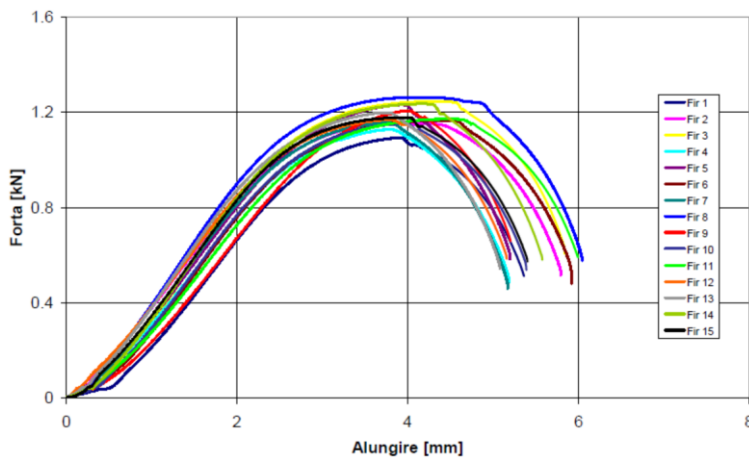
În figurile de mai jos (5.25 a, b și c) se prezintă curbele caracteristice pentru fiecare sârmă de aluminiu din componența conductorului îmbătrânit, care nu prezintă amprente vizibile de contact, clasificate pe straturi.



a) - strat exterior



b) - strat median



c) - strat interior

Figura 5.25. Diagramele caracteristice pentru sârme de Al îmbătrânite

În figurile de mai jos (5.26 a, b și c) se prezintă curbele caracteristice pentru fiecare sârmă de aluminiu din componența conductorului nou, care nu prezintă macrodefecte tehnologice, clasificate pe straturi.

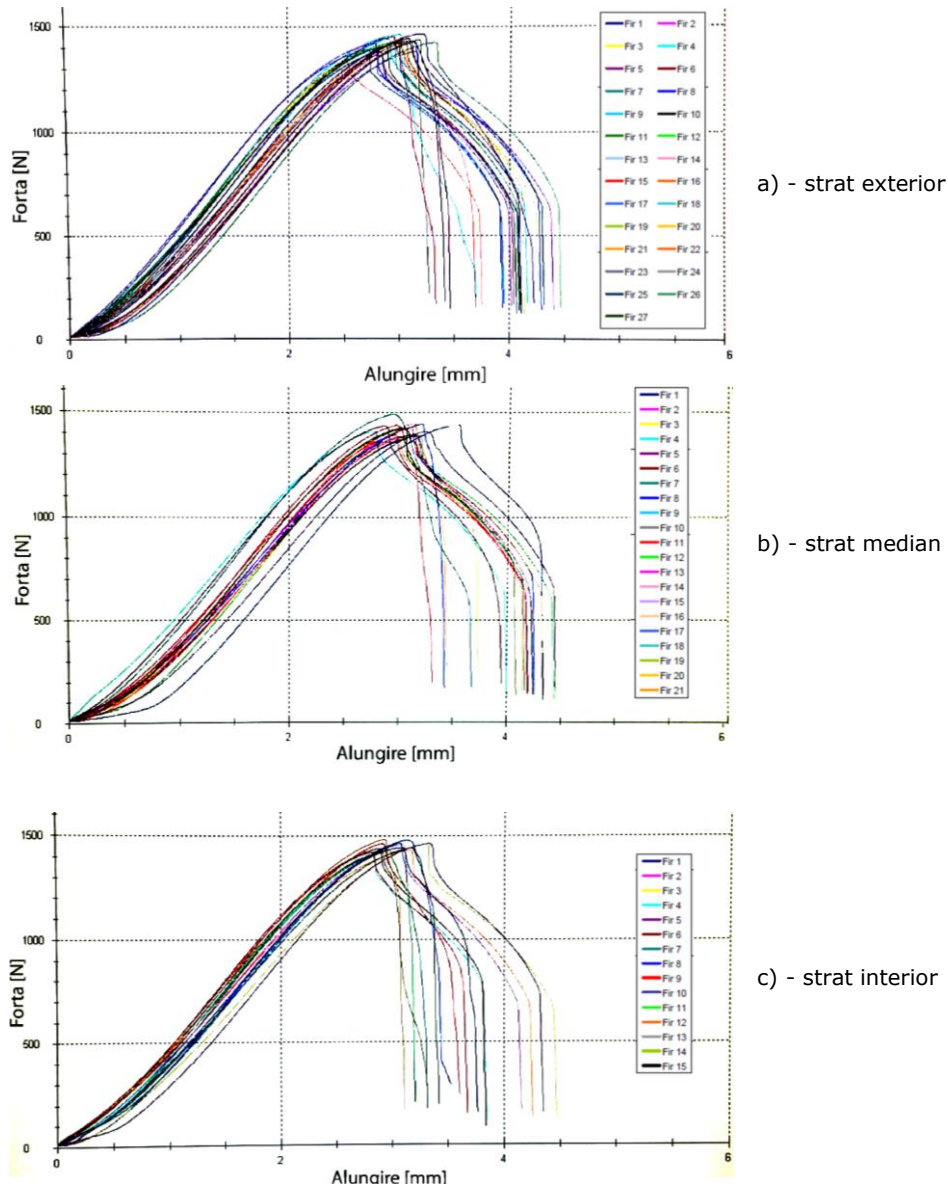


Figura 5.26. Diagramele caracteristice pentru sârme de Al noi

Se observă că, în cele două cazuri ale conductoarelor, sârmele prezintă valori medii diferite ale forțelor la care se produce ruperea și că aluminiul are un comportament diferit pentru valori similare ale presiunilor. Pentru o comparație directă a curbelor caracteristice a celor două tipuri de sârme, în Figura 5.27 se prezintă diagramele presiune-deformație, ca medie a celor prezentate anterior.

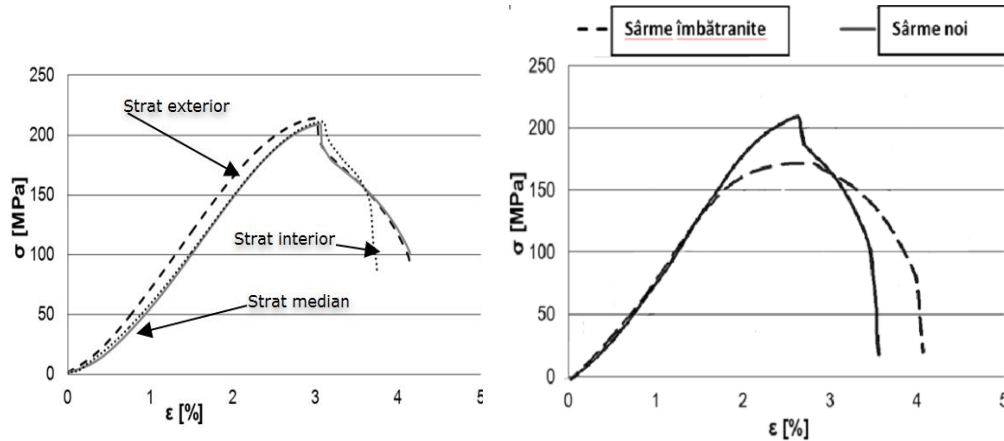


Figura 5.27. Curbele caracteristice definiției ale sârmelor de Al:
a) conductor nou; b) conductor nou și îmbătrânit

În conformitate cu rezultatele prezentate în Tabelele 5.4, 5.5 și cu Figurile 5.25, 5.26, variația rezistenței la rupere pentru același tip de sârmă este dată de diferențele microstructurale ale materialului. În cazul sârmelor îmbătrânite rezistența la rupere scade cu 20% față de sârmele noi, în condițiile în care ruperea apare la o lungime ultimă mai mare cu doar 1% și cu un diametru ultim mai mic cu 14%. Se poate observa că, odată cu creșterea tensiunii, se obține o creștere semnificativă a diferențelor între cele două curbe. Proprietățile mecanice ale sârmelor îmbătrânite sunt influențate trecerea timpului în exploatare care, are un rol semnificativ în comportamentul conductoarelor metalice.

Trasarea curbelor caracteristice ale materialelor, cu identificarea punctelor importante, exprimă legătura între tensiunea σ și deformația specifică ε . Valorile de intrare ale încercărilor la tracțiune și calculul caracteristicilor mecanice sunt prezentate în tabelele de mai jos.

Tabel 5.4. Valorile caracteristicilor dimensionale obținute la temperatura de 20°C

Tip sarmă	F_{\max} [N]	d_0 [mm]	L_0 [mm]	S_0 [mm ²]	d_u [mm]	L_u [mm]	S_u [mm ²]
Nou	1430	2,95	150	6,835	1,5	153,15	1.767
Îmbătrânit	1170	2,95	150	6,835	1,1	154,15	0.950

Pe porțiunea liniară a curbei, în care este valabilă legea lui Hooke, starea de tensiune și starea de deformare sunt omogene și formează porțiunea elastic-liniară a materialului. Aspectul acesteia este prezentat în Figura 5.30. De aici s-a determinat ecuația care definește raportul dintre tensiune și deformație pe porțiunea liniară.

$$\sigma = 86.864 \cdot \varepsilon - 11,581 \quad (5.9)$$

Tabel 5.5. Valorile caracteristicilor mecanice obținute la temperatura de 20°C

Tip sarmă	Caracteristica	Valoare
Nou	ΔL [mm]	3,15
Îmbătrânit		4,15
Nou	ψ [%]	74,15
Îmbătrânit		86,10
Nou	σ_{\max} [N/mm ²]	209,22
Îmbătrânit		171,18
Nou	σ_c [N/mm ²]	190,20
Îmbătrânit		160,94
Nou	σ_e [N/mm ²]	153,62
Îmbătrânit		138,99
Nou	σ_A [N/mm ²]	150
Îmbătrânit		130
Nou	σ_B [N/mm ²]	168
Îmbătrânit		150
Nou	A_t [%]	2,10
Îmbătrânit		2,77
Nou	ϵ [%]	2,10
Îmbătrânit		2,77
Nou	E [N/mm ²]	69 090,9
Îmbătrânit		61 872,1
Nou	R_m [N/mm ²]	209,22
Îmbătrânit		171,18
Nou	$R_{p0.5}$ [N/mm ²]	192
Îmbătrânit		163
Nou	ν [-]	0,33
Îmbătrânit		
Nou	G [N/mm ²]	45 945,45
Îmbătrânit		41 144,97
Nou	Z [%]	74,15
Îmbătrânit		86,10
Nou	F_u [N]	110
Îmbătrânit		



Figura 5.28. Aspectul sârmei de Al rupte prin tracțiune

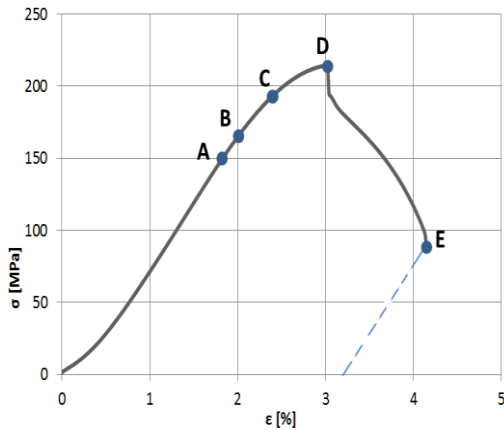


Figura 5.29. Punctele importante ale curbei caracteristice – Al nou

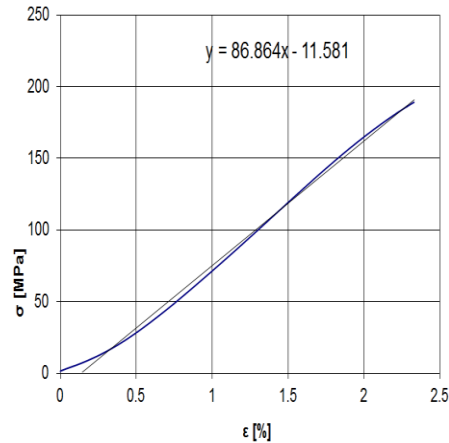


Figura 5.30. Porțiunea elastic-liniară – Al nou

Materialul prezintă un comportament ductil cu deformații elastice, până la atingerea limitei de elasticitate (punctul B) și deformații remanente (plastice) odată cu depășirea acesteia. Începutul zonei de deformații plastice pronunțate aduce diferențe mari în ceea ce privește curgerea celor două tipuri de materiale. Lipsa unui palier de curgere în zona deformațiilor plastice arată existența forțelor elastice și după punctul B, diferențierea celor două zone nefiind foarte clară. Totodată, în cazul sârmelor îmbătrânite, tendința de formarea a unui palier este mult mai pronunțată și deformațiile sunt mai mari.

Zona de ecruisare, aflată înaintea punctului D, este determinată de creșterea deformațiilor plastice din zona de curgere. Aici graficul are o tendință de creștere pe direcția forței în raport cu creșterea lungimii, până la valoarea maximă a forței. După această valoare a forței, într-o anumită porțiune a sârmei apare gătuirea, care face ca deformațiile să crească chiar dacă valoarea forței scade. Punctul E este reprezentat de sarcina ultimă F_u , la care se realizează ruperea și care are valori similare pentru ambele tipuri de sârme.

Un alt tip de teste folosind sârme de Al a fost efectuat folosind sârme cu amprente. Astfel, un set de sârme amprentate în prealabil a fost supus la încercarea la tracțiune în vederea trasării curbelor caracteristice. Acestea furnizează informații cu privire la comportarea sârmelor care au deformații plastice mari ca urmare a contactelor din conductor. Ariile amprentelor existente pe suprafețele sârmelor și forțele de amprentare sunt:

a	-	0.241mm ²	-	100N
b	-	0.535mm ²	-	200N
c	-	0.836mm ²	-	300N
d	-	1.153mm ²	-	400N
e	-	1.459mm ²	-	500N
f	-	3.03mm ²	-	1 000N

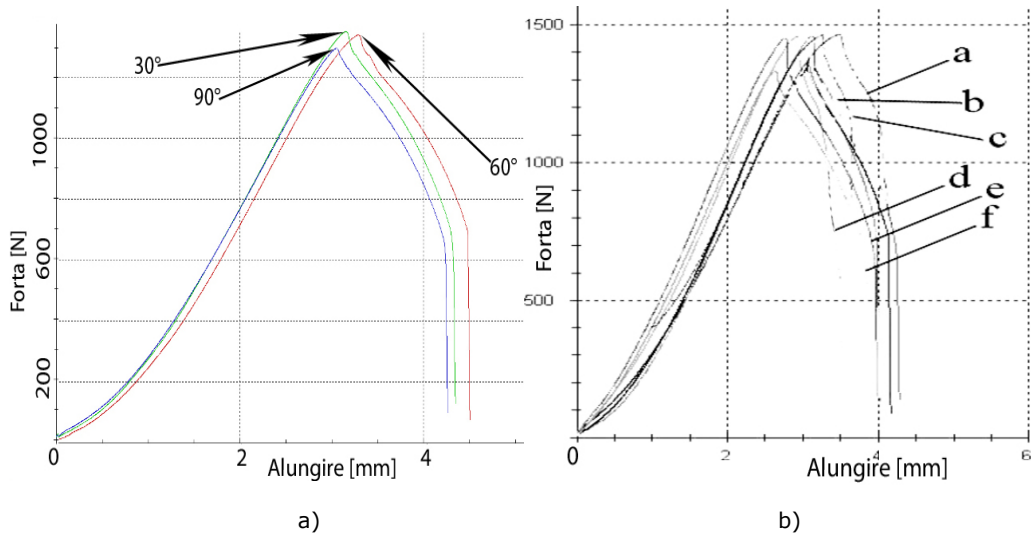


Figura 5.31. Diagrama caracteristică la tracțiune pentru sârme de Al amprentate:
 a) Forțe constante (1kN) și unghiuri diferite de amprentare
 b) Forțe diferite și unghiuri constante de amprentare

În cazul amprentelor create la aceeași forță de apăsare, dar cu unghiuri diferite, dimensiunea amprentei variază foarte mult și influențează rezistența la rupere la tracțiune. Se înregistrează valori mai scăzute ale forței maxime la rupere în cazul unghiurilor mari, pentru valori ale forței de amprentare care depășesc o anumită valoare. Aceasta valoare este influențată de defectele structurale care influențează rezistența la rupere într-o mai mare măsură decât amprentele. Deformațiile locale sunt mai profunde în cazul unghiurilor de amprentare de 90° iar rezistența la tracțiune este mai mică decât în cazul unghiurilor de amprentare de 30° și 60°.

