

# **MODALITĂȚI DE ÎMBUNĂTĂȚIRE A CARACTERISTICILOR ȘI FIABILITĂȚII ARCURILOR PENTRU VEHICULE DE CALE FERATĂ**

Teză destinată obținerii  
titlului științific de doctor inginer  
la  
Universitatea "Politehnica" din Timișoara  
în domeniul ȘTIINȚA ȘI INGINERIA MATERIALELOR  
de către

**Ing. Dorel Popa**

Conducător științific:           prof.univ.dr.ing . Ioan Carțiț  
Referenți științifici:

Ziua susținerii tezei: 2008

Seriile Teze de doctorat ale UPT sunt:

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

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

Copyright © Editura Politehnica – Timișoara, 2008

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

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

## Cuvânt înainte

**Popa, Dorel**

**Modalități de îmbunătățire a caracteristicilor și fiabilității arcurilor pentru vehicule de cale ferată**

Teze de doctorat ale UPT, Seria 11, Nr. 13, Editura Politehnica, 2008, 292 pagini, figuri, tabele.

ISSN: 1842-7855

ISBN: 978-973-625-618-9

**Cuvinte cheie:**

**Rezumat:**



# CUPRINS

<b>INTRODUCERE</b>	4
<b>1. TIPURI DE ARCURI METALICE UTILIZATE LA VEHICULE DE CALE FERATĂ</b>	6
1.1. Considerații generale privind elementele elastic metalice	6
1.2. Arcuri elicoidale	7
1.2.1. Elemente de calcul și proiectare a arcurilor elicoidale cilindrice	7
1.2.2. Efecte dinamice la arcurile elicoidale cilindrice	12
1.2.3. Rigiditatea laterală a arcurilor elicoidale	14
1.2.4. Arcuri elicoidale multiple din bare cu secțiunea circulară	15
1.2.5. Dinamica arcului elicoidal	17
1.2.6. Soluția numerică a propagării deformației în arcurile elicoidale elastice	25
1.3. Arcuri lamelare	35
1.3.1. Considerații generale	35
1.3.2. Tipuri de suspensii progresive cu arcuri lamelare	37
1.3.3. Elemente de calcul al arcurilor lamelare	38
1.3.4. Caracteristicile arcurilor lamelare	42
1.4. Elemente elastice formate din inele tip RINGFEDER	45
1.4.1. Generalități	45
1.4.2. Calculul presiunii dintre inele	46
1.4.3. Capacitatea de acumulare a energiei de șoc și caracteristica arcului inelar	48
1.5. Calculul cu ajutorul metodei elementului finit (MEF)	51
1.5.1. Fundamentele modelării cu element finit	51
1.5.2. Tipuri de elemente finite	52
1.5.3. Alegerea tipurilor de elemente	63
1.5.4. Principii de modelare	66
1.5.5. Aplicarea condițiilor limită	70
1.5.6. Aplicarea sarcinilor	72
1.5.7. Componente structurale rigide	74
1.5.8. Limite înclinate	75
1.5.9. Recomandări pentru evaluarea tensiunilor	76
1.6. Calculul cu ajutorul metodei elementelor finite (MEF) utilizând programul ALGOR	76
1.6.1. Prezentarea programului ALGOR	76
1.6.2. Calculul pentru arcurile elicoidale ale suspensiei boghiurilor Y25Lsdi	79
1.7. Concluzii	80
<b>2. MATERIALE UTILIZATE LA CONFECTIONAREA ARCURILOR METALICE CA ELEMENTE ELASTICE CE ECHIPEAZĂ VEHICULELE FERROVIARE</b>	105
2.1. Generalități	105
2.2. Arcuri pentru vagoane de cale ferată	106
2.2.1. Caracteristici fizice	106
2.2.2. Caracteristici geometrice	106

2.2.3. Caracteristici mecanice	107
2.2.4. Parametrii funcționali ai arcurilor	107
2.3. Oțeluri pentru arcuri formate la cald și tratate termic	107
2.3.1. Caracteristici cerute	108
2.3.2. Caracteristici mecanice	109
2.4. Probe	112
2.4.1. Numărul de eșantioane din produse	112
2.4.2. Eșantioane și epruvete	119
2.4.3. Metode de probă	119
2.4.4. Contra - probe	121
2.4.5. Certificarea probelor	121
2.5. Defecte și toleranțe dimensionale	121
2.6. Concluzii asupra materialelor utilizate la fabricarea arcurilor	121
<b>3. CONTRIBUȚII LA TEHNOLOGIA DE FABRICAȚIE A ARCURILOR</b>	124
3.1. Materiale	124
3.1.1. Generalități	124
3.1.2. Condiții tehnice	125
3.2. Tehnologia de execuție a arcurilor elicoidale cilindrice de compresiune	126
3.3. Analiza tehnologiei și măsuri de îmbunătățire	137
3.3.1. Materialul și starea barelor	137
3.3.2. Tehnologia de înfășurare	138
3.3.3. Prelucrarea mecanică a suprafețelor de așezare	141
3.3.4. Tratamentul termic volumic	144
3.3.5. Ecrusarea	148
3.4. Verificări ale arcurilor executate conform tehnologiei actuale	148
3.4.1. Materiale	148
3.4.2. Studiu asupra tratamentului termic al arcurilor	149
3.5. Concluzii	153
<b>4. TRATAMENTE TERMICE APLICATE ARCURILOR METALICE</b>	168
4.1. Clasificarea și caracterizarea tratamentelor termice	168
4.1.1. Tipuri de tratamente termice aplicate aliajelor feroase	168
4.1.2. Caracterizarea tratamentului termic	169
4.1.3. Parametrii tratamentelor termice	171
4.1.4. Descrierea tratamentelor termice	175
4.2. Tratamentul termic al arcurilor	181
4.2.1. Generalități	181
4.2.2. Tratamente termice primare aplicate arcurilor	182
4.2.3. Tratamente termice secundare aplicate arcurilor	183
4.3. Determinarea regimurilor optime de tratament termic ale arcurilor	190
4.3.1. Generalități	190
4.3.2. Experimentări de laborator privind optimizarea regimurilor de tratament termic	191
4.4. Concluzii	198
<b>5. STUDII PRIVIND INFLUENȚA ECRUISĂRII CU BILE ASUPRA CREȘTERII REZISTENȚEI LA OBOSEALĂ PENTRU ARCURILE ELICOIDALE</b>	200
5.1. Controlul eficacității ecrusării prin metoda ALMEN	200
5.2. Analiza tehnologiei actuale	202
5.3. Îmbunătățirea procesului de ecrusare	204
5.4. Alte metode de îmbunătățire a procesului de ecrusare	207

---

5.5. Experimente privind îmbunătățirea procesului de ecrusare	208
5.6. Concluzii	211
<b>6. DETERMINAREA CARACTERISTICILOR MECANICE ȘI A REZISTENȚEI LA OBOSEALĂ PENTRU ARCURILE ELICOIDALE</b>	213
6.1. Introducere	213
6.2. Definiții, terminologie, simboluri	213
6.3. Rezistență la oboseală	216
6.3.1. Determinarea experimentală a rezistenței la oboseală	216
6.3.2. Clasificarea mașinilor de încercat la oboseală	216
6.3.3. Clasificarea metodelor de încercare	219
6.3.4. Epruvete pentru încercări la oboseală	221
6.4. Comportarea la oboseală a arcurilor elicoidale cu secțiune cilindrică	227
6.4.1. Arc elicoidal de secțiune $\Phi 24,4$ mm	227
6.4.2. Arcuri elicoidale cu secțiunea $\Phi 30$ mm și $\Phi 31$ mm	239
6.5. Concluzii	256
<b>7. ÎNCERCĂRI SPECIFICE PENTRU DETERMINAREA FIABILITĂȚII</b>	257
7.1. Concepte fundamentale	257
7.1.1. Conceptul de fiabilitate	257
7.1.2. Conceptele de mentenabilitate, mentenanță și disponibilitate	259
7.1.3. Conceptul de calitate	261
7.1.4. Modalități de creștere a fiabilității și a mentenabilității	262
7.1.5. Indicatori de fiabilitate	264
7.1.6. Controlul fiabilității	267
7.2. Probe amortizor aparat tracțiune pentru vagon AVA 200	270
7.2.1. Echipamente de testare	270
7.2.2. Metodologia de încercare și rezultatele încercărilor	270
7.3. Verificarea arcurilor elicoidale	276
7.4. Concluzii	283
<b>8. CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE</b>	285
8.1. Concluzii	285
8.2. Contribuții personale	293
<b>BIBLIOGRAFIE</b>	297

## INTRODUCERE

Transportul feroviar, aflat într-o competiție acerbă cu celelalte mijloace de transport are o pondere importantă în majoritatea țărilor din lume prin tendința de creștere a vitezelor de circulație, a capacității de transport precum și a costurilor competitive oferite.

Creșterea vitezelor de circulație, a sarcinii pe osie au impus o abordare specială a problemelor de siguranță în circulație în general. Siguranța în circulație este strict legată de elementele elastice și în speță de arcurile metalice ce intră în componența suspensiei vehiculelor și a izolatoarelor de șoc ce echipează vehiculele.

În mod imperativ se impune realizarea unor studii teoretice în faza de proiectare a arcurilor pe baza unor programe de simulare adecvate, cum este cel utilizat în lucrare (elemente finite, program ALGOR), a căror rezultate pot conduce la concluzii edificatoare respectiv măsuri și soluții ce pot fi adoptate.

Oricum cercetările experimentale prezentate în lucrare au în mod nemijlocit calitatea de a da un verdict final asupra comportării în exploatare a arcurilor metalice asigurând în acest fel certitudinea fiabilității lor.

În vederea elaborării lucrării am efectuat o serie de cercetări teoretice și experimentale alături de alte abordări teoretice sau experimentale conținute în lucrare ce împreună pot fi edificatoare de soluții în abordarea acestui domeniu.

Lucrarea de față și-a propus să prezinte cercetările teoretice și experimentale sugerând următoarele contribuții în domeniu: adoptarea unor modele matematice și de calcul în faza de proiectare, contribuții la tehnologia de fabricare a arcurilor, metode de îmbunătățire a fiabilității lor alături de mijloacele experimentale ce să ratifice fiabilitatea și rezistența lor în exploatare.

Pentru îndrumarea profesională, pentru sprijinul de înaltă competență științifică acordat de-a lungul întregii perioade de doctorat parcurse, pentru încurajările, aprecierile și căldura sufletească pe care le-am simțit în permanență aduc mulțumirile mele și respectul cuvenit conducătorului științific, celui care a fost rector al Universității Politehnica Timișoara, prof.univ.dr.ing. Ioan Carțiș.

Călduroase mulțumiri adresez colectivului catedrei de Știința Materialelor și Tratamente Termice din Facultatea de Mecanică a Universității Politehnica Timișoara de a căror colaborare și prietenie am beneficiat pe întreaga perioadă de doctorat.

Mulțumesc prof.dr.ing. Ion Copaci, doamnei ș.l.dr.ing. Aurelia Tănăsioiu, ș.l.dr.ing. Gheorghe Huțiu, ing. Virgil Ișvănoiu și, implicit întreprinderii S.C. ASTRA Vagoane Arad, Grup I.R.F. pentru generozitatea și înțelegerea domniilor lor față de toate solicitările mele.

Mulțumesc cu dragoste familiei pentru atașament, dragoste, înțelegere și ajutor.

În speranța că lucrarea reușește să aducă o contribuție în domeniul elementelor elastice de tip arc metalic utilizate în echiparea vehiculelor feroviare, încerc sentimentul că experiența acumulată și rezultatele prezentate sunt pe măsura efortului meu și desigur și a sprijinului de care am beneficiat.

# CAPITOLUL 1

## TIPURI DE ARCURI METALICE UTILIZATE LA VEHICULE DE CALE FERATĂ

### 1.1. Considerații generale privind elementele elastice metalice.

Elementele elastice metalice, sub formă de arcuri elicoidale, arcuri bară de torsiune și arcuri lamelare, ele sunt larg utilizate la vehiculele pe șine ca elemente de suspensie. Ca și celelalte tipuri de elemente elastice folosite la suspensii, arcurile metalice sunt organe de mașini cu o mare elasticitate. Datorită acestui fapt ele înmagazinează un lucru mecanic de deformare pe care îl redau (în cea mai mare parte) când acțiunea sarcinii a încetat. Folosirea acestei proprietăți conduce, în funcție de condițiile impuse suspensiei în plan vertical și orizontal, de spațiul disponibil pentru montarea arcului, de mărimea și felul solicitării, la diferitele tipuri de arcuri[46].

Arcurile elicoidale ca și arcurile bară de torsiune, în comparație cu arcurile lamelare, au un grad ridicat de utilizare a materialului, tehnologia de fabricare și reparare este relativ simplă, nu necesită întreținere în exploatare și sunt sensibile la perturbații mici.

Un avantaj important al arcurilor elicoidale constă în faptul că elasticitatea transversală a arcului elicoidal poate fi folosită pentru asigurarea rapelului transversal al cutiei vehiculului, ca în cazul boghiurilor moderne de mare viteză. Fiind lipsite de frecare, aceste arcuri nu amortizează oscilațiile și de aceea este necesar ca suspensia care conține astfel de arcuri să cuprindă și amortizoare.

Arcurile lamelare prezintă avantajul amortizării oscilațiilor datorită frecării dintre lamele, care începe în momentul în care se aplică forța exterioară și, prin deformarea arcului, se produce alunecarea dintre ele. Arcul începe să înmagazineze lucru mecanic prin deformare numai după ce forța de frecare corespunzătoare încărcării a fost învinsă. Șocurile provocate de variațiile de forțe inferioare forței de frecare dintre lamele sunt transmise direct vehiculului, fără amortizare. Arcul este prin urmare insensibil la perturbații mici. Acest fapt a restrâns domeniul de utilizare al arcurilor lamelare la vehiculele care nu necesită realizarea unui confort ridicat.

Proiectarea și dimensionarea arcurilor pentru diferite vehicule este precedată de un studiu teoretic al oscilațiilor vehiculului, în urma căruia se stabilesc principalele date inițiale de calcul, ca: solicitări, săgeți impuse, caracteristica arcului, frecvențe perturbatoare, etc.

Pentru ca în caz accidental să nu se depășească tensiunea admisibilă care a fost considerată la dimensionarea arcului și totodată să nu fie depășită diferența de înălțime admisă a tampoanelor vehiculului, se prevăd limitatoare de săgeată a arcului.

O atenție deosebită trebuie să se acorde proiectării arcurilor elicoidale destinate vehiculelor de mare viteză, întrucât la aceste arcuri există pericolul apariției unor tensiuni considerabile datorate efectelor dinamice care se produc

atunci când frecvența perturbațiilor exterioare coincide cu una dintre frecvențele proprii ale arcului (corespunzător unuia dintre modurile de vibrație).

## 1.2. Arcuri elicoidale

Arcurile elicoidale sunt executate din bare înfășurate după o elice pe un corp de înfășurare. În funcție de forma corpului de înfășurare a elicei arcurile pot fi: cilindrice, conice, parabolice, etc.

În general, arcurile elicoidale cilindrice cu secțiunea spirei circulară sau dreptunghiulară având caracteristica (sarcină-deformație) liniară sunt cele care se folosesc la suspensia vehiculelor pe șine. Caracteristica elastică progresivă a arcului elicoidal se poate obține prin folosirea arcurilor elicoidale conice sau a arcurilor cu pas variabil.

Suprafețele de așezare ale arcului se realizează prin subțierea capetelor acestuia în așa fel ca suprafețele exterioare ale ultimelor spire să fie cuprinse în câte un plan perpendicular pe axa arcului. În plus, prelucrarea capetelor arcului îmbunătățește centrarea sarcinii, micșorându-se pericolul de flambaj.

Există situații, ca de exemplu la unele construcții speciale de vehicule, la care condițiile standardizate sunt insuficient de restrictive față de condițiile de exploatare în care trebuie prevăzute condiții speciale pentru proiectarea, execuția și recepția arcurilor. În orice caz, dat fiind că producția de serie a arcurilor nu poate asigura din motive economice piese cu caracteristici suficient de omogene, este necesar să se prevadă încă de la proiectare posibilitatea de a efectua reglări pe vehicul pentru corectarea acestor diferențe[30].

### 1.2.1. Elemente de calcul și proiectare a arcurilor elicoidale cilindrice

Pentru stabilirea relațiilor de calcul se consideră un arc elicoidal cilindric cu principalele elemente geometrice prezentate în fig. 1.1. comprimat de sarcina P. Pentru calcule practice se neglijează efectul solicitării de încovoiere și de forfecare a

arcului, considerându-se numai solicitarea de răsucire prin momentul  $M_t \approx \frac{PD_m}{2}$ ,

relațiile de calcul pentru tensiunea tangențială  $\tau$ , săgeata  $f$  a arcului și rigiditatea

$c = \frac{P}{f}$  fiind următoarele:

- pentru arc cu secțiunea circulară:

$$\tau = \frac{8\rho PD_m}{\pi d^3} \quad (a);$$

$$f = \frac{8PD_m^3 n}{Gd^4} \quad (b); \quad (1.1)$$

$$c = \frac{Gd^4}{8nD_m^3} \quad (c);$$

- pentru arc cu secțiunea dreptunghiulară:

$$\tau = \frac{\Psi P D_m}{(bh)^2} \quad (a);$$

$$f = \frac{\Omega P D_m^3 n}{G(bh)^2} \quad (b);$$

$$c = \frac{G(bh)^2}{\Omega n D_m^3} \quad (c);$$

în care:

- $n$  - reprezintă numărul de spire active;
- $G$  - modul de elasticitate transversal;
- $\Psi$  - coeficientul de formă;
- $\Psi$  și  $\Omega$  - coeficienți de corecție.