Un alt aspect foarte important este legat de secțiunea în care se produce ruperea și de forma pe care o are aceasta. Existența amprentelor, de orice tip, face ca ruperea la tracțiune să se dezvolte dintr-o secțiune în care există amprenta, ca în Figura 5.32. Aceasta nu se confirmă în cazul forțelor mici de amprentare datorită neomogenităților structurale.

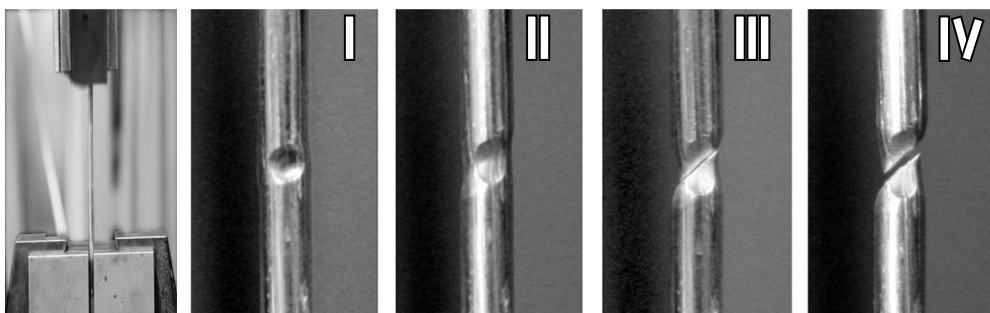


Figura 5.32. Inițierea ruperii la tracțiune în cazul sârmelor de Al amprentate

În Figura 5.32 este surprinsă evoluția și dezvoltarea fisurii la rupere în cazul unei sârme supuse la încercarea la tracțiune, unde gatuirea la rupere se produce în concentratorul de tensiune, creat de amprenta superficială. Stadiul I corespunde unor sarcini mici aplicate asupra probei la care deformațiile elastice nu sunt vizibile. La creșterea sarcinilor de tracțiune, stadiul II, deformațiile plastice încep să crească și se dezvoltă preponderent în zona amprentei. Stadiul III este specific dezvoltării fisurii de rupere din microfisurile existente la frontiera amprentei, așa cum se arată în Figura 5.18. Spre deosebire de ruperea probelor neamprentate, unde planul de dezvoltare al fisurii este normal la axă, în cazul celor cu amprentă fisura se dezvoltă într-un plan înclinat la 45° față de axa probei. Aceasta fisură străbate zona amprentată, unind microfisurile marginale, și secționează zona gâtuită. Stadiul IV definește ruperea finală care se caracterizează prin diametru ultim mai mare și lungimea ultimă mai mică decât la probele neamprentate.

5.7. Încercarea la tracțiune a conductorului 450/75

În practică sunt întâlnite stări de tensiune extrem de variate, iar determinările mecanice pentru fiecare caz sunt imposibile. Cu ajutorul stării de tensiune monoaxiale, cea mai simplă de realizat experimental, și a unor criterii de echivalare se pot furniza informații cu privire la comportarea conductorului la diverse tipuri de solicitări, așa cum este cunoscut din teoria stărilor de tensiune limită.

Încercările de laborator au fost făcute pe mașina de tracțiune orizontală a conductoarelor, MOT 2500kN, prevăzută cu sistem de achiziție și prelucrare a datelor și traductor de forță K11 ESA Meßtechnik GmbH cu clasă de precizie 0,2 % Figura 5.33. Probele au constat în tronsoane de conductor nou, nefolosit în transportul de energie electrică.



Figura 5.33. Imagine de ansamblu a mașinii de încercări MOT 2500 kN/13m

Date inițiale ale conductorului:

- | | |
|---------------------------------|---------------------------|
| - Tip conductor: | 450/75 |
| - Construcție conform normelor: | ST144:2009 |
| - Aria secțiunii transversale : | 506,13 [mm ²] |
| - Numărul sârmelor de oțel: | 19 |
| - Numărul sârmelor de aluminiu: | 63 |

- Aria secțiunii transversale aluminiu/oțel: 445,32/75,55 [mm²]
- Forța nominală de rupere (RTS): 164090 [N]
- Tensiunea corespunzătoare RTS: 315,03 [N/mm²]
- Modul de elasticitate final: 82000 [N/mm²]
- Lungimea inițială a probei: 10000 [mm]
- Temperatura: 20 [°C]

Rezultatele obținute experimental sunt pentru 30, 50, 70 și 85% din FRN și pentru ruperea finală, iar valorile lor sunt prezentate în tabelele de mai jos.

Tabel 5.6. Rezultatele obținute pentru 30% FRN =49.227N

t [min]	5	10	15	30
σ [N/mm²]	94,51			
ε [%]	0,557	0,586	0,582	0,596

Tabel 5.7. Rezultatele obținute pentru 50% FRN = 82.045N

t [min]	5	10	15	30	45	60
σ [N/mm²]	157,51					
ε [%]	0,1537	0,1544	0,1545	0,16	0,1594	0,1613

Tabel 5.8. Rezultatele obținute pentru 70% FRN =11.4863N

t [min]	5	10	15	30	45	60
σ [N/mm²]	220,52					
ε [%]	0,2575	0,2593	0,2658	0,2681	0,2713	0,2728

Tabel 5.9. Rezultatele obținute pentru 85% FRN =139.476,5N

t [min]	5	10	15	30	45	60
σ [N/mm²]	267,776					
ε [%]	0,3599	0,3681	0,3726	0,3795	0,3808	0,3872

Tabel 5.10. Rezultatele obținute la ruperea finală a conductorului

Fmax [N]	158.950
σ [N/mm²]	305,162
ε [%]	1,285

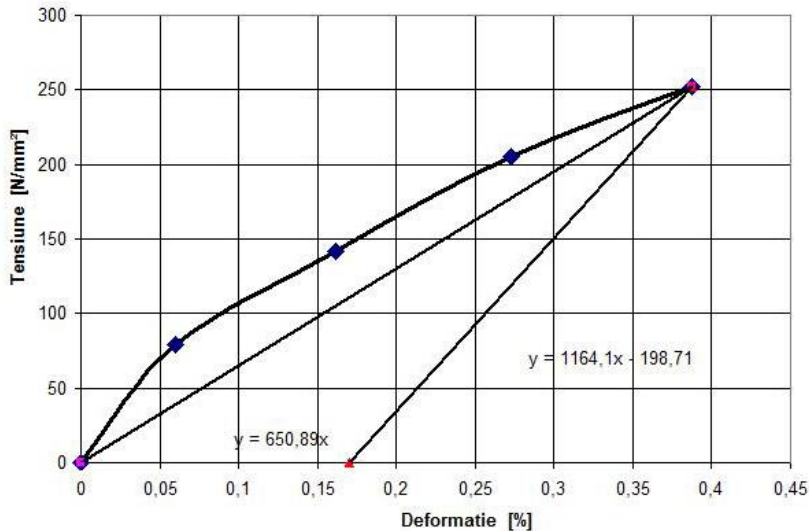


Figura 5.34. Graficul tensiune-deformație pentru un conductor 450/75 încercat la tracțiune.

Date finale ale conductorului:

- Forța efectivă de rupere	158.950 [N]
- Tensiunea efectivă de rupere	308 [N/mm ²]
- Alungirea la rupere	128,5 [mm]
- Deformația la rupere:	1,285 [%]
- Modul de Elasticitate inițial	65.089 [N/mm ²]
- Modul de Elasticitate final	116.410 [N/mm ²]
- Distanța de la prindere la rupere	2.500 [mm]
- Alungirea la rupere	1,59 [%]

Figura 5.34 reprezintă curba tensiune-deformație (σ - ϵ), cu evidențierea punctelor corespunzătoare citirii după 30 minute la încărcarea cu 30% din FRN, respectiv 60 de minute la încărcările cu 50, 70 și 85 % din FRN. După verificarea elementelor dimensionale și a caracteristicilor mecanice ale conductorului 450/75, construcție ST 144:2009, s-a stabilit că acesta satisface prescripțiile impuse în normativ.

5.8. Observații și concluzii

La nivel structural contactele dintre sârme aduc modificări de formă și dimensiuni ale interstițiilor cristaline și dezvoltă eforturi continue în masa sârmelor, care duc la recristalizare.

Excentricitatea elipsei depinde numai de înclinarea dintre cele două axe ale sârmelor în contact și tinde să devină cerc, atunci când unghiul este 90° și dreptunghi, când unghiul este 180°.

În zonele învecinate contactului poate apărea și o solicitare de încovoiere, din cauza neparalelismului celor două suprafețe frontale, a neomogenității materialului sau a aplicării excentrice a sarcinii.

Intensitatea deformațiilor specifice este dependentă de adâncimea de penetrare, însă proporția variază odată cu creșterea suprafeței amprentate.

Ecuatiile polinomiale dezvoltate din diagramele de variație a amprentelor ajută la determinarea presiunii de contact atunci când se cunoaște aria suprafeței deformată, sau la estimarea efectelor create de presinile de contact proiectate.

Formarea fisurilor microstructurale din zonele perimetrare marchează stadiul I ce caracterizează faza de incipiență a degradării prin oboseală.

Starea fizică a suprafeței sârmelor participă, alături de microtopografie, la creșterea duratei de viață, iar caracteristicile acestora diferă datorită proceselor fizico-mecanice pe care le suportă. Există o tendință de creștere a durității odată cu creșterea forței de amprentare.

Rezistența și duritatea sârmelor de aluminiu scad în raport cu trecerea timpului în exploatare și deci, pentru același tip și intensitate a solicitărilor, efectele produse sunt amplificate.

Sârmele îmbătrânite manifestă o rezistență la forfecare cu 10-15% mai scăzută decât cea a sârmelor noi.

Încercarea la îndoire alternantă evidențiază o modificare favorabilă a proprietăților sârmelor îmbătrânite, observându-se o comportare mai bună la îndoire a acestora. Media de indoiri este 10.3 pentru cele îmbătrânite și 10 pentru cele noi.

Rezistența la torsiune în cazul celor îmbătrânite cunoaște o creștere treptată cu avansarea spre straturile interioare, însă este mai scăzută cu 17% decât a celor noi.

În cazul sârmelor îmbătrânite rezistența la rupere scade cu 20% în condițiile în care ruperea apare la o lungire ultimă mai mare cu aproape 1% și cu un diametru ultim mai mic cu 14% decât în cazul sârmelor noi.

Începutul zonei de deformații plastice pronunțate aduce diferențe mari în ceea ce privește curgerea celor două tipuri de material. În cazul sârmelor îmbătrânite, tendința de formarea a unui palier este mult mai pronunțată și deformațiile sunt mai mari.

Deformațiilor locale sunt mai profunde în cazul unghiurilor de amprentare de 90°, iar rezistența la tracțiune este mai mică decât în cazul unghiurilor de amprentare de 30° și 60°.

Existența amprentelor, de orice tip, face ca ruperea la tracțiune să se dezvolte preponderent dintr-o secțiune în care aceasta există, iar fisura se dezvoltă într-un plan înclinat la 45° față de axa probei.

6. CERCETĂRI PRIVIND REZISTENȚA LA OBOSEALĂ A SÂRMELOR ȘI A CONDUCTORULUI 450/75

6.1. Modelarea cu elemente finite a ansamblului conductor-clemă

Acest capitol vine în completarea și continuarea rezultatelor experimentale obținute la solicitări statice, prin construirea unui model tridimensional elasto-plastic cu elemente finite și prin construirea condițiilor de testare similare exploatării unui conductor. Asupra sârmelor și a ansamblului corpurilor componente se aplică o serie de solicitări variabile pentru a vedea cum variază rezistența la oboseală.

Scopul principal în această etapă este de a dezvolta o metodologie de modelare numerică de înaltă fidelitate pentru o analiză precisă a tensiunilor și deformațiilor care apar în conductoarele electrice din cadrul LEA. Existența datelor acestui model nou creat și a rezultatelor sale permite dezvoltarea unor condiții de testare imposibil de creat în laborator, în scopul obținerii de rezultate elocvente.

Modelul creat încearcă să ia în considerare toate efectele mecanice posibile, cum ar fi contactul, alungirea, torsiunea, frecarea și încovoierea pentru a descrie comportamentul mecanic detaliat al fiecărui component din conductor. Totodată, o serie de elemente cu factor decizional în rezultatele obținute a fost aleasă pentru o funcționare optimă. De exemplu, o rețea foarte fină de puncte este necesară în regiunile de contact cuprinzătoare ale tuturor sârmelor, pentru a obține gradienti ai tensiunilor și soluții convergente. Alte astfel de componente ale procesului de simulare au mai fost: construirea unui model complet și fidel, dar adecvat posibilităților de calcul, găsirea de metode de aplicare a tensiunilor, corelarea datelor obținute experimental cu cele ale modelului numeric, alegerea tipurilor de elemente pentru zonele cu și fără contact, găsirea de tehnici (sau combinații) de soluționare numerică pentru acest tip de problemă.

Aspectele prezentate anterior sunt cercetate și prezentate în cadrul capitolului, urmate de o comparație a rezultatelor numerice ale acestui model cu cele obținute experimental sau prin soluții analitice aproximative. Pentru a îmbogăți efortul de cercetare în rezolvarea problemelor de oboseală, care sunt decisive pentru proiectarea și durata de viață a conductoarelor, acest studiu contribuie la înțelegerea contactului complex și a mecanicii ansamblului conductor-clemă, în vederea dezvoltării unei abordări numerice pentru studierea ruperilor cauzate de obosela conductoarelor.

6.1.1. Definirea modelului geometric

În această etapă s-a definit modelul problemei fizice pe cale grafică. Având în vedere ansamblul foarte complex care face obiectul acestei simulări, modelarea 3D s-a realizat folosind programul SOLIDWORKS urmărindu-se realizarea unui model cât mai fidel. Modelul elaborat în acest studiu a fost împărțit în două

subansambluri, clema de susținere și conductorul, care au fost importate în programul de simulare și analiză numerică a stării de tensiune și deformație ANSYS.

Clema de susținere (denumită în continuare clemă) a fost modelată cu respectarea caracteristicilor dimensionale și de material impuse de tipul de clemă CSA5, clemă de susținere oscilantă din fontă tip SOL. Acesta este compusă din 8 piese distincte, între care se regăsesc: corpul clemei, piesa de strângere, șaibe, piulițe și șuruburi.

Conductorul a fost modelat cu respectarea caracteristicilor dimensionale și de material specifice tipului de conductor 450/75, detaliate în Capitolul 3. Acesta are o lungime de 1000mm și conține în total 82 de sârme componente, dintre care 63 de Al și 19 de oțel, dispuse în 5 straturi de înfășurare, și o sârmă centrală. Înfășurarea straturilor s-a făcut folosind pașii p de înfășurare corespunzători diametrului de înfășurare d ($p/d=$): 100/4,4mm, 200/8,8mm, 280/13,85mm, 354/19,58mm, 390.5/25,34mm. Structura astfel construită crează un model în care se întâlnesc 1 746 de contacte.

Evidențierea subansamblurilor cu părțile lor componente se face în Figura 6.1.