Coeficienții  $\Psi$ ,  $\Psi$  și  $\Omega$  țin seama de influența curburii spirei asupra distribuției tensiunii pe periferie. Astfel, în cazul spirei cu secțiune circulară, valoarea maximă a tensiunii este pe partea spirei mai apropiată de axa arcului iar la arcurile cu secțiune dreptunghiulară tensiunea are valoare mai ridicată pe mijlocul laturii interioare.

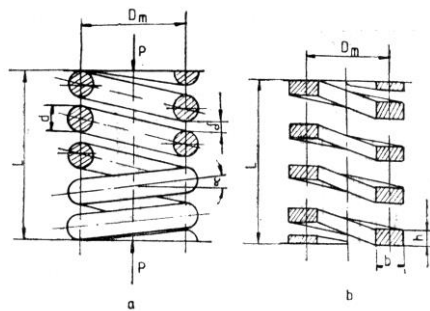


Fig 1.1. Arcuri elicoidale cilindrice:  
a - arc cu spire de secțiune circulară;  
b - arc cu spire de secțiune dreptunghiulară;

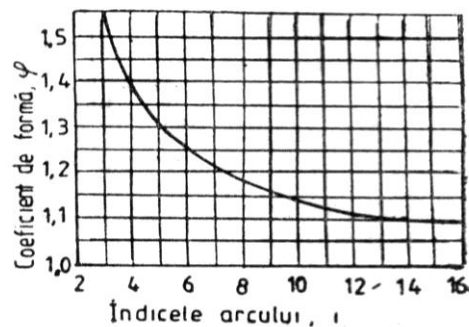


Fig 1.2. Coeficientul de formă pentru arcuri elicoidale cu secțiune circulară funcție de indicele arcului

Coeficientul de formă  $\Psi$  este dependent de valoarea indicelui arcului

$$i = \frac{D_m}{d}$$

(fig. 1.2). O expresie pentru acest coeficient recomandată în EN 13906, este:

$$\varphi = \frac{i + 0,5}{i - 0,75} \quad (1.3)$$

Coefficienții de corecție  $\Psi$  și  $\Omega$  pentru arcul cu secțiunea dreptunghiulară depind de raportul laturilor  $\frac{h}{b}$  sau  $\frac{b}{h}$  și de poziția secțiunii față de axa arcului, apreciată prin indicele  $i = \frac{D_m}{b}$  (fig. 1.3).

La dimensionarea arcului se urmărește determinarea dimensiunilor arcului fiind date sarcina statică  $P_o$  și săgeata statică  $f_o$  care rezultă din studiul oscilațiilor vehiculului, iar indicele  $i$  al arcului și rezistența admisibilă  $\tau_a$  se aleg [8]. Se recomandă la arcurile cu secțiunea circulară  $i = 4 \dots 10$  pentru arcuri înfășurate la cald. Valorile minime ale indicelui  $i$  nu trebuie să fie atinse decât în cazuri extreme și anume când, din cauza restricțiilor de gabarit, nu se poate alege o altă valoare. În acest caz se impun condiții de fabricare și control foarte precise deoarece pot să apară fisuri la înfășurarea arcurilor.

În timpul rulării, pe lângă sarcina  $P_o$ , arcul se încarcă suplimentar din mai multe cauze, ca forța centrifugă necompensată care acționează asupra părților suspendate ale vehiculului la trecerea prin curbe, presiunea vântului, forțele de inerție la pornirea și oprirea vehiculului și din alte cauze, printre care cea mai importantă este suprasarcina dinamică datorită oscilațiilor vehiculului. Această componentă suplimentară se calculează cu relația  $\Delta P = k_d P_o$ , astfel că valoarea maximă a sarcinii verticale va fi:

$$P_{max} = P_o (1 + k_d) \quad (1.4)$$

în care coeficientul  $k_d$  denumit *coeficient dinamic*, depinde de rigiditatea suspensiei, de calitatea căii, de viteza de mers, etc.

În calculele de suspensie se recomandă  $k_d = 0,3$  pentru suspensia primară și  $k_d = 0,2$  pentru suspensia secundară. Având aceste date cunoscute, din relațiile (1.1) rezultă următoarele formule de calcul ale arcurilor cu secțiunea circulară:

$$\begin{aligned} d &= \sqrt{\frac{8P_o f_o}{\pi \tau_a}} \quad (a); \\ D_m &= i d \quad (b); \\ n &= \frac{G d f_o}{8 P_o D_m^3} \quad (c). \end{aligned} \quad (1.5)$$

La dimensionarea arcurilor cu secțiunea dreptunghiulară se adoptă raportul  $\gamma = \frac{b}{h}$  și indicele  $i$  al arcului. Se recomandă valori supraunitare pentru  $\gamma$ , respectiv



$\gamma = 1 \dots 5$ , din motive de stabilitate al arcului la flambaj. În funcție de aceste valori adoptate, din nomogramele prezentate în fig. 1.3. Se determină valorile coeficienților  $\Psi$  și  $\Omega$ . Din relația (1.2) se obțin următoarele relații de calcul pentru arcul cu secțiunea dreptunghiulară:

$$\begin{aligned} b &= \gamma^4 \sqrt{\frac{\Psi P_i}{\tau_a}} & (a); \\ h &= \frac{b}{\gamma} & (b); \\ D_m &= ib & (c); \\ n &= \frac{C(bh)^2 f}{\Omega P_m^3} & (d). \end{aligned} \tag{1.6}$$

Pe lângă spirele active, arcul are și un număr  $n$ , de spire inactive (de reazem), numărul total de spire fiind  $n_t = n + n_r$ . În EN 13906 se recomandă  $n_r = 1,5$  sau  $n_r = 2$  pentru arcurile elicoidale cilindrice cu secțiune circulară prelucrate la cald.

Pentru calculul celorlalte elemente caracteristice ale arcurilor elicoidale cilindrice se pot utiliza lucrările [7], [31], [33],[76],[77],[78], ș.a.

În cazul unei lungimi mari  $L_o$ , a arcului liber în raport cu diametrul  $D_m$ , acesta poate să-și piardă stabilitatea în direcția perpendiculară pe axa arcului, putând deci flamba. Instabilitatea mai este influențată de modul cum sunt fixate (se reazemă) capetele arcului, de secțiunea spirei, de direcția forței aplicate în raport cu axa arcului. Pentru arcurile elicoidale cilindrice cu secțiunea circulară verificarea la flambaj se face cu ajutorul diagramei prezentate în fig. 1.4 în funcție de coeficientul

de zveltețe  $\lambda = \frac{L_o}{D_m}$  și coeficientul de arcuire  $a = f/L_o$ .