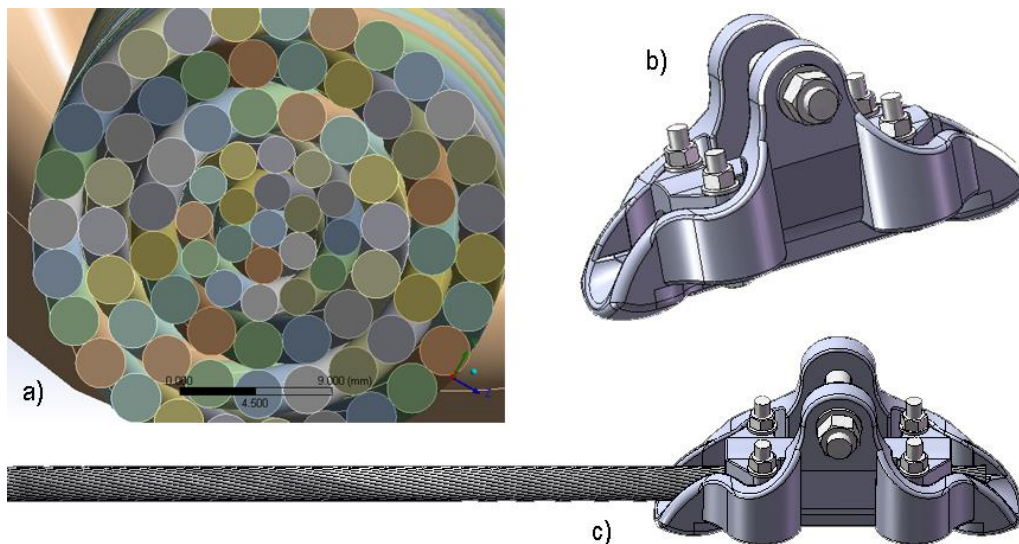


Figura 6.1. Modelul geometric al ansamblului
a) conductor; b) clemă; c) ansamblul conductor-clemă

Definirea materialelor s-a făcut conform caracteristicilor din Tabelul 6.1, iar comportamentul plastic al materialelor a fost calculat în mod automat în ANSYS.

Tabel 6.1. Proprietățile materialelor componente

Tip element	Material	Structură	ρ [kg/m ³]	E [N/mm ²]	G [N/mm ²]	ν	t [°]
Sârme	Al	Omogenă și izotropă	2 770	69 090	45 945	0,33	22
	Oțel		7 850	2×10^5	76 923	0,3	
Clemă	Fontă		7 200	$1,110^5$	42 969	0,28	

6.1.2. Discretizarea modelului de calcul

Analiza numerică a stării de tensiune și deformație a fost făcută cu ajutorul modului "Static Structural" al programului de simulare ANSYS, pe modele numerice fidele importate din SOLIDWORKS. Trecerea de la structura continuă la modelul discret s-a făcut printr-o discretizare diferențiată. Discretizarea modelului pentru cele două ansambluri este definită diferențiat din dorința de a optimiza și datorită constângerilor date de limitările puterii de calcul și de datele colectate din studiul dezvoltat în capitolul anterior.

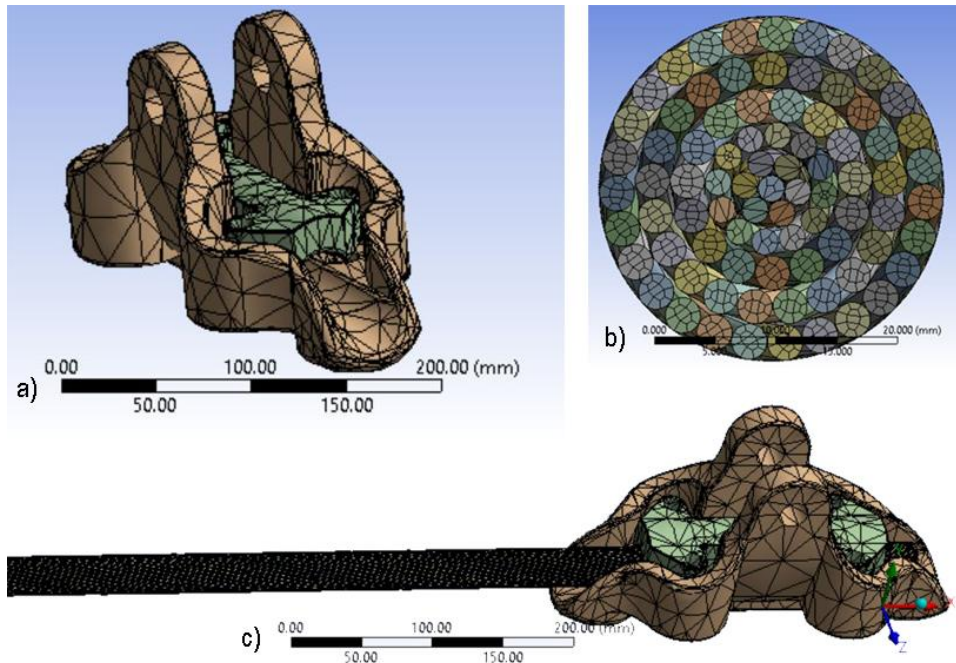


Figura 6.2. Discretizarea cu elemente finite a modelului de calcul conductor-clemă a) clemă; b) conductor; c) ansamblul conductor-clemă.

Tabel 6.2. Schema de discretizare pentru modelul conductor-clemă

Nr. total elemente	39 081
Nr. total de noduri	140 122
Nr. total de contacte	1.746
Lungime conductor	1.000 mm
Tip fizic de discretizare	„Mechanical”
Tip dimensional	„Coarse”
Nr. reîncercări	4
Lungimea minimă muchie	$1,5018 \times 10^{-3}$ mm
Raportul tranziției	0,272
Numărul maxim de straturi	5

În Figura 6.2 se prezintă aspectul modelului, cu detalierea elementelor finite și evidențierea aspectului nodurilor. Detalii suplimentare despre schema de discretizare sunt prezentate în Tabelul 6.2.

Toate sârmele de Al din straturile ce compun conductorul sunt modelate folosind elemente hexaedrice cu 8 noduri/element, în timp ce sârmele de oțel sunt modelate folosind elemente hexaedrice cu integrare redusă de 6 noduri/elemente. Clema a fost simplificată prin eliminarea elementelor care nu intră în contact direct cu conductorul și a fost discretizată folosind variația nivelurilor tip „SmartSize” cu elemente tetraedrice ce au 4 noduri/element.

6.1.3. Încărcări aplicate modelului de calcul

Modelul de calcul supus simulării este unul foarte complex, motiv pentru care definirea condițiilor de analiză a trebuit să țină cont de restricțiile impuse de puterea de calcul. Din acest motiv au fost efectuate numeroase modele de calcul pentru a obține un set de factori optimali în zonele care prezintă maxim interes pentru studiul de față. Având în vedere neliniaritățile materiale și geometrice din zona de interes s-a urmărit evidențierea deformațiilor, tensiunilor și efectului creat de contactul conductor-clemă.

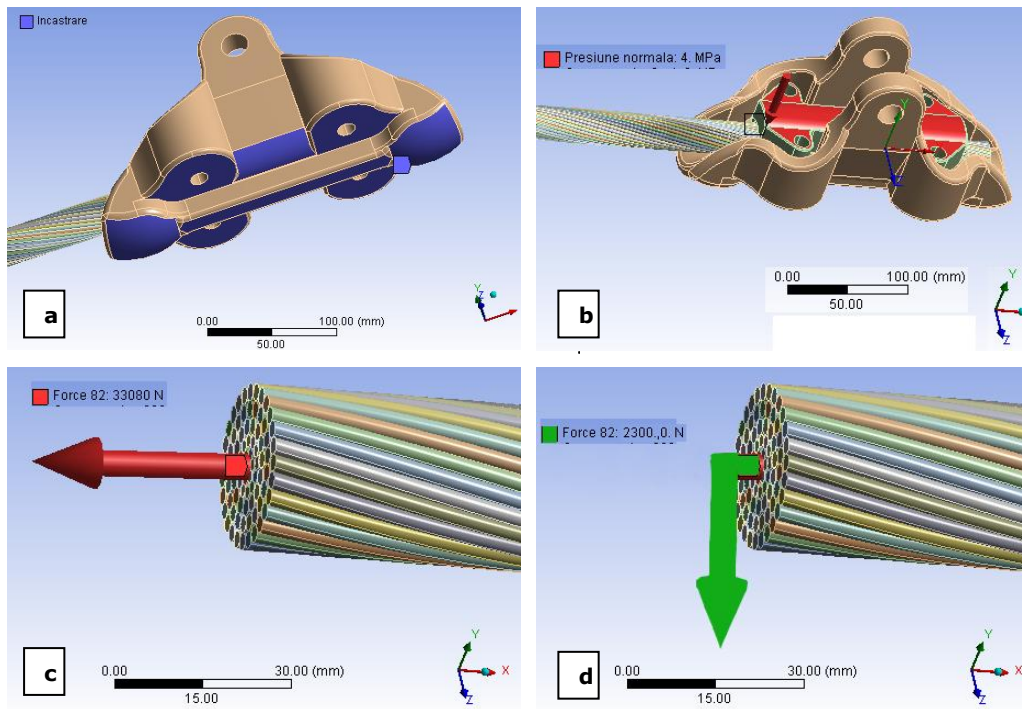


Figura 6.3. Condiții de analiză aplicate modelului de calcul conductor-clemă
 a) încăstrare; b) presiune normală; c) încărcare inițială; d) greutatea conductorului

Interacțiunile de contact dintre sârme sunt de tip contact deformabil de suprafață fără frecare, din dorința de a simula un conductor gresat, iar pentru fiecare regiune de contact sunt create numeroase perechi de contacte. Pentru a simula condițiile similare celor din realitate a fost nevoie de încăstrarea clemei, iar pentru fixarea conductorului s-a folosit o presiune normală aplicată piesei de strângere. Conform literaturii de specialitate, această presiune este determinată de tipul conductorului și de deschiderile rețelei, în cazul de față aceasta fiind de 4 MPa. O forță axială a fost aplicată pe capătul liber al conductorului, cu o valoare de 20% din forța de rupere nominală pentru a simula încărcarea inițială a conductorului. Valoarea acesteia a fost de 33 kN și a fost distribuită fiecărei sârme din conductor. Păstrând aceleași puncte de aplicație, o nouă forță s-a aplicat sârmelor pe o direcție normală încărcării inițiale, cu o valoare de 2.3 kN. Aceasta este dată de greutatea conductorului și a fost calculată pentru o deschidere de 258m (conform Capitolului 3.4).

Simularea de oboseală a conductorului a impus aplicarea unor noi forțe în aceleși puncte de aplicație dar după o direcție normală planului descris de cele două menționate anterior. Valoarea acesteia este de 9kN și este calculată pentru o valoare a vitezei vântului de 27m/s, valoare mai rar întâlnită în realitate, dar cu efecte majore asupra vibrațiilor conductorului (conform capitolului 3.3). Simularea a considerat un mediu ambient al ansamblului la temperatură de 22°C, fără exces de umiditate sau factori externi de natură să influențeze starea suprafețelor.

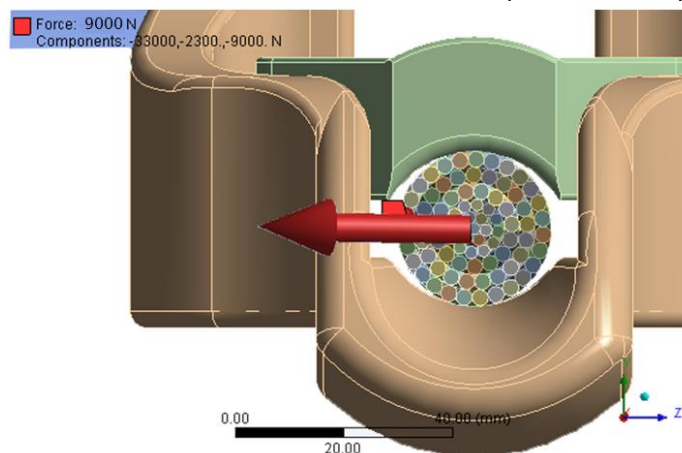


Figura 6.4. Condiții de analiză aplicate modelului de calcul conductor-clemă pentru simularea vibrațiilor eoliene

Această forță este folosită pentru simularea vibrațiilor aeriene ca urmare curgerii aerului și reprezintă consecințele directe ale turbulențelor produse de vântul care suflă asupra conductorului. Curgerea induce vibrații de înaltă frecvență, datorită creării de vârtejuri în avalul conductorului și provoacă încovoieri alternate.

Graficele încărcărilor statice descrise anterior, care au fost aplicate elementelor componente ansamblului, au forma unor funcții cu creștere liniară pe unitatea de timp determinate de cicluri de încărcare (Figura 6.5).

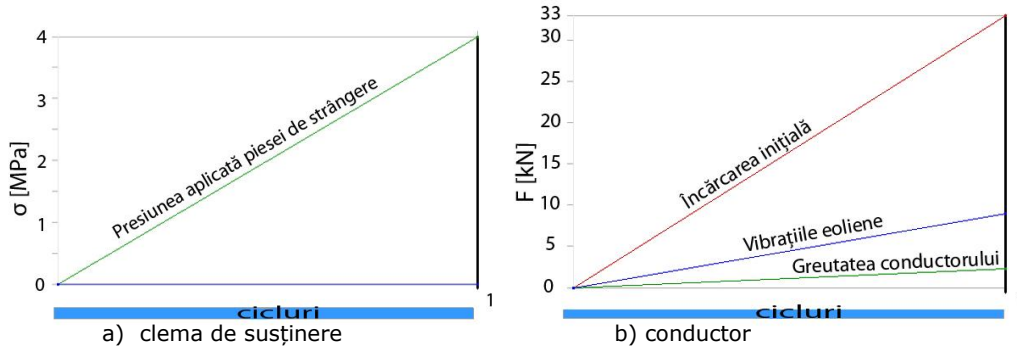


Figura 6.5. Graficele de variație ale încărcărilor statice în modelul de calcul

Graficul corespunzător simulării de oboseală a conductorului definește tipul de solicitări variabile ca fiind compus din cicluri alternante simetrice cu amplitudine constantă (Figura 6.6). S-au aplicat variații ale tensiunii într-un interval determinat de valoarea minimă -9kN și maximă 9kN, date de sensul de aplicarea al vectorului forță. Rezistența reziduală și numărul de cicluri până la rupere sunt măsurate ca funcții de amplitudine a tensiunilor și de frecvență.

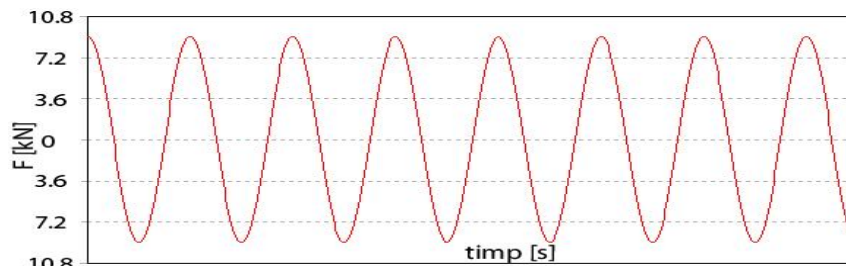


Figura 6.6. Graficul solicitărilor cu cicluri alternante simetrice și cu amplitudine constantă.

Pentru cazul ciclurilor alternante simetrice s-a ales ca metodă de corecție a amplitudinii tensiunii, schematizarea Gerber, care se cunoaște a fi specifică materialelor ductile. În Figura 6.7 se prezintă aspectul celor trei schematizări importante, Goodman (materiale fragile), Gerber (materiale ductile), Soderberg (variante conservatoare).