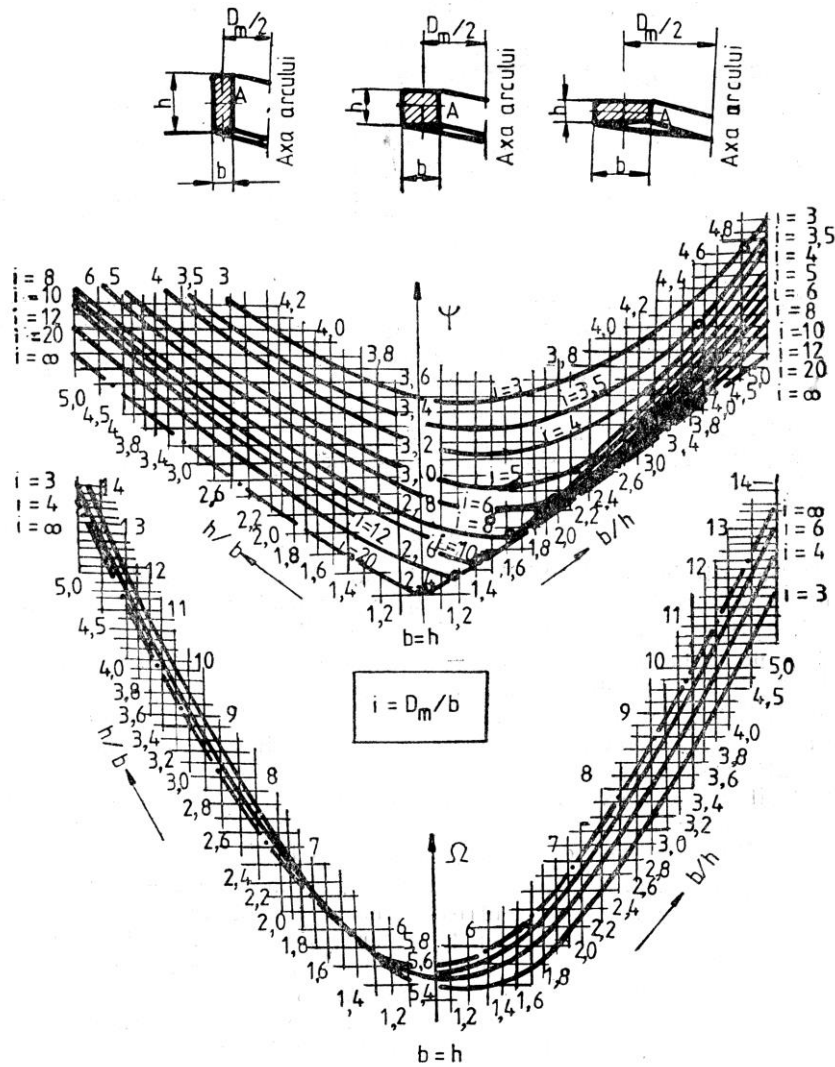


Fig 1.3 Nomogramă pentru determinarea coeficienților  $\Omega$  și  $\Psi$

Arcurile care nu pot fi executate în limitele rezistenței la flambaj trebuie ghidate pe dorn sau în bucă, soluție care însă prezintă dezavantajul deteriorării suprafeței arcului (diminuând rezistența la oboseală).

Arcurile utilizate la vehiculele feroviare fiind solicitate dinamic, la sarcini variabile, se va face verificarea rezistenței la oboseală. Verificarea se face calculând tensiunea la cursa de lucru  $\tau_h = \tau_2 - \tau_1$ , conform fig. 1.5. Tensiunea  $\tau_h$  nu trebuie

16 Tipuri de arcuri metalice utilizate la vehicule de cale ferată - 1

să depășească tensiunea la cursa de lucru la oboseală  $\tau_H$  (admisă din diagrame de tipul celei din fig. 1.6, conform EN 13906).

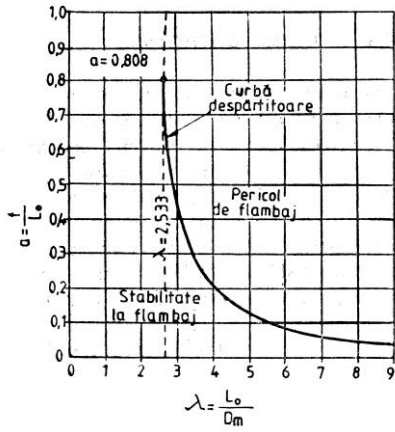


Fig. 1.4. Diagrama de stabilitate pentru arcuri elicoidale cilindrice cu secțiunea circulară.

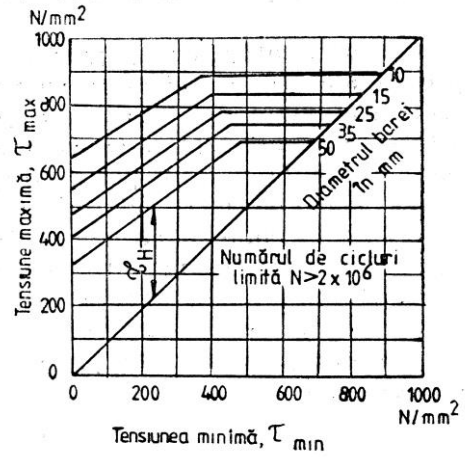


Fig. 1.5. Diagramă pentru verificarea arcului la oboseală

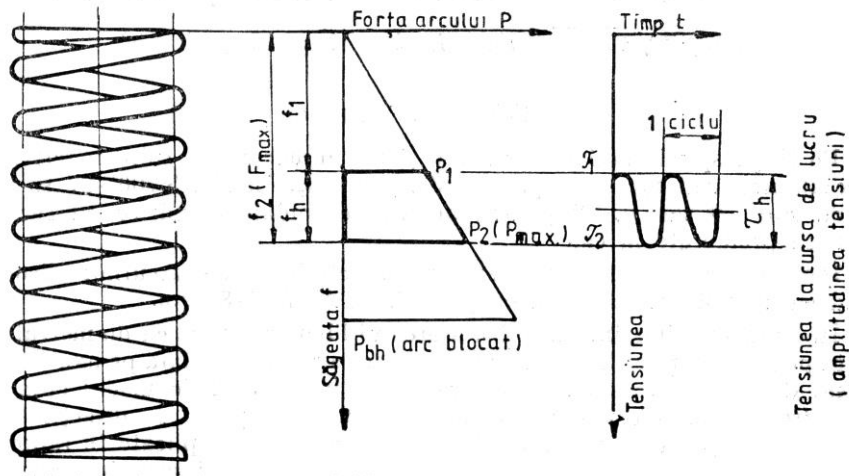


Fig. 1.6. Solicitări la sarcini variabile ale arcurilor elicoidale cilindrice.

### 1.2.2. Efecte dinamice la arcurile elicoidale cilindrice

Calculul arcurilor, în general, se face fără a lua în considerare oscilațiile proprii ale arcului, adică se consideră că sarcina se aplică lent într-un timp mult mai mare decât perioada pulsațiilor proprii. Această ipoteză nu este întotdeauna aplicabilă, ca de exemplu la arcurile suspensiei primare când roata vehiculului trece peste neuniformități scurte ale căii de rulare, sau la viteze mari de mers, când intervine pericolul ca frecvența perturbațiilor exterioare să coincidă cu una dintre frecvențele proprii ale arcului (corespunzător unuia dintre modurile de vibrație). În această situație, arcul poate suferi efecte dinamice suplimentare, care măresc în mod considerabil efortul unitar din materialul arcului.

Frecvența vibrațiilor proprii, pentru un arc elicoidal cilindric fixat la capete, este:

$$v_j = \frac{j}{2} \sqrt{\frac{c}{m}} \quad (1.7)$$

în care:  $j=1, 2, 3, \dots$  - este indicele corespunzător modului de vibrație;

$$m = \frac{\pi d^2 D_m \gamma}{4g} - \text{masa arcului ( } g=98 \text{ m/s}^2 \text{ - accelerația căderii libere).} \quad (1.8)$$

Pentru arcuri din oțel cu greutatea specifică  $\gamma=7850 \text{ N/m}^3$  și  $G=81000 \text{ N/m}^2$ , frecvența proprie corespunzătoare primului mod de vibrație (pentru  $j=1$ ) este:

$$v_1 = \frac{35810}{D_m^3 n}, \quad (1.9)$$

în care diametrele  $d$  și  $D_m$  sunt exprimate în cm.

De exemplu, pentru un arc având  $d=28 \text{ cm}$ ,  $D_m=15 \text{ cm}$  și  $n=4$ , se obține  $v_1=69 \text{ Hz}$ . Această valoare însă este în banda de frecvență care corespunde maselor nesuspendate ale vehiculelor și deci dacă arcul este în suspensia primară, poate să apară pericolul rezonanței care să ducă chiar la ruperea arcului.

Pentru reducerea eforturilor în arcuri datorate efectelor dinamice se pot folosi metodele următoare: mărirea frecvenței proprii a arcului prin modificarea parametrilor care intervin în relația (1.9), bineînțeles în cadrul spirelor în apropierea capetelor arcului, micșorarea pasului spirelor în apropierea capetelor arcului, pentru a schimba frecvența proprie prin apropierea acestor spire în timpul oscilației; intercalarea unor plăci de cauciuc între suprafețele de sprijin ale arcului și talerele de fixare.

18 Tipuri de arcuri metalice utilizate la vehicule de cale ferată - 1

La solicitarea arcurilor sub sarcini aplicate brusc (cu șoc) apar tensiuni tangențiale suplimentare datorate undei produse de lovitură, care străbate cu viteză mare spirele active și se reflectă în spirele de reazem, fenomenul repetându-se de câteva ori.

Mărirea tensiunilor suplimentare nu depinde de dimensiunile arcului, ci numai de viteza  $V_s$  a impactului:

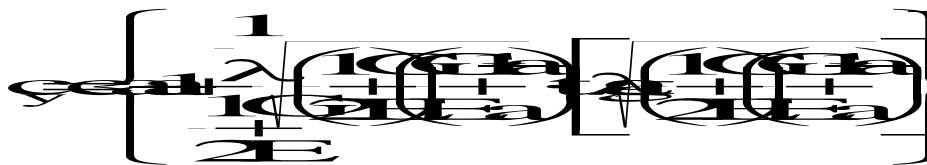
$$\tau = V_s \sqrt{\frac{\alpha E N}{g R^2}} \quad (1.10)$$

Relația (1.10) nu ține seama de reflexia undei în spirele de reazem și de lovirea spirelor active între ele.