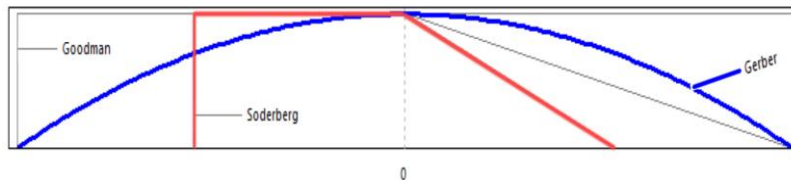


Figura 6.7. Graficul schematizării metodelor de corecție a amplitudinii tensiunii

6.1.4. Rezultatele obținute și interpretarea lor

Cu ajutorul modelării s-a încercat să se găsească o soluție stabilă cu o precizie satisfăcătoare chiar dacă procesul de calcul este foarte dificil ca urmare a existenței unei rețele foarte complexe de elemente și a nelinearității modelului. Aspectul și valorile deformațiilor specifice longitudinale ale sârmelor conductorului precum și deformația elastică echivalentă dintr-o secțiune de clemă, sunt prezentate în figura de mai jos. Deformația maximă a modelului este de 1,077mm și se găsește la sârmele de Al ale conductorului, sub alungirea prescrisă Figura 6.8.a. Maximul este înregistrat în cazul sârmelor de Al din stratul exterior.

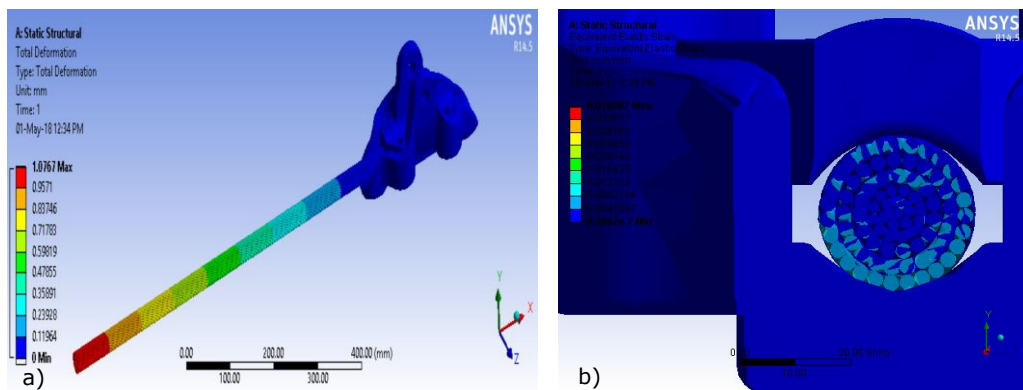


Figura 6.8. Variația deformațiilor specifice: a) deformații totale; b) deformația elastică echivalentă în secțiune

Deformațiile plastice echivalente, create de deplasarea pe verticală a conductorului sunt evidențiate în Figura 6.8. b, unde se poate vedea că amploarea cea mai mare se întâlnește la sârmele de Al aflate în stratul exterior, ce vin în contact cu clema de susținere. Valoarea maximă înregistrată de 0,033mm este una foarte mare având în vedere măsurătorile efectuate în capitolul anterior. Are efecte mari în diminuarea rezistenței la oboseală, se observă o propagare a acestora către straturile interioare, minimul înregistrându-se spre inima conductorului.

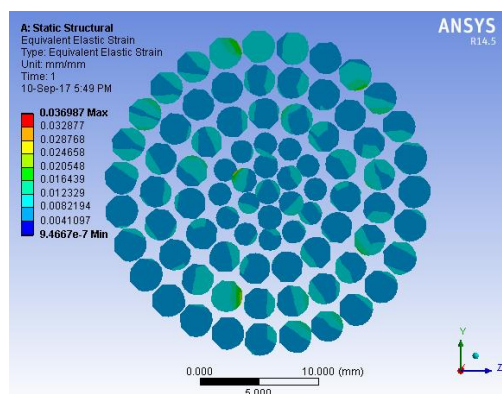


Figura 6.9. Distribuția deformațiilor echivalente von Mises în secțiunea din câmp

În ceea ce privește secțiunea conductorului din câmp, situația este mult diferită față de cea din vecinătatea clemei. Aici deformațiile se regăsesc distribuite în toată masa conductorului, la contactul dintre sârme, cu valori maxime la contactul sârmelor aflate pe straturi diferite.

Tensiunea echivalentă von Mises maximă se găsește în sârmele interioare din componența straturilor de oțel, chiar dacă acestea sunt încă în intervalul elastic. Tensiunea echivalentă von-Mises minimă se găsește în straturile exterioare formate din sârmele de Al, așa cum se poate vedea în Figura 6.10.

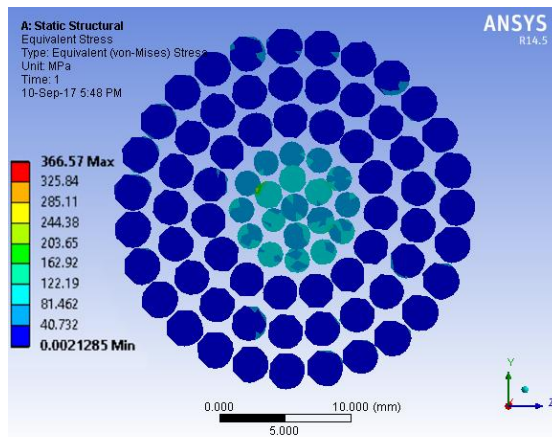


Figura 6.10. Distribuția tensiunii echivalente von Mises dintr-o secțiune din câmp

În cazul tensiunii normale maxime distribuția corespunzătoare a deformațiilor echivalente von Mises este similară cu câmpurile de tensiune pentru domeniul elastic al sârmelor de oțel interioare, iar deformația maximă totală se înregistrează la sârmele stratului exterior de Al. Aceasta evidențiază comportamentul diferit al celor doua metale și rolul pe care îl au acestea în structura conductorului, Figura 6.11.

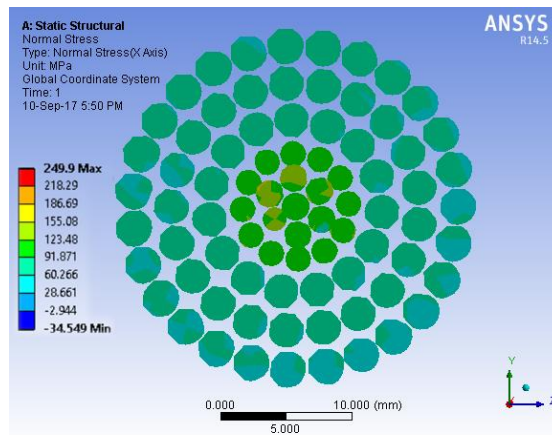


Figura 6.11. Distribuția tensiunii normale maxime din conductor

Alte caracteristici importante pentru secțiunea conductorului sunt tensiunea maximă de forfecare și efortul tăietor, care au valorile maxime în straturile sârmelor de oțel, așa cum se evidențiază în Figura 6.12.

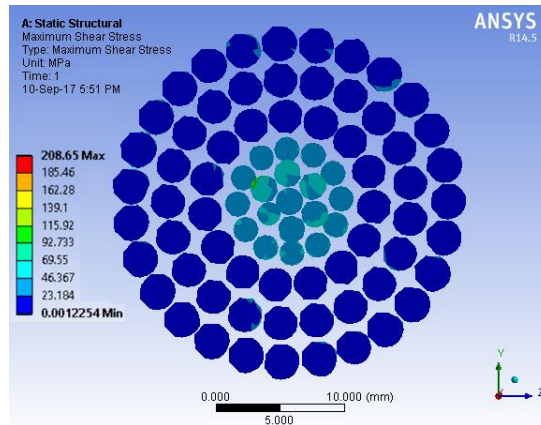


Figura 6.12. Distribuția tensiunilor tangențiale din secțiunea conductorului

Imaginile de mai sus arată stările de tensiune și deformație ce se întâlnesc în conductor pentru un ciclu de încărcare. În Tabelul 6.3 se prezintă valorile principalelor tensiuni și deformații date de analiza solicitărilor statice și elementele în care acestea se întâlnesc.

Tabel 6.3. Tensiuni și deformații înregistrate în analiza solicitărilor statice și dinamice

Solicitări statice					
Tipul	Deformație liniară totală	Tensiune echivalentă (von-Mises)	Deformația elastică echivalentă	Deformația uni-direcțională	Tensiunea normală
Minim	0,12mm	40 MPa	9,4667e-7 mm/mm	0,093 mm	29 Mpa
Maxim	1,077mm	366 MPa	0,036987 mm/mm	0,905 mm	250 MPa
Elementul unde este minimul	Clema CSA 5			Sârme Al strat exterior	Sârme oțel strat median
Elementul unde este maximul	Sârme Al strat exterior	Sârme oțel strat median		Sârme Al strat median	Sârme oțel inimă
Solicitări dinamice					
Tipul	Element	Strat	Număr de cicluri	Convențional	
Elementul unde este minimul	Sârmă 81, de aluminiu	Stratul 3 - exterior	3541	1e+009	
Elementul unde este maximul	Sârmă de oțel	Stratul 1	1e+008		

Solicitările variabile au evidențiat zona critică și sârmele cele mai afectate de mișcările conductorului. Deși solicitările statice au valori maxime ale tensiunii în

straturile sârmelor de oțel, atunci când apar vibrațiile, acestea nu sunt cele la care se produce prima oară ruperea. Ruperile prin oboseală apar în prima instanță la sârmele de Al din stratul exterior. Mai mult, prima sârmă ruptă este o sârmă de Al ce se află în contact cu clema, acolo unde presiunea de contact conductor-clema și încovoierea este maximă. Aceasta sârmă este marcată în Figura 6.13.

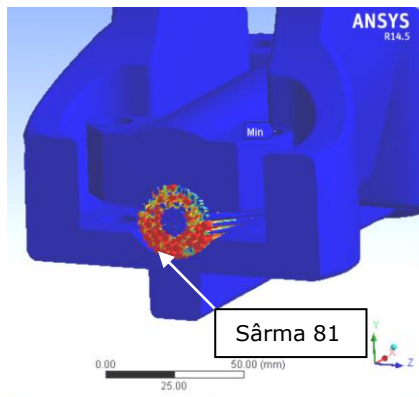


Figura 6.13. Evidențierea sârmelor unde apar primele ruperi de oboseală

Producerea ruperilor în clema de susținere este un efect al solicitărilor pe cele trei direcții de deplasare, care sunt date de: forța axială, presiunea normală (dată de piesa de strângere) și momentul încovoietor. Evidențierea zonei și a sârmelor unde se inițiază fisurile se face în Figura 6.14, unde este menționat și numărul de cicluri până la rupere.

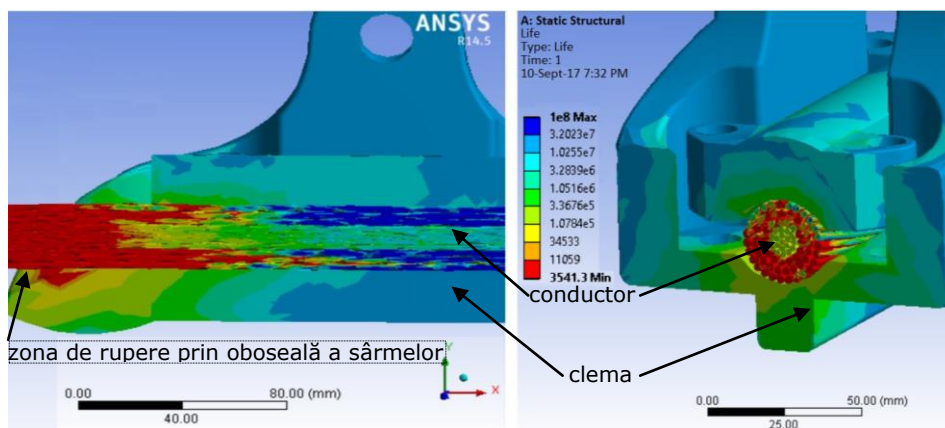


Figura 6.14. Variația numărului de cicluri în straturile conductorului

Acțiunile ciclice la care sunt supuse sârmele fac ca, după un număr de cicluri, tensiunile să crească în secțiunea de rupere, în timp ce se înregistrează o micșorare a diametrului. Astfel se provoacă o creștere accentuată a tensiunii înainte de rupere care determină smulgerea. Ruperea finală s-a înregistrat la o sârmă de oțel din straturile de rezistență.

Rezultatele simulării cu elemente finite sunt similare cu cele obținute experimental prin amprentarea sârmelor și încercarea la oboseală. Presiunea medie și relația neliniară dintre sarcină de contact și suprafața amprentată sunt apropiate. Prin urmare, modelul de calcul creat pentru determinarea comportamentului elementelor componente ale conductorului ar putea oferi o bună aproximare în ceea ce privește predicția duratei de viață.

6.2. Încercări experimentale la oboseală a conductorului 450/75

În cadrul acestui subcapitol se analizează comportamentul și durata de viață a conductorului nou 450/75 supus unor solocități variabile, similare celor ce se întâlnesc pe durata funcționării. Acest tip de încercare s-a făcut în laboratorul de rezistența materialelor, pe mașina de încercări MOT 2500kN/13m (din Figura 5.33), cu respectarea condițiilor impuse de metoda de testare la oboseală a conductoarelor aeriene IEC 62568, și are ca scop completarea și validarea simulărilor teoretice.

Modalitatea de lucru a constat în fixarea conductorului, în lungime de 13m, pe masină folosind clemele de susținere tip CSA5, aplicarea unei forțe axiale corespunzătoare și a unui regim vibrant. Menținerea forței axiale constante s-a făcut folosind un traductor de proximitate, cu care aceasta forță a variat $\pm 0,1\%$. Aplicarea vibrațiilor s-a făcut prin intermediul unui mecanism oscilant cu amplitudine reglabilă cu ajutorul unui excentric, și contor mecanic pentru înregistrarea numărului de cicluri. Deplasarea pe verticală Y_b a fost determinată cu ajutorul unui traductor de accelerație poziționat la o distanță de 89mm față de ultimul punct de contact dintre conductor și clemă. Având în vedere că ruperea sârmelor cauzează răsucirea conductorului, pe durata încercărilor s-a monitorizat răsucirea acestuia pentru a depista apariția rupei sârmelor.

În Figura 6.15 se prezintă schematizarea mașinii de încercări la oboseală a conductoarelor, MOT 2500kN/13m prevăzută cu sistem vibrant.

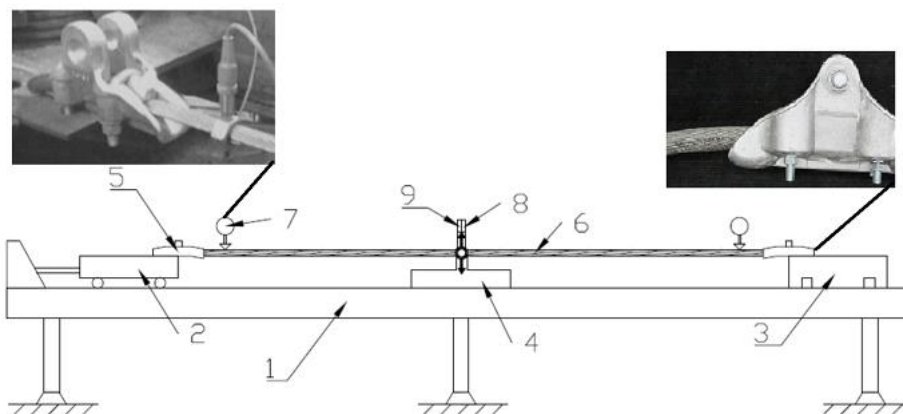


Figura 6.15. Schema mașinii de încercări la oboseală: 1 - corpul mașinii MOT 2500kN/13m; 2 - cărucior mobil; 3 - cărucior fix; 4 - sistem vibrant; 5 - clemă CSA5; 6 - conductor; 7 - traductor de deplasare; 8 - traductor de forță; 9 - traductor de accelerație

Încercarea la oboseală s-a executat până la ruperea primei sârme (nu mai mult de 10% din totalul sârmelor), fără a se depăși numărul maxim convențional de 10^9 cicluri. Conform standardelor, acest număr se consideră a fi limita peste care nu mai apar ruperi la oboseală. S-au ales 6 niveluri ale amplitudinii tensiunii de încovoiere σ_a în funcție de valorile amplitudinii deplasării Y_b , măsurate la $x=89\text{mm}$. Limita superioară a valorii lui Y_b s-a stabilit conform metodologiei dezvoltate de EPRI, cu privire la integritatea conductorului la rezistența la oboseală. Trecerea de la Y_b la σ_a s-a făcut folosind ecuația Poffenberger-Swart (Capitolul 3.4.2). Forța axială H , la care a fost întins conductorul, s-a păstrat constantă pe durata încercărilor, la valoarea de 20% din FRN . Inducerea stării de vibrație a conductorului s-a făcut prin poziționarea sistemului vibrant la mijlocul distanței dintre cleme și aplicarea unei oscilații cu frecvență de 24–30Hz.

Tabelul 6.4 prezintă valorile parametrilor de testare la oboseală și numărul de cicluri până la rupere, pentru conductorul 450/75.

Tabel 6.4. Parametri de testare la oboseală a conductorului

Nr. probă	Y_b [mm]	H [N]	EI [MPa]	p [mm]	σ_a [MPa]	Cicluri
1	0,28	33.080	$195,4 \times 10^5$	0,04	90,039	152.300
2	0,24				77,177	273.500
3	0,23				73,961	459.700
4	0,2				64,314	992.800
5	0,16				51,451	5.232.100
6	0,14				45,020	7.607.400

În Figura 6.16 sunt date rezultatele experimentale ale încercărilor la oboseală pentru mai multe tipuri de conductoare LEA (sistematizate în EPRI 2006), peste care s-au suprapus rezultatele obținute la oboseală a conductorului 450/75. Toate aceste conductoare conțineau sârmele de aluminiu dispuse în 3 straturi și condiții similare de testare cu cele prezentate anterior.

Notarea rezultatelor s-a făcut conform legendei de mai jos:

- * Conductor tip 450/75; 63/19 aluminiu-oțel
- ▲ GREMCA (2002,2005) 715,5 Crow susp.
- △ GREMCA (2002,2005) 715,5 Crow 54/7 susp.
- GREMCA (2000,2001), Levesque (2005) 13354,5 Bersfort 48/7; run out
- GREMCA (2000,2001), Levesque (2005) 13354,5 Bersfort 48/7; susp.
- Silva (1976) 795 Tern 45/7 Susp.
- ◆ ALCOA (1979) 954 Rail 45/7 Susp.
- ◇ ALCOA (1979) 954 Rail 45/7 Susp. run out
- + ALCOA (1979) 794 Condor 54/7 BM
- × ALCOA (1979) 794 Condor 54/7 BM; run out

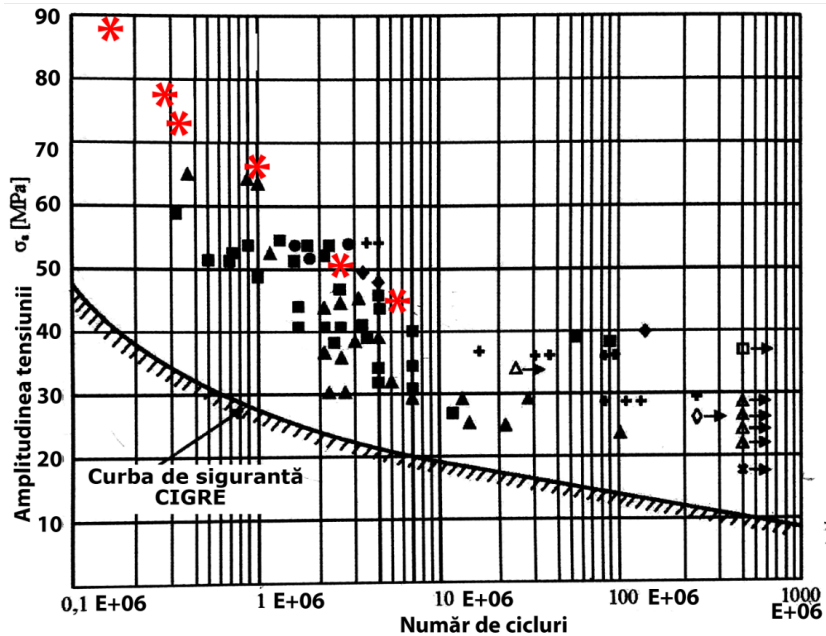


Figura 6.16. Rezultatele încercărilor la oboseală pe conductoare LEA

Cu ajutorul acestor puncte se poate trasa curba de oboseală și se pot face predicții asupra duratei de viață a conductorului 450/75 pentru amplitudini variabile ale deplasării. Se observă că și în cazul conductorului 450/75 rezultatele s-au înregistrat în domeniul pozitiv al curbei de siguranță Cigre, dacă nu se depășește valoarea limită a amplitudinii deplasării.

6.3. Cercetări privind rezistența la oboseală a sârmelor de aluminiu

În cazul sârmelor, solicitare variabilă des întâlnită la funcționarea conductoarelor este întinderea. Încercarea la oboseală de tracțiune este adesea utilizată pentru a caracteriza durata de viață la oboseală. Modulul, rezistența reziduală și numărul de cicluri până la rupere sunt măsurate ca funcții de amplitudine a tensiunilor și de frecvență. Frecvența este o variabilă importantă pentru sârmele de aluminiu, deoarece cauzează auto-încălzirea sârmelor, lucru care în final afectează puternic comportarea conductorului.

Mecanismul prin care sârmele se deteriorează datorită încărcărilor variabile (ciclice) nu este pe deplin înțeles. Examinarea acestor mecanisme complexe și crearea de modele matematice care să explice comportarea materialului indică comportarea și viața conductorului pe durata exploatarei. Pentru a putea compara între ele modurile de comportare a materialelor la diverse acțiuni, încercările au fost făcute în aceleași condiții și cu aceleași forme și dimensiuni ale probelor, precum și cu respectarea standardului ASTM E1823-13 mașină pentru încercări statice și dinamice WALTER+BAI.

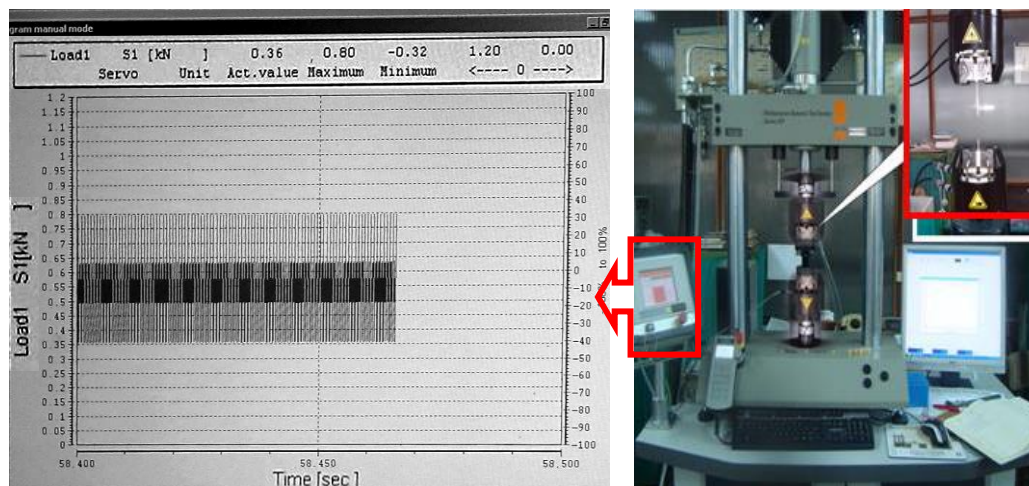


Figura 6.17. Graficul solicitărilor variabile cu ciclu oscilant pozitiv pe mașina de încercări WALTER+BAI

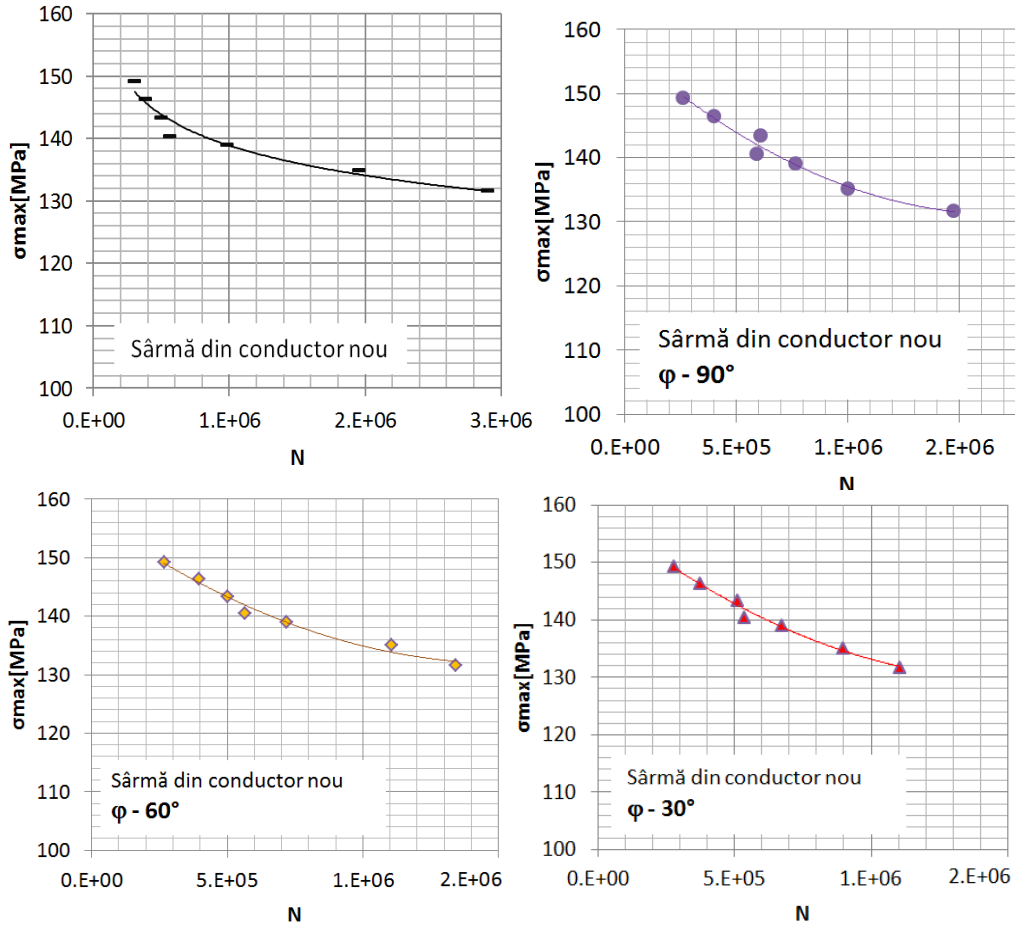
Într-o primă etapă, sârmelor li s-au aplicat o tensiune medie. Asupra sârmelor aflate la o tensiune medie constantă s-a indus un caracter variabil al solicitării axiale ondulatorie de tracțiune. S-au aplicat variații ale tensiunii într-un interval determinat de valoarea minimă și maximă a tensiunii, sub forma unui ciclu oscilant pozitiv. Acest ciclu este caracteristic pentru testarea seturilor de prob la amplitudine și încărcare constantă.

În tabelul de mai jos sunt date valorile parametrilor de testare la oboseală și numărul de cicluri până la rupere, pentru sârmele debitate la $l_0=200\text{mm}$, la o frecvență de 20Hz și un coeficient de asimetrie $R=0.4$. Pe fiecare probă am folosit aceeași valoare a tensiunii medii cu valoarea de 102.5N/mm^2 la aceeași valoare a oscilațiilor și cu creșterea amplitudinii.

Aprecierea duratei de viață nu poate fi estimată doar considerând durata de timp în care un conductor s-a aflat în exploatare. Ruperile de oboseală sunt influențate în cea mai mare măsură de existența amprentelor pe suprafețele sârmelor. Probele amprentate cu forța de amprentare de 1kN pentru cele trei unghiuri de amprentare - 30°, 60°, 90° - au fost testate în condiții similare, cu înregistrarea valorilor tensiunii maxime și a numărului de cicluri până la rupere. Experimental am determinat valoarea rezistenței la oboseală în funcție de tipul solicitării (cea mai mare valoare a tensiunii maxime peste care sârma nu se rupe), și variația numărului de cicluri până la rupere pentru diverse tipuri de sârmă.

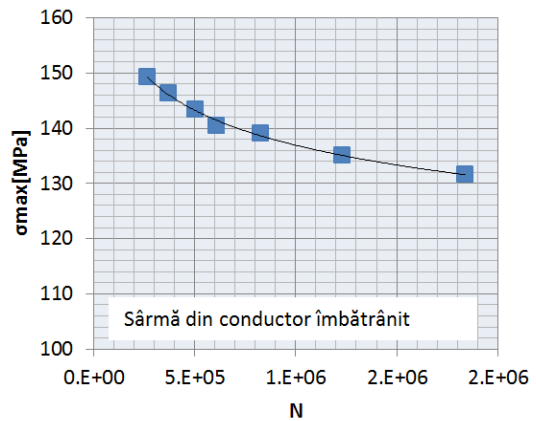
Tabel 6.5. Valorile parametrilor de oboseală

Proba/tip	φ [°]	σ_{\max} [N/mm ²]	σ_{\min} [N/mm ²]	F_A [kN]	N [-]
1	2	3	4	5	6
1 / nou	-	131,68	52,67	0,270	2.899.000
2 / nou	-	135	54	0,277	1.950.050
3 / nou	-	138,99	55,60	0,285	984.000
4 / nou	-	140,45	56,18	0,288	563.200
5 / nou	-	143,38	57,35	0,294	496.000
6 / nou	-	146,31	58,52	0,300	383.400
7 / nou	-	149,23	59,69	0,306	302.000
1 / nou	30°	131,68	52,67	0,270	1.107.000
2 / nou	30°	135	54	0,277	902.500
3 / nou	30°	138,99	55,60	0,285	674.700
4 / nou	30°	140,45	56,18	0,288	534.400
5 / nou	30°	143,38	57,35	0,294	513.400
6 / nou	30°	146,31	58,52	0,300	374.800
7 / nou	30°	149,23	59,69	0,306	278.000
1 / nou	60°	131,68	52,67	0,270	1.342.000
2 / nou	60°	135	54	0,277	1.105.000
3 / nou	60°	138,99	55,60	0,285	720.400
4 / nou	60°	140,45	56,18	0,288	563.900
5 / nou	60°	143,38	57,35	0,294	500.800
6 / nou	60°	146,31	58,52	0,300	397.000
7 / nou	60°	149,23	59,69	0,306	266.400
1 / nou	90°	131,68	52,67	0,270	1.478.400
2 / nou	90°	135	54	0,277	1.005.500
3 / nou	90°	138,99	55,60	0,285	770.000
4 / nou	90°	140,45	56,18	0,288	593.400
5 / nou	90°	143,38	57,35	0,294	612.600
6 / nou	90°	146,31	58,52	0,300	405.000
7 / nou	90°	149,23	59,69	0,306	265.200
1 / îmbătrânit	-	131,68	52,67	0,270	1.840.000
2 / îmbătrânit	-	135	54	0,277	1.230.500
3 / îmbătrânit	-	138,99	55,60	0,285	828.800
4 / îmbătrânit	-	140,45	56,18	0,288	610.000
5 / îmbătrânit	-	143,38	57,35	0,294	506.000
6 / îmbătrânit	-	146,31	58,52	0,300	374.000
7 / îmbătrânit	-	149,23	59,69	0,306	270.000



a) sârme noi

Figura 6.18. Curba Wöhler de oboseală a sârmelor de aluminiu



b) sârme îmbătrânite

În graficul de mai jos se observă cum scade rezistența la oboseală a materialului odată cu îmbătrânirea. Astfel, pentru încercări ale probelor în condiții similare, rezultatele arată o scădere a rezistenței la oboseală pentru sârmele îmbătrânite.