**1.2.3. Rigiditatea laterală a arcurilor elicoidale**

Arcul elicoidal cilindric, comprimat vertical, are capacitatea de a se deforma elastic sub acțiunea unei forțe transversale conform fig. 1.7.

Admițând că spirele de reazem păstrează contactul cu suprafețele între care sunt așezate, rigiditatea transversală devine:



$$F = \frac{c}{2} y \quad (1.11)$$

unde c este rigiditatea axială dată de relația (1.2,c).

Tensiunea tangențială maximă, conținând tensiunile arcuirii axiale transversale, se calculează cu formula:



$$\tau_{max} = \frac{F}{A} \left( 1 + \frac{R}{r} \right) \quad (1.12)$$

Condiția pentru așezarea spirelor de reazem:

$$\frac{F}{2} \leq \frac{R D_m - y}{2} \quad (1.13)$$

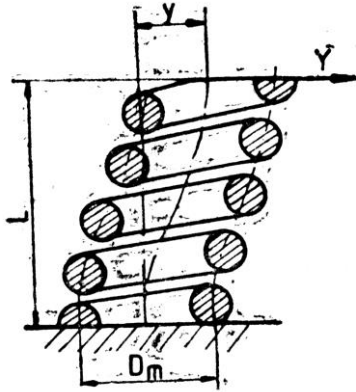


Fig. 1.7. Arc elicoidal sub sarcină axială și laterală

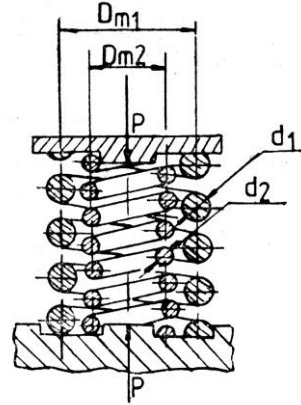


Fig. 1.8. Arc elcoidal dublu.

Dezvoltarea sistemelor de suspensii cu arc „flexicoil” la boghiurile vehiculelor de mare viteză se bazează pe caracteristica laterală a arcurilor elicoidale [49].

**1.2.4. Arcuri elicoidale multiple din bare cu secțiunea circulară**

În cazul unor sarcini de valoare mare, pentru un arc simplu, ar rezulta diametre de înfășurare inacceptabile din punct de vedere al spațiului disponibil pe vehicul. În acest caz se folosesc mai multe arcuri elicoidale cu secțiunea spirei mai mică, montate unul în interiorul celuilalt (fig. 1.8). Se realizează astfel un arc multiplu, arcurile lucrând în paralel. Un arc multiplu este format, în general, din două arcuri simple și mai rar din trei.

Relațiile de calcul pentru arcurile multiple se stabilesc în baza următoarelor ipoteze: pentru a avea o utilizare rațională a materialului, eforturile unitare în toate arcurile trebuie să fie aceleași, ceea ce este posibil prin alegerea corespunzătoare a diametrelor spirelor; arcurile se deformează sub acțiunea forței exterioare cu aceeași săgeată; arcurile trebuie să fie comprimate la limită în același timp.

Încărcarea arcului multiplu trebuie să fie evident egală cu suma încărcărilor arcurilor componente.

La dimensionare, fiind cunoscute sarcina  $P$  și săgeata arcului  $f$ , se face întâi calculul lui  $d$ ,  $d_m$  și  $n$  considerând arc simplu. Se pune condiția ca acest arc să fie echivalent celui multiplu, adică tensiunea tangențială  $\tau$ , săgeata  $f$  și lungimea arcului blocat egale cu cele ale arcurilor componente. Astfel, pentru un arc dublu, rezultă relațiile de calcul:

$$\frac{D_m}{d} = \frac{D_{m1}}{d_1} = \frac{D_{m2}}{d_2};$$

$$n d = n_1 d_1 = n_2 d_2 = n;$$

$$d^2 = d_1^2 + d_2^2. \tag{1.14}$$

20 Tipuri de arcuri metalice utilizate la vehicule de cale ferată - 1

Pentru ca spirele arcurilor să nu se atingă în timpul funcționării arcului, între acestea se lasă un spațiu minim  $s = 3 \dots 5$  mm. De asemenea spirele au sensuri de înfășurare diferite pentru a se evita întrepătrunderea acestora în timpul funcționării arcului. Prin urmare, la arcul dublu, mai trebuie să fie îndeplinite condițiile:

$$i_1 d_1 = i_2 d_2 \quad (1.15)$$

În cazul vehiculelor cu sarcini variabile, ca de exemplu vagoanele de marfă, pentru a se asigura stabilitatea arcurilor și la sarcini reduse se folosesc arcuri multiple, în general duble (fig.1.9), la care arcurile componente au înălțimi diferite. Astfel, arcurile nu intră odată în funcțiune, ci încep a lucra împreună de la o anumită valoare a sarcinii (sarcina de comutare). Caracteristica arcului nu mai este continuu liniară, ci devine o linie frântă (fig. 1.10).

La aceste arcuri:

$$\begin{aligned} f &= f_1 = f_2 + f_c \\ P &= P_1 + P_2 \end{aligned} \quad (1.16)$$

unde  $f_c$  este săgeata corespunzătoare sarcinii de comutare  $P_c$ .

Cunoscând  $P$ ,  $f$ ,  $P_c$  și  $f_c$ , sarcinile statice pe cele două arcuri la săgeata  $f$  vor fi:

$$P_1 = \frac{P_c f}{f_c}; \quad P_2 = P - P_1. \quad (1.17)$$

Diametrele spirelor se calculează cu relațiile:

$$d_1 = \sqrt{\frac{8 P_1 i_1}{\pi \sigma}} \quad (a) \quad (1.18)$$

$$d_2 = \sqrt{\frac{8 P_2 i_2}{\pi \sigma}} \quad (b)$$

în care indicii arcurilor  $i_1$  și, respectiv,  $i_2$  se adoptă astfel încât să fie respectată condiția ca între spire să existe spațiul  $s$ :

$$i_1 d_1 + i_2 d_2 = f + s \quad (1.19)$$

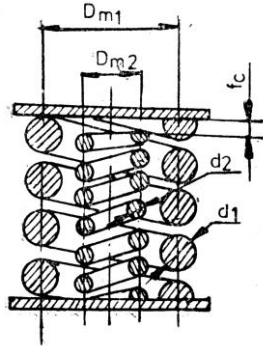


Fig. 1.9. Arc dublu format din arcuri de înălțimi diferite .

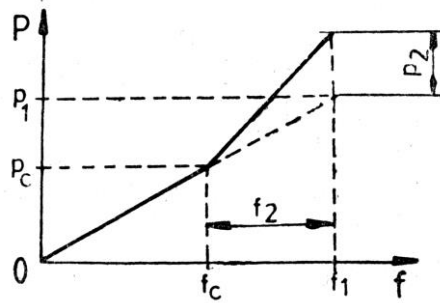


Fig. 1.10. Caracteristica arcului dublu

În cazul vehiculelor la care elasticitatea transversală este dată de arcurile de suspensie, se recomandă  $s=8..12\text{mm}$ , aceasta pentru a se evita întreruperea spirelor datorită deformației prin flexiune a arcului.

În fig. 1.11 sunt prezentate principalele caracteristici ale arcului dublu utilizat la boghiul Y 25 cu sarcina pe osie de 20 t.

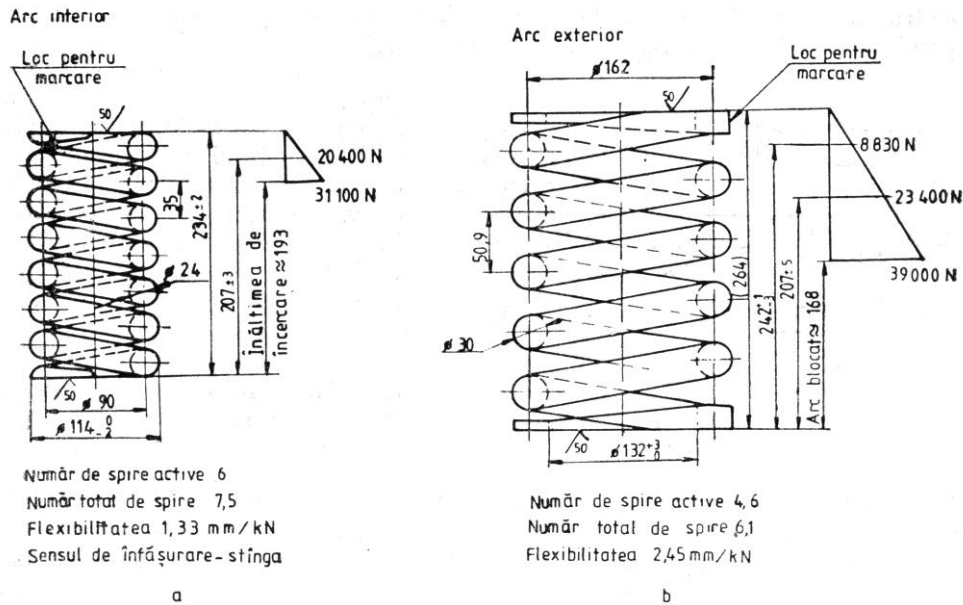


Fig. 1.11. Arcurile de suspensie ale boghiului Y 25.