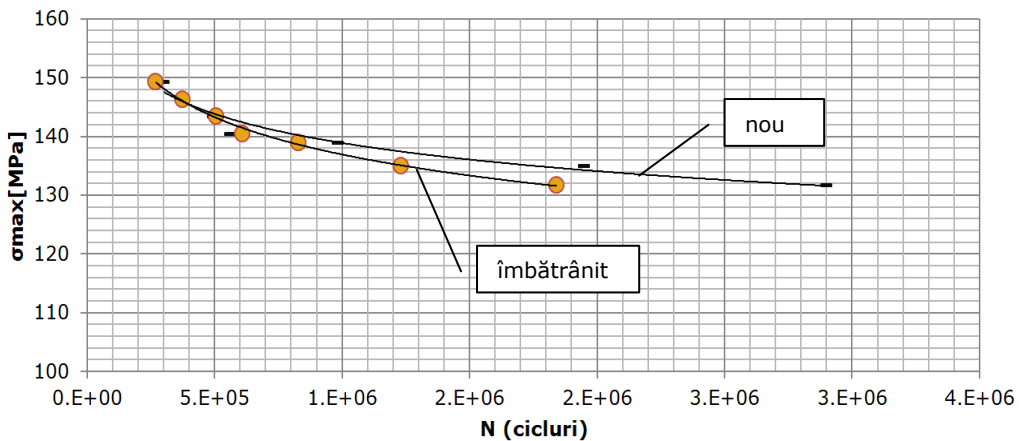


Figura 6.19. Influența stării conductorului asupra curbelor de oboseală

Încercarea la oboseală s-a realizat pe un număr de 95 de sârme, cărora le-au fost aplicate tensiuni variabile între 130 - 150MPa, obținându-se numere de cicluri cuprinse între 3×10^5 - 4×10^6 cicluri. Prin suprapunerea diagramelor obținute am construit curba de oboseală Wöhler pentru sârmele de aluminiu îmbătrânite, noi, neamprentate și pentru cele amprentate într-un grafic comun.

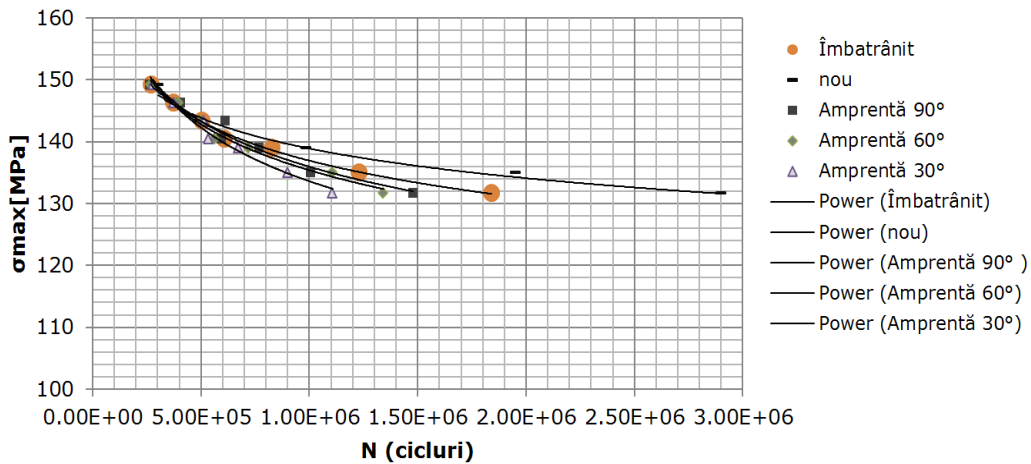


Figura 6.20 Curbele de oboseală ale sârmelor pentru diferite stări și unghiuri de amprentare

6.4. Analiza fractografică a sârmelor rupte prin oboseală

Determinările și măsurătorile pe sîrmele rupte în cadrul încercărilor de laborator s-au făcut cu ajutorul unui microscop electronic cu baleiaj din cadrul Institutului de Cercetare pentru Energii Regenerabile – ICER Timișoara, model SE Quanta FEG 250 echipat cu analizator EDAX cu detector SDD Apollo, folosind magnificații 120x, 200x și 400x (funcție de tipul de macro folosit). Sunt evidențiate aspecte specifice ale ruperii prin oboseală și particularități ale apariției și dezvoltării fisurilor sârmelor. S-a constatat o influență puternică a amprentelor asupra rezistenței la oboseală, ruperile la oboseală sunt mult mai timpurii în cazul existenței amprentelor. Deși, durata de exploatare este destul de mare în cazul sârmelor îmbătrânite, rezistența la oboseală nu scade foarte mult, înregistrându-se o scădere a numărului de cicluri cu 37% față de sârmele noi. În cazul sârmelor cu amprentă, aceasta scădere este mult mai mare, cu până la 62%, așa cum se întâlnește la amprentele cu unghi de 30°.

Forma amprentelor este, de asemenea, foarte importantă în comportarea și dezvoltarea fisurilor de oboseală. O amprentă sub forma unei elipse alungite poate reduce mult mai mult rezistența la oboseală față de una sub formă unui cerc. Numărul de cicluri până la rupere este mai mic cu până la 15% în cazul amprentelor la 30° față de amprentele la 90°.

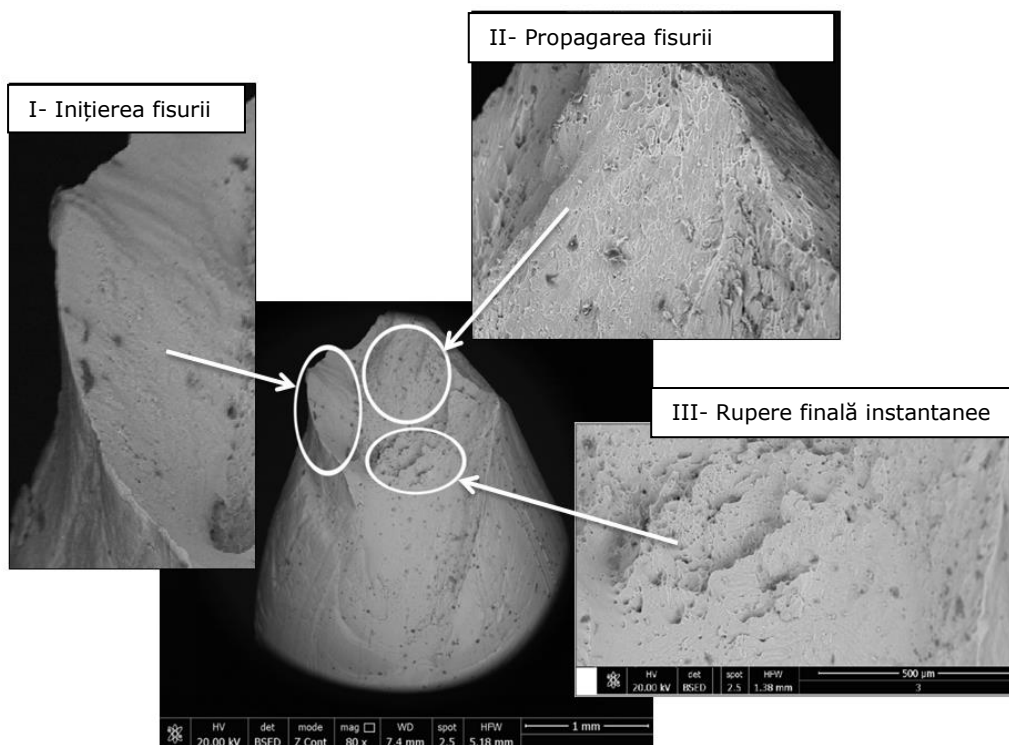


Figura 6.21. Aspectul suprafeței de rupere prin oboseală

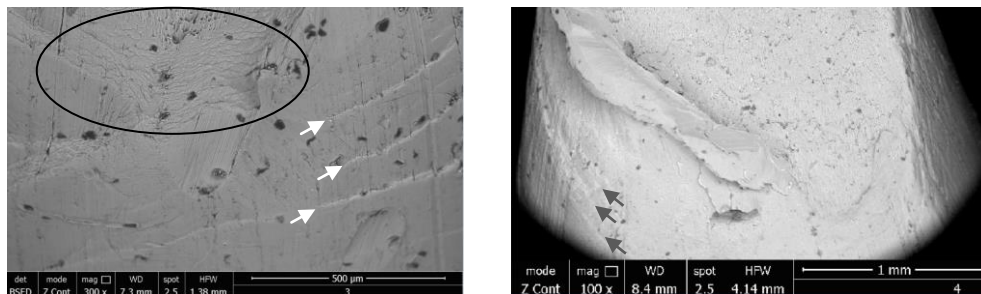
În cazul sârmelor de Al ruperile prin oboseală se manifestă printr-o ușoară gătuire în zona de rupere. În general, se disting trei zone ce caracterizează ruperea cu un aspect distinct:

- o zonă netedă ce este specifică inițierii fisurii și care caracterizează faza de incipiență a degradării la oboseală;
- o zonă de propagare stabilă a fisurii, care este controlată de tensiunea axială, cu apariția grăunților rupti înconjurați de zone netede, ca urmare a dislocațiilor și lipirii dintre particulele aflate pe suprafețele ce culisează;
- zona de rupere finală se produce atunci când tensiunea atinge o valoare critică și este caracterizată de un aspect rugos al materialului, dat de smulgere.

De obicei, deformația plastică ciclică se produce pe suprafața exterioară a sârmei supuse la acțiunea sarcinilor variabile [Dumitru, 2009]. În zonele învecinate ruperii se observă nervuri date de deplasările din material ca în imaginile 6.22 a), b). Acestea sunt caracteristice ciclurilor de încărcare, și sunt dispuse paralel la o distanță cuprinsă între 65μm și 130μm și înălțimi de până la 10μm. Aceste benzi superficiale cresc odată cu creșterea ciclurilor de solicitare și conduc la formarea microfisurii în straturile superficiale.

Dezvoltarea fisurilor din stadiul doi se face preponderent pe direcții înclinate la 45° față de secțiunea din care se propagă. Odată cu apariția fisurilor, tesionile normale au un rol decisiv în comportamentul la rupere al materialului. Un alt parametru ce controlează viteza de propagare este variația factorului de intensitate a tesionii $\Delta K = \Delta\sigma(\pi l_f)^{1/2}$ (unde l_f este lungimea fisurii).

Propagarea fisurilor se face sub forma unor nervuri tridimensionale cu tendința păstrării unghiului de amprentare față de planul secțiunii de propagare.



a) micronervuri și benzi

b) benzi de lunecare

Figura 6.22. Aspectul benzilor de lunecare și a zonei învecinate ruperii prin oboseală

Ruperile prin oboseală pot fi localizate în anumite fisuri existente sau defecte interne din material. În vecinătatea acestora se produce o concentrare puternică a tensiunilor, urmată de o propagare a fisurilor și o creștere a defectului.

În cazul sârmelor, astfel de defecte sunt des întâlnite datorită procesului tehnologic de trefilare și toronare. Punerea în funcțiune a conductoarelor electrice face ca, după o perioadă de timp necesară formării premiselor fisurii, fisurile de oboseală să ducă la ruperea totală. Aceasta perioadă reprezintă o parte importantă din durata de viață, cu influențe asupra numărului de cicluri de solicitare până la rupere. Regimurile variabile de încărcare duc la deformații și deplasări la scară macroscopică cu formarea de noi graunți și creștere a golurilor.

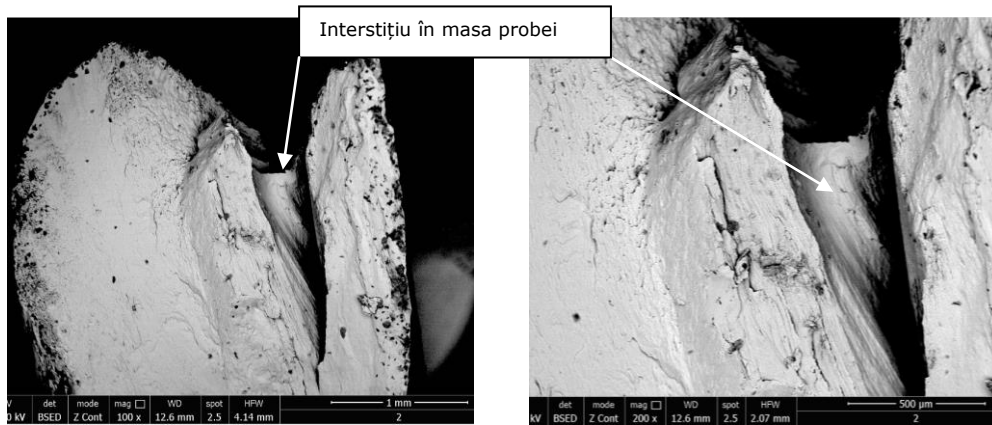


Figura 6.23. Dezvoltarea fisurilor de oboseală în cazul defectelor din material

Un alt caz particular al dezvoltării ruperilor la oboseală îl reprezintă sârmele cu amprente. Amprentele reprezintă defecte superficiale de material care concentrează tensiunile în zonele deformate creând, ca și în cazul defectelor interne, puncte de apariție și dezvoltare a microfisurilor. Acestea au un rol deosebit de important în cadrul oboselei sârmelor, fiind un nucleu de apariție al microfisurilor. Existența amprentelor aduce o scădere semnificativă a rezistenței la oboseală, modifică direcțiile de propagare ale microfisurilor și aspectul suprafețelor de rupere.

Ca urmare a formării zonei deformate plastic (amprenta) se crează o ecrusare locală a straturilor superficiale cu formare de microfisuri marginale și dislocații de material ecrusat (asa cum se arata în Figura 5.15).

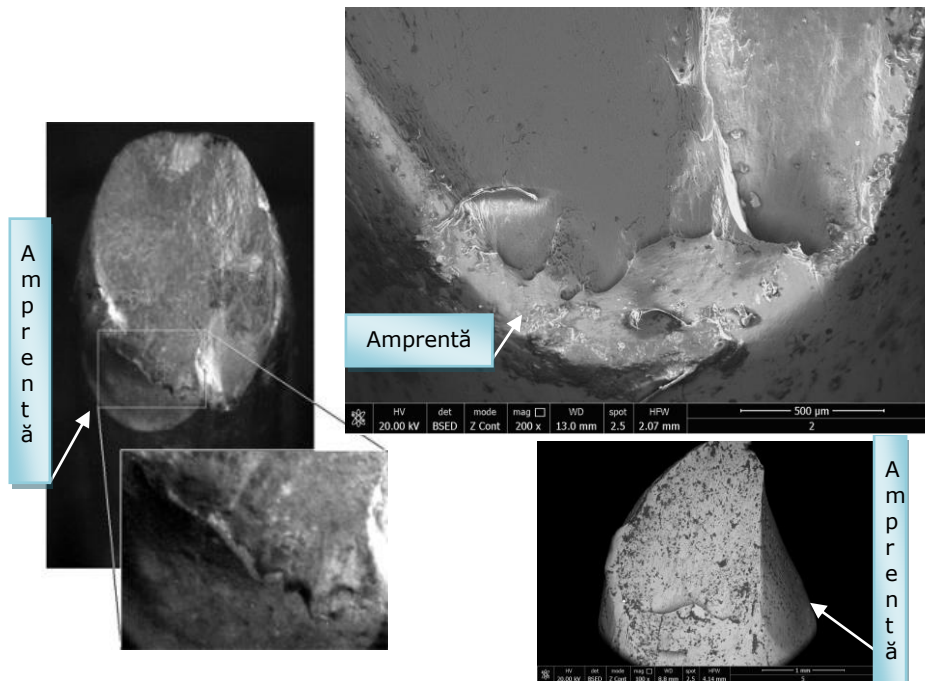


Figura 6.24. Dezvoltarea fisurilor de oboseală în cazul amprentelor superficiale

O caracteristică importantă a oboselii în acest caz este neomogenitatea distribuției deformațiilor din material, în special la numere mari de cicluri. Acest aspect evidențiază dificultatea elaborării unor metode de calcul care să fie folosite pentru o evaluare predictivă a rezistenței la oboseală a conductoarelor.

6.5. Concluzii

Modelarea cu elemente finite a contactului dintre sârme și dintre sârme și elementele clemei continuă cercetarea detaliată a tensiunilor și deformațiilor din elementele conductorului.

Ruperea prin oboseală este cauzată de acțiunea simultană a tensiunilor ciclice, a tensiunilor medii de întindere și a deformațiilor plastice.

Ruperea prin oboseală apare acolo unde deformațiile plastice au valori maxime, preponderent din microfisurile perimetrice ale amprentelor, adică în vecinătatea clemei de susținere.

Simularea tensiunilor din conductor arată că, independent de regimurile de încărcare și de rigiditățile la tracțiune sau încovoiere, durata de viață a unui conductor este controlată în special de eforturile care apar în zonele contactului de tip punctiform.

Modelele elasto-plastice s-au dovedit fiabile atât în ceea ce privește dezvoltarea de amprente, cât și în ceea ce privește oboseala conductorului, observându-se o bună similitudine cu rezultatele experimentale.

Modelul de calcul creat ar putea oferi o bună aproximare în ceea ce privește predicția duratei de viață.

Trasarea curbei de oboseală a conductorului 450/75 ajută la determinarea duratei de viață pentru amplitudini variabile ale deplasării.

Se observă că și în cazul conductorului 450/75 rezultatele s-au înregistrat în domeniul pozitiv al curbei de siguranță Cigre, dacă nu se depășește valoarea limită a amplitudinii deplasării.

În cazul încercărilor de laborator s-a înregistrat un număr mai mic de cicluri până la rupere decât în cazul simulărilor cu elemente finite, datorită modificării gradului de lubrifiere cu efecte asupra tipului de frecare, a migrației particulelor din zonele de contact, a modificării caracteristicilor de material odată cu creșterea temperaturii din zonele de contact.

Ruperile sârmelor la oboseală sunt mult mai timpurii în cazul existenței amprentelor. Rezistența la oboseală scade cu 37% în cazul sârmelor îmbătrânite și, cu până la 62%, în cazul sârmelor amprente.

Ruperile prin oboseală pot fi cauzate de anumite fisuri existente sau a unor defecte interne din material.

Când vibrațiile sunt de tip galopant, durata de viață a conductorului scade extrem de mult, ajungând la ordinul zilelor;

O amprentă sub forma unei elipse alungite poate reduce mult mai mult rezistența la oboseală față de una sub formă unui cerc. Numărul de cicluri până la rupere este mai mic cu până la 15%, în cazul amprentelor la 30°, față de amprente la 90°.

Amprentarea crează o ecruisare locală a straturilor superficiale cu formare de microfisuri marginale și dislocații de material ecruisat.

Ruperile de oboseală sunt influențate în cea mai mare măsură de existența amprentelor pe suprafețele sârmelor care favorizează neomogenitatea distribuției deformațiilor din material, în special la numere mari de cicluri.

7. CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE

Cercetările teoretice și practice prezentate în cadrul tezei de doctorat evidențiază următoarele concluzii:

- * Tematica tezei se încadrează în noile direcții de cercetare privind transportul și distribuția energiei electrice, abordând conceptul durabilității conductoarelor electrice de înaltă tensiune în condițiile sarcinilor variabile generate de vibrațiile eoliene;
- * Procesele de fabricație ale conductoarelor produc tensiuni în material, cresc numărul de defecte, modifică rețeaua cristalină și scad ductilitatea și tenacitatea. Modelarea la rece crește duritatea aluminiului, prin creșterea densității dislocațiilor și prin apariția ecruisării;
- * Particularitățile proceselor tehnologice (mecanice, termochimice, chimico-termice, electrochimice) pot conduce la apariția unor defecte legate de modificări structurale, modificări ale formei materialului, apariția de fisuri, concentrări locale ale tensiunilor etc.;
- * Spectrul de radiație X, caracteristic pentru sârmele analizate, arată că stratul protector, de oxid se îngroașă în timp dar că sârmele îmbătrânite prezintă în stratul superficial o serie de elemente noi, diferite de materialul de bază;
- * Repartiția geografică a concentrațiilor de poluanți atmosferici, compoziția și aciditatea precipitațiilor, precum și condițiile meteorologice fac ca efectele create asupra conductoarelor să varieze de la o poziție geografică la alta;
- * Efectul dinamic provocat de desprinderea vârtejurilor vântului produce o acțiune fluctuantă perpendiculară pe direcția vântului care crește odată cu creșterea vitezei. La valoarea mică a vitezei, $v=1.6\text{m/s}$, presiunea secundară are o valoare de 20% din valoarea presiunii principale și crește până la 29% pentru $v=27\text{m/s}$;
- * Pe durata curgerii aerului peste profilul conductorului, în secțiune s-au identificat două presiuni ce acționează pe aceeași direcție, dar în sensuri opuse, cea principală și cea secundară. Modificarea valorii raportului acestora impune o modificare a direcției și amplitudinii oscilațiilor conductorului;
- * Variațiile de viteză duc la intercalarea celor trei tipuri de vibrații specifice conductoarelor și contribuie la dezvoltarea fenomenului de oboseală a acestora;
- * Măsurarea săgeții reale ajută la aplicarea corectă a calculelor, la determinarea amplitudinii tensiunii de încovoiere și a amplitudinii deformației specifice;

- * Amprentarea crează o ecruisare locală a straturilor superficiale cu formare de microfisuri marginale și dislocații de material ecruisat;
- * Determinarea tensiunilor von Mises a permis o analiză a stări de tensiune din sârmele de aluminiu, o cuantificarea a acestora și a efectelor pe care le creează;
- * Analiza cu elemente finite a făcut posibilă determinarea locației punctelor de inițiere și propagare a fisurilor ca fiind dispuse perimetral amprentelor;
- * Folosind variații liniare ale presiunii normale s-a înregistrat o variație neliniară a tensiunii echivalente și o modificare a raportului dintre suprafața și profunzimea amprentei;
- * La nivel structural contactele dintre sârme aduc modificări de formă și dimensiuni ale interstițiilor cristaline și dezvoltă eforturi continue în masa sârmelor, care duc la recristalizare;
- * În zonele învecinate contactului apare și o solicitare de încovoiere, din cauza neparalelismului celor două suprafețe frontale, a neomogenității materialului sau a aplicării excentrice a sarcinii;
- * Starea fizică a suprafeței sârmelor participă, alături de microtopografie, la creșterea duratei de viață, iar caracteristicile acestora diferă datorită proceselor fizico-mecanice pe care le suportă. Există o tendință de creștere a durității peliculei superficiale odată cu creșterea forței de amprentare;
- * Sârmele îmbătrânite 42 de ani manifestă o rezistență la forfecare cu 10-15% mai scăzută decât cea a sârmelor noi.
- * Încercarea la îndoire alternantă evidențiază o modificare favorabilă a proprietăților sârmelor îmbătrânite, observându-se o comportare mai bună la îndoire a acestora. Media de indoiri este 10.3 pentru cele îmbătrânite și 10 pentru cele noi;
- * Rezistența la torsiune în cazul celor îmbătrânite cunoaște o creștere treptată cu avansarea spre straturile interioare, însă este mai scăzută cu 17% decât a celor noi;
- * În cazul sârmelor îmbătrânite rezistența la rupere scade cu 20% în condițiile în care ruperea apare la o lungire ultimă mai mare cu aproape 1% și cu un diametru ultim mai mic cu 14% decât în cazul sârmelor noi;
- * Deformațiilor locale sunt mai profunde în cazul unghiurilor de amprentare de 90°, iar rezistența la tracțiune este mai mică decât în cazul unghiurilor de amprentare de 30° și 60°;
- * Existența amprentelor, de orice tip, face ca ruperea la tracțiune să se dezvolte preponderent dintr-o secțiune în care aceasta există, iar fisura se dezvoltă într-un plan înclinat la 45° față de axa probei;
- * Simularea tensiunilor din conductor arată că, independent de regimurile de încărcare și de rigiditățile la tracțiune sau încovoiere, durata de viață a unui conductor este controlată în special de eforturile care apar în zonele contactului de tip punctiform;

- * Modelele elasto-plastice s-au dovedit fiabile atât în ceea ce privește dezvoltarea de amprente, cât și în ceea ce privește oboseala conductorului, observându-se o bună similitudine cu rezultatele experimentale;
- * Trasarea curbei de oboseală a conductorului 450/75 ajută la determinarea duratei de viață pentru amplitudini variabile ale deplasării;
- * Se observă că și în cazul conductorului 450/75 rezultatele s-au înregistrat în domeniul pozitiv al curbei de siguranță Cigre, dacă nu se depășește valoarea limită a amplitudinii deplasării;
- * Ruperile sârmelor la oboseală sunt mult mai timpurii în cazul existenței amprentelor decât în cazul îmbătrânirii. Rezistența la oboseală scade cu 37% în cazul sârmelor îmbătrânite și, cu până la 62%, în cazul sârmelor amprente.
- * Când vibrațiile sunt de tip galopant, durata de viață a conductorului scade extrem de mult, ajungând la ordinul zilelor.

În cuprinsul lucrării științifice se evidențiază o serie de contribuții personale care sunt sintetizate în cele ce urmează:

- * Întocmirea unei sinteze documentare asupra stadiului actual al cercetărilor cu privire la fenomenul de oboseală generat de vibrațiile eoliene;
- * Sinteza bibliografică privind tehnicile de modelare cu elemente finite și calcul numeric al parametrilor de mecanica ruperii;
- * Analiza procesului de fabricație a conductoarelor în dependență cu o serie factori nefavorabili – tesioni remanente, defecte structurale, instabilitate dimensională – asupra duratei de viață a conductoarelor electrice de înaltă tensiune;
- * Evaluarea factorilor de mediu specifici zonei de lucru LEA – Porțile de Fier-Arad – care influențează direct starea conductorului 450/75 după o perioadă de 42 de ani de funcționare;
- * Elaborarea unui studiu asupra formelor de manifestare a coroziunii sârmelor îmbătrânite și a particularităților acestora comparativ cu microgeometria sârmelor noi de aluminiu;
- * Analiza efectului de îmbătrânire manifestat printr-o serie de modificări structurale prin aplicarea spectroscopiei cu raze X și prin metoda analizei termice;
- * Realizarea unei instalații de marcare și evidențiere a curgerii fluxului de aer peste profilul unui conductor.
- * Conceperea unui model numeric de calcul pentru determinarea presiunii dinamice având la bază simularea curgerii unui fluid peste profilul conductorului 450/75;
- * Propunerea unei ecuații în baza căreia se corelează viteza vântului cu presiunea dinamică aplicată conductorului, cu aplicabilitate în simulările numerice ale stărilor de tensiune din sârme;

- * Analiza numerică a stării triaxiale de tensiuni și deformații la contactul dintre sârmele de aluminiu, folosind modele fidele cu comportament elasto-plastic definitiv conductorului 450/75;
- * Efectuarea unui studiu al concentrării tensiunilor în zona de contact Hertzian și determinarea punctelor de inițiere și a direcțiilor de propagare a fisurilor.
- * Aplicarea metodei cu elemente finite pentru modelarea ansamblului conductor-clemă și analiza, pe această bază, a stării de tensiuni și deformații în zona de contact a conductorului 450/75 cu clema de susținere CSA5, la încărcări statice;
- * Aplicarea metodei cu elemente finite la modelarea ansamblului conductor-clemă, pentru analiza durabilității la solicitările variabile generate de vibrațiile eoliene;
- * Conceperea și realizarea unor echipamente pentru studiul forțelor și unghiurilor de înclinare a sârmelor asupra formei și dimensiunii amprentei de contact;
- * Elaborarea unei metodologii experimentale privind influența efectului de îmbătrânire a sârmelor conductorului 450/75 pe baza modificării caracteristicilor mecanice la tracțiune, forfecare, răsucire, încovoiere alternată;
- * Propunerea unor ecuații în baza cărora face cuantificarea caracteristicilor dimensionale ale amprentelor în funcție de forța normală, pentru sârme noi și îmbătrânite 42 de ani;
- * Analiza influenței formei și dimensiunilor amprentei asupra rezistenței la tracțiune statică și ciclică a sârmelor conductorului 450/75;
- * Trasarea curbei caracteristice tensiune-deformație (σ - ϵ) a conductorului 450/75 cu evidențierea punctelor corespunzătoare la 30, 50, 70 și 85 % din forța de rupere nominală;
- * Adaptarea unui sistem vibrant cu excentric pe mașina de încercări MOT 2500kN/13m pentru realizarea încercărilor la oboseală a conductorului 450/75;
- * Întocmirea unui set de masuratori ale conductoarelor din cadrul LEA Timișoara - Arad în diferite condiții de mediu și determinarea săgeților reale;
- * Calculul amplitudinii tensiunii la încovoiere a conductorului 450/75 prin aplicarea ecuației Poffenberger-Swart și folosind săgeata reală dintr-o deschidere, măsurată în diferite condiții de mediu;
- * Determinarea experimentală a rezistenței la oboseală pentru conductorul 450/75 și încadrarea acestuia în normele EPRI;
- * Efectuarea unui studiu asupra particularităților structurale și a microtopografiei zonelor de rupere, care se formează ca urmare a oboselii a sârmelor conductoarelor electrice de înaltă tensiune.

BIBLIOGRAFIE

1. [A.A. Fadel, 2012] A.A. Fadel, D. Rosa, L.B. Murça, J.L.A. Ferreira, J.A. Araujo, Effect of high mean tensile stress on the fretting fatigue life of an Ibis steel reinforced aluminium conductor, International Journal of Fatigue, Vol. 42, 2012, pp. 24-34.
2. [Achiriloaiei, 2016-I] **Achiriloaiei D.**, Kun L., Neş C.S., Dumitru I., Comparative study of mechanical properties of aluminium wires from new and used acsr conductors, Solid State Phenomena, Vol. 254, pp.159-163, 2016
3. [Achiriloaiei, 2015-I] **Achiriloaiei D.**, Neş C.S., Dumitru I., Research upon contact area between wires in the structure of overhead high voltage transmission line, BULETINUL Universităţii Petrol – Gaze din Ploieşti, Vol. LXVII, pp.43-50, no. 2/2015
4. [Achiriloaiei, 2015-II] **Achiriloaiei D.**, Neş C.S., Dumitru I., Influenţa contactului dintre fire şi a deformaţiilor locale asupra conductoarelor de înaltă tensiune, Revista Universităţii Petrol – Gaze din Ploieşti, 2015.
5. [Achiriloaiei, 2016-II] **Achiriloaiei D.**, Neş C.S., Dumitru I., Cernescu A., On the influence of the contact force and the angle between the wires on ACSR conductors' mechanical properties and durability, Key Engineering Materials, Vol. 665, pp.33-36, 2016
6. [ADR, 2010] ADR Centru, Analiza potenţialului energetic eolian la nivelul regiunii centru în perspectiva dezvoltării economice durabile, 2010.
7. [Arturo, 2002] Arturo Baltazar, Cesar D., Hernandez-Salazar, Betsabe Manzanares-Martinez, Study of wave propagation in a multiwire cable to determine structural damage, NDT&E International, Vol. 43, 2010, 726-732.
8. [ASTM E-1876-01] ASTM E-1876-01, Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation Technique of Vibration.
9. [Azevedo, 2002] Azevedo C.R.F., Cescon T., Failure analysis of aluminium cable steel reinforced (ACSR) conductor of the transmission line crossing the Parana River, Engineering Failure Analysis, Vol. 9(6), 2002, pp. 645-664.
10. [Azevedo, 2009] Azevedo C.R.F., A.M.D. Henriques, A.R. Pulino Filho, J.L.A. Ferreira, J.A. Araujo - Fretting fatigue in overhead conductors: Rig design and failure analysis of a Grosbeak aluminium cable steel reinforced conductor, Engineering Failure Analysis, Vol. 16, 2009, pp. 136-151.
11. [Azom, 2016] Azom articles, www.azom.com.
12. [Blevins, 1984] Blevins R., Fluid Dynamics Handbook, Van Norstrand Reinhold, New York, 1984.
13. [Bădărău, 2008] Bădărău G., Proprietăţile materialelor metalice, 2008.
14. [CEB, 2012] CEB specification, Aluminium conductors steel reinforced (ACSR conductors), 2012.
15. [Bogdan, 2008] Bogdan L., Cercetări privind reconstrucţia ligamentului încrucişat anterior al genunchiului, Ph.D thesis, Universitatea Politehnica Timişoara, 2013.
16. [Buzdugan, 1958] Gh. Buzdugan, Rezistenţa materialelor Vol. I, Editura Tehnica, Bucureşti 1958.