### 1.2.5. Dinamica arcului elicoidal

#### 1.2.5.1. Comportamentul dinamic pe verticală.

Conform teoriei clasice, rigiditatea statică verticală  $k_z$  este dată de relația (Hooke):

$$k_z = k_v = \frac{ES}{h_0} \quad (\text{N / m}) \quad (1.20)$$

și ea determină relațiile dintre eforturile exterioare verticale  $F_0$ ,  $F_{h_0}$  și săgețile  $z_0$ ,  $z_{h_0}$  (indicii 0,  $h_0$  se referă la capătul de jos al arcului (0), respectiv la capătul de sus al arcului ( $h_0$ )) [43].

Rezultă:

$$\begin{aligned} F_0 &= k_v (z_0 - z_{h_0}) \\ F_{h_0} &= k_v (-z_0 + z_{h_0}) \end{aligned} \quad (1.21)$$

În cazul comportamentului dinamic pe verticală al arcului elicoidal [42] vom preciza limitele de validitate a relației (1.20).

Arcul studiat asigură legătura între două mase a căror mișcări verticale,  $z_0$  și  $z_h$  sunt presupuse pur sinusoidale, de pulsație  $\omega$  și amplitudini  $Z_0$  și  $Z_h$ . Eforturile dinamice corespunzătoare  $f_0$  și  $f_h$  sunt de asemenea sinusoidale, de aceeași pulsație  $\omega$  și de amplitudini  $F_0$  și  $F_h$  (figura 1.12).

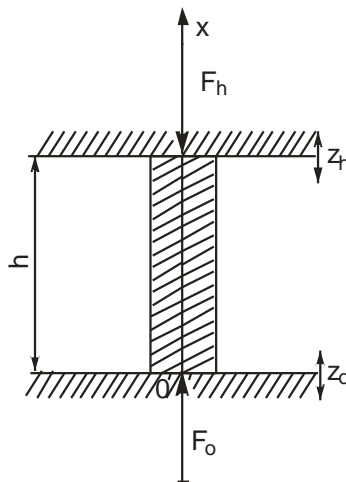


Figura 1.12. Schema arcului: comportamentul dinamic vertical

Amortizarea internă poate fi introdusă în mai multe feluri, unul dintre acestea fiind înlocuirea modului de elasticitate  $E$  prin mărimea complexă:

$$E_c = E + j \cdot \omega \cdot E' \quad (1.22)$$

și prin a lucra, fără a modifica formulele ce urmează, cu valori complexe ale eforturilor și deplasărilor, a căror parte reală și cea imaginară determină modulul și faza.

### 1.2.5.2. Matricea rigidității dinamice verticale

Matricea rigidității dinamice verticale intervine în relația :

$$\begin{Bmatrix} F_0 \\ F_h \end{Bmatrix} = [K_v(\omega)] \begin{Bmatrix} Z_0 \\ Z_h \end{Bmatrix}, \quad (1.23)$$

și este dată de relația :

$$[K_v(\omega)] = \frac{\omega \cdot E \cdot S \cdot \sqrt{\frac{\rho}{E}}}{\sin \Phi} \cdot \begin{bmatrix} \cos \Phi & -1 \\ -1 & \cos \Phi \end{bmatrix} = \frac{\omega \cdot \sqrt{mk_v}}{\sin\left(\omega \cdot \sqrt{\frac{m}{k_v}}\right)} \cdot \begin{Bmatrix} \cos\left(\omega \sqrt{\frac{m}{k_v}}\right) & -1 \\ -1 & \cos\left(\omega \sqrt{\frac{m}{k_v}}\right) \end{Bmatrix} \quad (1.24)$$

$$\text{unde: } \Phi = \omega \cdot h \cdot \sqrt{\frac{\rho}{E}}. \quad (1.25)$$

Pentru valori mici ale lui  $\omega \cdot \sqrt{\frac{m}{k_v}}$ , adică pentru valori mici ale lui  $\omega$ , arcuri

de masă mică  $m$  sau rigidități verticale  $k_v$  mari, expresia lui  $[K_v(\omega)]$  poate fi simplificată dezvoltând în serie funcțiile trigonometrice. Dacă ne limităm la primii doi termeni vom avea :

$$[K_v(\omega)] = k_v \cdot \begin{Bmatrix} 1 - \frac{\omega^2}{3} \cdot \frac{m}{k_v} & -1 - \frac{\omega^2}{6} \cdot \frac{m}{k_v} \\ -1 - \frac{\omega^2}{6} \cdot \frac{m}{k_v} & 1 - \frac{\omega^2}{3} \cdot \frac{m}{k_v} \end{Bmatrix}. \quad (1.26)$$

Termenii în  $\omega^2$  de pe diagonala principală arată că o treime din masa  $m$  se raportează, în inerție pură, la masele de care este legat arcul, iar cei de pe cealaltă diagonală reprezintă cuplajele inerțiale între mișcările bazei și vârfului, aici intervenind a șasea parte a masei  $m$ .

Dacă ne limităm la un singur termen, avem :

$$[K_v(\omega)] = [K_v] = k_v \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}, \quad (1.27)$$

respectiv

$$F_0 = k_v \cdot (Z_h - Z_0) \text{ și } F_h = -F_0. \quad (1.28)$$

Aceste relații, analoge relațiilor (1.20) și (1.21), sunt cele folosite în general pentru toate tipurile de arcuri. De fapt, ele nu sunt valabile decât pentru regimul static ( $\omega = 0$ ) sau, mai general, pentru valori mici ale mărimii  $\omega \cdot \sqrt{\frac{m}{k_v}}$ , inferioare valorii de aproximativ 0,1 rad.

De exemplu, pentru un arc care are masa și rigiditatea identice cu cele ale arcului suspensiei secundare a boghiului Y32, frecvența limită pentru care formulele (1.26) sunt valabile se situează în jurul valorii de 1 Hz.

### 1.2.5.3. Rezonanța (frecvența proprie) arcului

Rezonanța arcului, în absența amortizării proprii, se obține atunci când

$$\sin \Phi = \sin \left( \omega \cdot \sqrt{\frac{m}{k_v}} \right) = 0. \quad (1.29)$$

Numărul frecvențelor proprii este infinit :

$$f_n = 0,5n \cdot \sqrt{\frac{k_v}{m}}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (1.30)$$

Frecvența fundamentală  $f_1$  este cu atât mai mare cu cât arcul este mai rigid, mai ușor sau, pentru materiale identice, este mai mic (ca înălțime) :

$$f_1 = 0,5 \sqrt{\frac{k_v}{m}} = \frac{1}{2h} \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho}}.$$

Această formulă reflectă un fenomen previzibil a priori: mărimea  $\sqrt{\frac{E}{\rho}}$  este

viteza de propagare a sunetului în sens longitudinal în arc, deci  $f_1$  reprezintă numărul de „du-te vino” al unei unde elastice care se propagă în arcul de lungime  $h$  (se referă la bară) în unitatea de timp.

**1.2.5.4. Comportarea dinamică transversală**

Arcul de înălțime  $h$ , sub sarcina de compresiune  $N$  presupusă constantă, este supusă la eforturi transversale  $T_0$  și  $T_h$  și la momente  $M_0, M_h$ , armonice, de pulsație  $\omega$ , la frecare din extremități [44]. Extremitățile execută mișcări armonice cu aceeași pulsație  $\omega$ . Mai apar deplasările  $V_0, V_h$  și rotațiile  $\Gamma_0, \Gamma_h$ . Schema este redată în figura 1.13.