17. [Černín, 2008] Černín K., Reconstruction of conductor movement and monitoring of high voltage, , Ph.D thesis, Brno University of Technology, 2009.
18. [Cigada, 1997] Cigada A., Diana G., Flaco M., Fossati F., Manenti A., Vortex induced shedding and wake-induced vibrations in single and bundle cables, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 72, 1997, pp. 253–263.
19. [Cormier, 1999] Cormier NG, Smallwood BS, Sinclair GB, Meda G., Aggressive submodelling of stress concentrations, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 46, 1999, pp. 889–909.
20. [Diana, 1998] Diana G., Bruni S., Cheli F., Fossati F., Manenti A., Dynamic analysis of the transmission line crossing "Lago Maracaibo", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 74-76, 1998, pp. 977–986.
21. [Creț, 2010] Creț C., Relația dintre climă și calitatea aerului în arealul orașului Arad, Ph.D thesis, Oradea, 2010.
22. [Dongsheng, 2012] Dongsheng Li, Qian Hu, Jinping Ou, Fatigue damage evolution and monitoring of carbon fiber reinforced polymer bridge cable by acoustic emission technique, International Journal of Distributed Sensor Networks, Volume 2012.
23. [Dumitru, 1999] Dumitru I., Faur N., Elemente de calcul și aplicații în rezistența materialelor, Ed. Politehnica, Timișoara, 1999.
24. [Dumitru, 2001] Dumitru I., Marșavina L., Introducere în mecanica ruperii, Editura mirton, Timișoara. 2001
25. [Dumitru, 2003] Dumitru I., Negut N., Elemente de Elasticitate, Plasticitate și Rezistența materialelor, vol. I, Ed. Politehnica, Timișoara, 2003
26. [Dumitru, 2009] Dumitru I., Bazele calculului la oboseală, Editura Eurostampa, Timișoara, 2009
27. [Dumitru, 2017] Dumitru I. Cernescu A. , Oboseala conductoarelor liniilor electrice aeriene, Editura Academiei Române, București, 2017.
28. [ERPI, 2006] EPRI Transmission Line Reference Book: wind induced conductor motion, Electric Power Research Institute, Palo Alto, California, United States, 2006.
29. [Faur, 2010] Faur N., Marșavina L., Cernescu A., Neș C.S., Linul E., The Influence of the Steel and Aluminium Components Separation at the Conductors Locking for Stress-Strain Tests - Key Engineering Materials, Vol. 417-418, 2010, ISBN: 978-0-87849-315-9, pp. 693-696.
30. [Faur, 2002] Faur, N., Elemente finite. Fundamente, Editura Politehnica, Timișoara, 2002.
31. [Ferguson, 1994] Ferguson J.M., Gibbon R.R., Overhead transmission lines - refurbishment and developments, Power Engineering Journal, Vol. 8, 1994, pp.109–118.
32. [Guerard, 2011] Guerard S., Power line conductors, a contribution to the analysis of their dynamic behavior, Doctoral Thesis, Universite de Liege, 2011.
33. [Guohong, 2012] Guohong Chen, Xu Wang, Jiaqing Wang, Junjian Liu, Tao Zhang, Wenming Tang - Damage investigation of the aged aluminium cable steel reinforced (ACSR) conductors in a high-voltage transmission line, Engineering Failure Analysis, Vol. 19, 2012, pp. 13-21.
34. [Havard, 1992, I] Havard D.G., Bellamy G., Buchan P.G., Aged ACSR conductors. Part I: Testing procedures for conductors and line items, IEEE Trans Power Delivery, 1992 Vol. 7, pp. 581–587.

35. [Havard, 1992, II] Havard DG, Bellamy G., Buchan P.G., Aged ACSR conductors. Part II: Prediction of remaining life, IEEE Trans Power Delivery, 1992, Vol. 7, pp. 588–595.
36. [Irvine, 2005] Irvine Tom, Welcome t Azevedo o vibrationdat, 2006.
37. [Johnson, 2010] Johnson K.L., Contact Mechanics, Cambridge University Press, 2010, ISBN: 0-521-34796-3.
38. [Kim, 2005] Kim H.S., Mall S., Investigation into three-dimensional effects of finite contact width on fretting fatigue, Finite Element in Analysis and Design, Vol. 41, 2005, pp. 1140–1159.
39. [Kimura, 2003] Kimura T., Sato K., Simplified method to determine contact stress distribution and stress intensity factors in fretting fatigue, International Journal of Fatigue 25 (2003) 633–640.
40. [Kmet, 2013] Kmet S., Stanova S., Fedorko G., Fabian M., Brodniansky J., Experimental investigation and finite element analysis of a four-layered spiral strand bent over a curved support, Engineering Structures, Vol. 57, 2013, pp. 475-483.
41. [Kunt, 2015] Kun L., Dumitru I., **Achiriloaiei D.**, Kun K.N, Influence of phase shift and amplitude ratio on the principal stresses and directions in multiaxial fatigue testing, Advanced Materials Research Vol 1111, pp 103-109, 2015.
42. [Levesque, 2009] Levesque F., Analyse de la fatigue par petits d'ebattements (fretting fatigue) de fils d'un conducteur électrique, Université Laval Quebec, 2009.
43. [Levesque, 2011] Levesque F., Goudreau S., Cloutier L., Cardou A., Finite element model of the contact between a vibrating conductor and a suspension clamp, Tribology International, Vol. 44, 2011, pp. 1014-1023.
44. [Lăzărescu, 2011] Lăzărescu I., Alumiuniul, Editura Tehnică, 1978.
45. [Locket, 1981] Locket, F.J., Cousins, R.R., Plast. Rubber Proc. Appl., 1, 25, 1981.
46. [Martins, 2008] Martins L.H.L., Rossino L.S., Filho W.W.B., Araujo J.A., Detailed design of fretting fatigue apparatus and tests on 7050-T7451 Al alloy, Tribology - Materials Surfaces and Interfaces, Vol. 2, 2008, pp. 39–49.
47. [Marşavina, 2011] Marşavina L., Dumitru I., Faur N., Kun L., Some Considerations on the Mechanical Testing of Aluminum-Steel Conductors and Their Cores, ISSN 1392 - 1207. Mechanika. 2011. 17(1): 8-11
48. [McConnell, 2006] McConnell K.G., Zemke W.P., A model to predict the coupled axial torsion properties of acsr electrical conductors, 2006.
49. [McGill, 1986] McGill P.B., Ramey G.E., Effect of suspension clamp geometry on transmission line fatigue, Journal of Energy Engineering, ASCE 1986, Vol 112(3), pp.168–184.
50. [Meteorologie, 2016] Serviciul hidrometeorologic de stat, www.meteo.md.
51. [Meteorologie, 2016] Administratia naţională de meteorologie, www.meteoromania.ro/anm.
52. [Mihalca, 1996] Mihalca D., Stanciu E., Particularitati ale regimului eolian in Banat, Universitatea de Vest, Timişoara, 1996.
53. [Mocanu, 2010] Mocanu F., Rezistenţa materialelor, 2010.
54. [Mocanu, 1982] Mocanu R. D., Încercarea materialelor, Încercări distructive ale metalelor, Editura Tehnica, Bucureşti, 1982.
55. [Neagu, 2013] Neagu B., Laborator Transportul şi distribuţia energiei electrice, 2013.
56. [Mohseni, 2014] Mohseni E., Zalnezhad E., Ahmed A. D. Sarhan, Bushroa A.R., A Study on Surface Modification of Al7075-T6 Alloy against Fretting

- Fatigue Phenomenon, Hindawi Publishing Corporation, Advances in Materials Science and Engineering, Volume 2014.
57. [Nemeş, 2001] Nemeş T., Petrescu V., Tehnologia materialelor, Ed. Univ. "Lucian Blaga", Sibiu, 2001
 58. [Neu, 2011] Neu R.W., Progress in standardization of fretting fatigue terminology and testing, Tribology International 44 (2011), 1371–1377.
 59. [Nenişescu, 1979] Nenişescu C.D., Trat de chimie anorganică, Editura Didactică și Pedagogică, 1979.
 60. [Neş, 2011] Neş C.S., Cercetări privind evaluarea numerică a parametrilor de mecanica ruperii, Ph.D thesis, Universitatea Politehnica Timișoara, 2011.
 61. [Ouaki, 1998] Ouaki B., Analyse expérimentale et théorique de l'endommagement par fatigue à petits débattements des fils de conducteurs électriques au voisinage d'une pince de suspension, Ph-D These, 1998.
 62. [Ordinul, 2012] Ordinul MDRT, Cod de proiectare evaluarea actiunii vântului asupra construcțiilor, 2012.
 63. [Qi, 2013] Qi Gang, Computational modeling for stress analysis of overhead transmission line stranded conductors under design and fretting fatigue conditions, Montreal, Canada, 2013.
 64. [Pauw, 2011] Pauw J., Baets P., Waele W., Review and classification of fretting fatigue test rigs, Sustainable Construction and Design 2011.
 65. [Perier, 2001] Perier V., Dieng L., Gaillet L., Fouvry S., Propagation d'une fissure par fatigue dans un fil de câble de haubanage, Congrès Français de Mécanique Marseille, 2009.
 66. [Poulios, 2013] Poulios K., Klit P., Implementation and applications of a finite-element model for the contact between rough surfaces, Wear 303(2013)1–8.
 67. [Radeş, 2010] Radeş M., Rezistența Materialelor I, Editura Printech, 2010.
 68. [Ramey, 1981] Ramey G.E., Townsend J.S., Effect of clamp on fatigue of ACSR conductors, Journal of Energy Division, ASCE (EYI) 1981, Vol. 107, pp.103–119.
 69. [Prodan, 2005] Prodan D., Cercetari privind contactul circular concentrat al suprafețelor rugoase în domeniul elastoplastic, Ph.D thesis, Suceava 2005.
 70. [Rizzo, 2002] Rizzo P., Di-Scalea F.L., Monitoring steel strands via ultrasonic measurements, Proc. SPIE 2002, Vol. 4696, 2002, pp. 62–73.
 71. [Roșu, 2014] Roșu C., Știința și ingineria materialelor - suport curs, Universitatea "Babeș-Bolyai", Cluj-Napoca, 2014.
 72. [Rucăreanu, 1989] Rucăreanu C., Militaru C., Hotoboc V., Chiricescu V., Prioteasa V., Linii electrice aeriene și subterane, Editura tehnica, București 1989.
 73. [Timoshenko, 1970] Timoshenko, S.P., Theory of Elasticity, 3rd edn. McGraw-Hill, New York, 1970.
 74. [Tripa, 1999] Tripa P., Rezistența materialelor, Curs Vol 1, editura Mirton, 1999.
 75. [Tudor, 2006] Tudor A., Tribosisteme Integrate, Note de curs, București, 2006.
 76. [Sadki, 2007] Sadki Y., Caractérisation des empreintes de contact de deux fils d'aluminium sous une force normale, Québec, 2007.
 77. [Savory, 2001] Savory E., Gerard A.R., Mostafa Zeinoddini, Norman Toy, Peter Disney, Modelling of tornado and microburst-induced wind loading and failure of a lattice transmission tower, Engineering Structures 23 (2001) 365–375.
 78. [Stanescu, 2004] Stanescu C., Chirlesan G., Studiu privind efectul îmbătrânirii asupra proprietăților și structurii unor materiale compozite pe bază de

- polipropilenă încărcată cu talc Partea I – Analiză termică diferențială, Materiale plastice, 2004.
79. [STAS 7927-67] STAS 7927-67, Încercările metalelor. Încercarea de rezistență la forfecare pură
 80. [Suzanne, 2011] Suzanne Guerard, Power Line Conductors, a Contribution to the Analysis of their Dynamic Behaviour, Ph.D thesis, 2011.
 81. [Șandor, 2005] Șandor I., B., Hidrodinamica echipamentelor de reglare pentru acționari hidraulice, Editura Orizonturi Universitare, Timișoara 2005.
 82. [Șișak, 2011] Șișak I., Contribuții la studiul fenomenului de fluaj la conductoarele liniilor electrice aeriene de înalta tensiune din oțel-aluminiu, Ph.D thesis, UPT Timișoara 2005.
 83. [Standarde, 1984-I] Standarde generale, mașini și aparate de încercat, încercări tehnologice, CSIM-ISIM Timișoara, vol.I, 1984.
 84. [Standarde, 1984-II] Standarde generale, mașini și aparate de încercat, încercări tehnologice, CSIM-ISIM Timișoara, vol.II, 1984.
 85. [SR EN ISO 6892-1, 2010] SR EN ISO 6892-1, Standard român de încercare la tracțiune, 2010.
 86. [Tuiasi, 2016] Siteul Unicersității Politehnica Iași, www.mec.tuiasi.ro/rm/
 87. [Vizureanu, 2011] Vizureanu P., SEM Metode si tehnici de cercetare în domeniu, Ph.D thesis, Brașov, 2011.
 88. [Vodă, 2009] Vodă M., Codrean C., Comportamentul la oboseală al materialelor metalice, Editura Politehnica, Timișoara, 2009.
 89. [Voiconi, 2015] Voiconi T., Caracterizarea mecanică a spumelor metalice și a structurilor care conțin spume metalice, Ph.D thesis, Universitatea Politehnica Timișoara, 2015.
 90. [Wikipedia, 2016] Wikipedia, www.wikipedia.org.
 91. [Wilson, 2007] Wilson M., Hurlebaus S., Power line monitoring, Proceedings of the 2007 American Control Conference, 2007, pp. 231–235.
 92. [Wind, 1979] Wind-Induced Vibration, Transmission Line Reference Book, Electric Power Research Institute, 1979.
 93. [Zhou, 2006] Zhou Z.R., Nakazawa K., Zhu M.H., Maruyama N., Kapsa P., Vincent L., Progress in fretting maps, Tribology International 39 (2006) 1068–1073.
 94. [Zhu, 2014] Zhu Hui-ling, Zhu Xin-yin, Wang Yu-lin, Numerical analysis of sliding friction coefficient and the normal pressure between the cable wire, International journal on smart sensing and intelligent systems vol. 7, no. 4, 2014.
 95. [Zoițanu, 2012] Zoițanu E.L., Monitorizare și predicție pentru liniile electrice în cablu, Ph.D thesis, Brașov, 2012.