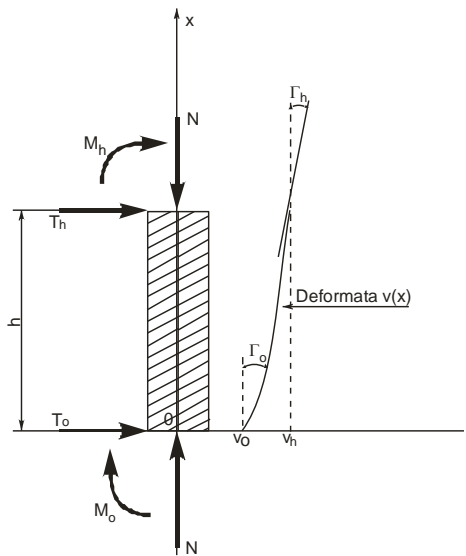


Figura 1.13 Schema arcului: comportamentul dinamic transversal

Și aici, ca și la vertical, amortizarea internă poate fi introdusă prin înlocuirea modului de elasticitate transversal cu valoarea sa complexă :

$$G_c = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)}$$

unde  $\nu$  este coeficientul lui Poisson.

Astfel vom avea :

$$\begin{Bmatrix} T_0 \\ M_0 \\ T_h \\ M_h \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} k_{y0} & C_{m0} & k_{yh} & C_{mh} \\ C_{m0} & C'_{f0} & -C_{mh} & C'_{fh} \\ k_{yh} & -C_{mh} & k_{y0} & -C_{m0} \\ C_{mh} & C'_{fh} & -C_{m0} & C'_{f0} \end{Bmatrix} \times \begin{Bmatrix} V_0 \\ \Gamma_0 \\ V_h \\ \Gamma_h \end{Bmatrix} = [K_T(\omega)] \cdot \begin{Bmatrix} V_0 \\ \Gamma_0 \\ V_h \\ \Gamma_h \end{Bmatrix}, \quad (1.31)$$

unde:

$$k_{y0} = \frac{EI}{h^3 g_2} \cdot \Delta\Delta [(-a\Delta - d\Delta) \cdot (\Delta shd \cos a) + \Delta chd \sin a], \quad (1.32)$$

$$k_{yh} = \frac{EI\Delta\Delta}{h^3 g_2} (a\Delta + d\Delta) \cdot (\Delta shd + \Delta \sin a), \quad (1.33)$$

$$C_{m0} = \frac{EI\Delta\Delta}{h^2 g_2} [(-a\Delta - d\Delta) \cdot shd \sin a + (a\Delta - d\Delta) \cdot (chd \cos a - 1)], \quad (1.34)$$

$$C_{mh} = \frac{EI\Delta\Delta}{h^2 g_2} (-a\Delta - d\Delta) \cdot (chd - \cos a), \quad (1.35)$$

$$C'_{f0} = -\frac{EI}{hg_2} (\Delta d + \Delta a) \cdot (\Delta chd \sin a - \Delta shd \cos a), \quad (1.36)$$

$$C'_{fh} = -\frac{EI}{hg_2} (\Delta d + \Delta a) \cdot (\Delta shd - \Delta \sin a), \quad (1.37)$$

$$\Delta = \frac{a}{1 + (N/kGS)} \left[ 1 - \frac{d^2}{h^2} \cdot \frac{EI}{kGS + N - J\omega^2} \right], \quad (1.38)$$

$$\Delta = \frac{d}{1 + (N/kGS)} \left[ 1 + \frac{a^2}{h^2} \cdot \frac{EI}{kGS + N - J\omega^2} \right], \quad (1.39)$$

$$A = \frac{S\rho\omega^2}{kGS} + \frac{J\omega^2}{EI} + \frac{N}{EI} \left( 1 + \frac{N}{kGS} \right), \quad (1.40)$$

$$B = \frac{S\rho\omega^2}{EI} \left( -1 + \frac{J\omega^2 - N}{kGS} \right), \quad (1.41)$$

$$a = jh \sqrt{\frac{-A + \sqrt{A^2 - 4B}}{2}}; \quad d = h \sqrt{\frac{-A - \sqrt{A^2 - 4B}}{2}}, \quad (1.42)$$

$$g_2 = 2\Delta\Delta(chd \cos a - 1) + (\Delta^2 - \Delta^2)shd \sin a. \quad (1.43)$$

După cum se observă, relațiile de mai sus sunt funcții de  $\omega$ ,  $N$  și de caracteristicile geometrice și mecanice ale arcului, date în tabelul 1.1.

Tab.1.1

înălțimea în stare liberă	$h_0$	m
aria secțiunii drepte	S	$m^2$
inerția secțiunii drepte	I	$m^4$
momentul de inerție al unui sector de lungime unitară	J	kg·m
masa specifică a materialului	$\rho$	kg / $m^3$
masa totală	$m = \rho S h_0$	kg
modulul de elasticitate longitudinal al materialului	E	N / $m^2$
modulul de elasticitate transversal al materialului	G	N / $m^2$
coeficient de reducere a secțiunii S	k	

Se pot face următoarele remarci :

- matricea transversală dinamică este simetrică și are 16 componente ale rigidității, comportamentul dinamic transversal fiind caracterizat de 6 dintre acestea :  $k_{y0}$ ,  $k_{yh}$ ,  $C_{m0}$ ,  $C_{mh}$ ,  $C'_{f0}$ ,  $C'_{fh}$  care sunt funcții neliniare de N și  $\omega$  a mișcărilor de excitație ;
- dezvoltând, de exemplu, prima linie a ecuației matriciale (1.31) avem :

$$T_0 = k_{y0}V_0 + C_{m0}\Gamma_0 + k_{yh}V_h + C_{mh}\Gamma_h. \quad (1.44)$$

Efortul transversal dinamic  $T_0$  la baza arcului depinde liniar de deplasări, translațiile V și rotațiile  $\Gamma$ , ale ambelor extremități.

Deplasările bazei  $V_0$ ,  $\Gamma_0$  nu au aceeași influență asupra lui  $T_0$  ca și deplasările vârfului  $V_h$ ,  $\Gamma_h$ , ceea ce nu era cazul în regim static.

În particular, rigiditatea transversală  $k_{y0}$  la bază este diferită de rigiditatea  $k_{yh}$  la vârf. Acest lucru se datorează efectului forțelor de inerție interne ale arcului.

Se poate verifica faptul că matricea dinamică  $[K_T(\omega)]$  (relația 1.25) tinde spre matricea statică  $[K_T]$  dacă valoarea pulsației  $\omega$  a mișcării excitatorii tinde către zero.

### 1.2.5.6. Caracteristicile dinamice ale arcului mare.

Rigiditățile unui arc ideal, fără masă, sunt niște constante care nu depind de frecvența excitațiilor. Dar, în cazul arcului mare, masa nu mai poate fi neglijată.

*Matricea rigidității în dinamică verticală.* Cu titlu de exemplu, în figura 1.14 este redată evoluția în banda 0 – 50 Hz a celor doi termeni ai matricii rigidității verticale ale arcului mare, a cărui masă utilă este de 162 kg iar rigiditatea statică de 400000 N / m. Aici au fost folosite formulele 1.24.

Plecând din jurul valorii de 8 Hz, caracteristicile dinamice se depărtează vizibil de cele statice. Rigiditățile au valori importante mai ales la frecvențele de rezonanță, aici 28,8; 59,6 Hz etc., valori confirmate experimental.

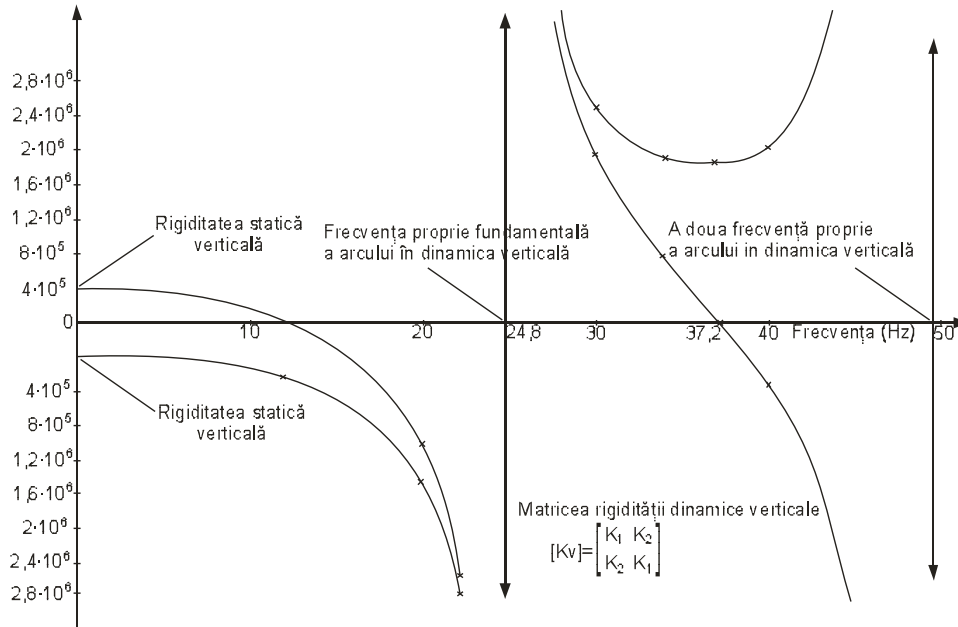


Figura 1.14. Variația celor 2 termeni ai matricii rigidității verticale în funcție de frecvență.

*Matricea rigidității în dinamică transversală.* Figura 1.15 arată evoluția în banda 0 - 30 Hz a celor șase termeni care intervin în matricea rigidității transversale.

În calculele dinamice clasice este luată în calcul o singură rigiditate  $k_y = k_{y0}(f=0) = -k_{yh}(f=0)$  și, în plus, este presupusă independentă de frecvență. De exemplu, începând cu 6 Hz, toate variază puternic cu frecvența.

În jur de 27 Hz, rezonanța confirmată experimental, valorile rigidităților cresc foarte mult.

Masa și geometria arcului, atât în dinamică verticală cât și transversală par a juca un rol semnificativ în cazul arcurilor mari utilizate la suspensiile secundare ale vehiculelor feroviare.

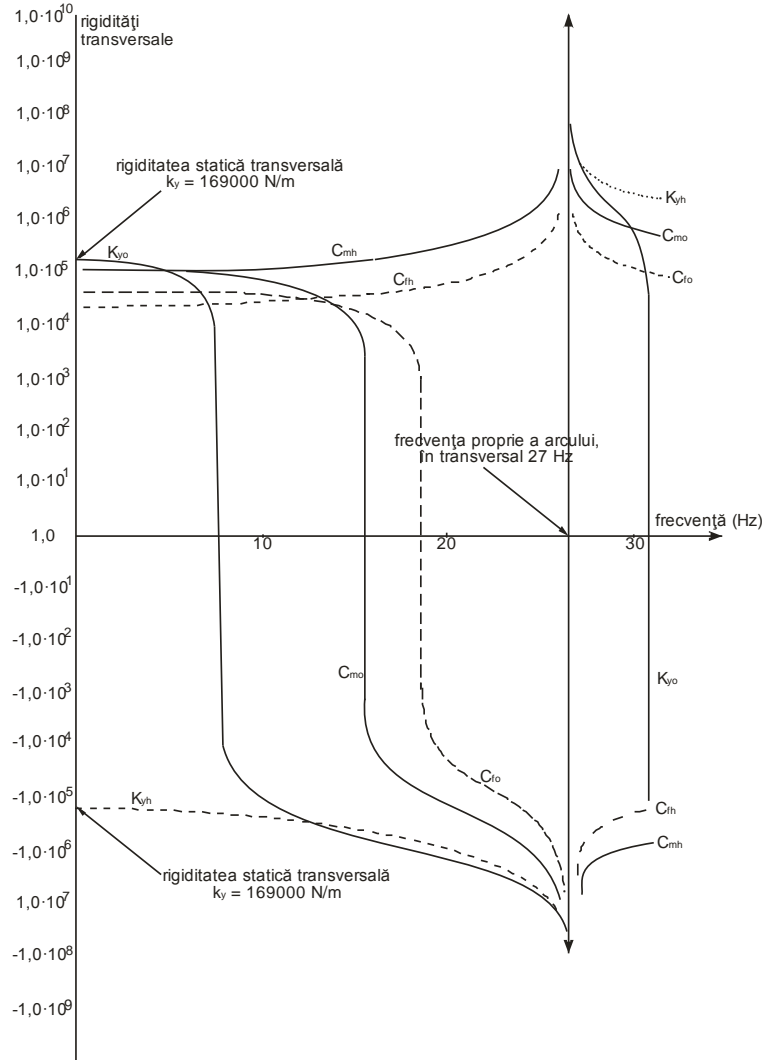


Fig. 1.15. Variația celor 6 termeni ai matricii rigidității transversale în funcție de frecvență.

### 1.2.6. Soluția numerică a propagării deformației în arcurile elicoidale elastice

Când un arc elicoidal este supus unor eforturi mari, pot apărea oscilații semnificative axiale și de rotație [26]. Există o formulă matematică care descrie răspunsul dinamic neliniar al arcurilor elicoidale. Ecuațiile specifice pentru aceste mișcări sunt două ecuații neliniare, hiperbolice, parțial diferențiale de ordinul doi. Eforturile axiale și de rotație sunt considerate principalele variabile dependente. Pentru că ecuațiile sunt neliniare, soluțiile ecuațiilor se pot obține numai prin aproximare de tehnică numerică. Când eforturile sunt mici, ecuațiile de mișcare sunt redată liniar. Tehnica numerică este metoda caracteristică pentru amândouă problemele, de propagare a deformației, liniară și neliniară. Pentru a rezolva



problema neliniară a arcului elicoidal este folosită metoda neliniară caracteristică. Compatibilitatea ecuațiilor sunt integrate alături de caracteristici și sunt scrise sub forme diferite. Valorile necunoscute ale eforturilor de rotație, axiale precum și viteza axială și de rotație la un anumit punct al arcului, se poate determina prin rezolvarea unui sistem de patru ecuații simultane. Pentru acest sistem valorile coeficienților și variabilele cunoscute sunt calculate prin interpolare și integrare de-a lungul liniilor caracteristice neliniare. Procedura trebuie ușor modificată atunci când sunt implicate și capetele arcului. La ambele capete, pentru a determina valorile necunoscute ale variabilelor, se folosesc doar două caracteristici. Pentru arcul elicoidal, rezultatele numerice sunt obținute sub impact axial. Răspunsurile dinamice sunt calculate pentru anumite secțiuni din arc.

Pentru a simplifica analiza, se presupune că materialul este elastic. Studiul arcului elicoidal are nevoie de două stadii: static și dinamic. Soluția analitică a ecuațiilor statice ale arcurilor elicoidale cilindrice a fost făcută de Love.

Răspunsul dinamic al arcurilor din materialele elastice este cercetat folosind modele variate. Când un arc elicoidal este supus la încărcări mari pot apărea oscilații de torsiune semnificative. Phillips și Costello [35] au pus în evidență ecuațiile mișcării în această situație. Stokes [49] a condus un program analitic și experimental pentru a cerceta întinderea radială a arcului elicoidal la impact longitudinal. Semnificația oscilațiilor de torsiune la întinderea radială a unui arc elicoidal este prezentată în lucrarea lui Costello [19]. În această lucrare a fost prezentată o teorie liniară și soluția analitică, obținută prin transformări Laplace, și indică o întindere radială mare sub impact. Sinha și Costello [47] au folosit diferențe tehnice finite și metoda caracteristicilor liniare pentru a rezolva numeric ecuațiile parțial diferențiale neliniare în domeniul timpului.

Mottershead [32] a dezvoltat elementul finit special pentru rezolvarea ecuațiilor diferențiale. Yiderim [57] a dezvoltat o metodă numerică eficientă asupra matricii de transfer a rigidității pentru a prezice frecvențele naturale ale arcurilor elicoidale cilindrice. Becker [5] a folosit și el metoda matricii de transfer pentru a produce frecvențele proprii ale arcului elicoidal. Dammak [20] a dezvoltat eficient elementele finite cu două noduri și câte șase grade de libertate pe nod pentru comportamentul arcului elicoidal.

Extinderea lucrării lui Sinha și Costello [47] pentru a cerceta numeric comportamentul neliniar ale arcurilor sub impact prin metode caracteristice neliniare și de a compara rezultatele cu teoria liniară este făcută de Sami Ayadi [1]. Rezultatele numerice ale teoriei liniare sunt obținute prin metoda caracteristicilor și prin metoda diferențelor finite a lui Lax Wendroff (Ayadi și Hadj-Taieb) [3].

#### 1.2.6.1. Modelul matematic

Ecuațiile care descriu comportările dinamice unidimensionale neliniare ale arcurilor elicoidale pot fi adaptate de la modelul analitic dezvoltat de Phillips și Costello [35]. Aplicând teoria analizei dimensionale și ecuația de mișcare, unui element de arc între două secțiuni  $x$  și  $x+dx$  (figura 1.16a), supus la forțe axiale  $F$  și la tracțiuni  $T$ , rezultă următoarele ecuații de mișcare ale arcurilor:

$$a \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + b \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = e \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (1.45)$$

$$b \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + c \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = e \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \tag{1.46}$$

unde:

- u este deplasarea axială a arcului;
- v = rθ este rotația deplasării arcului;
- r este raza elipsoidei care definește arcul;
- x este coordoanta axială;
- t este timpul.

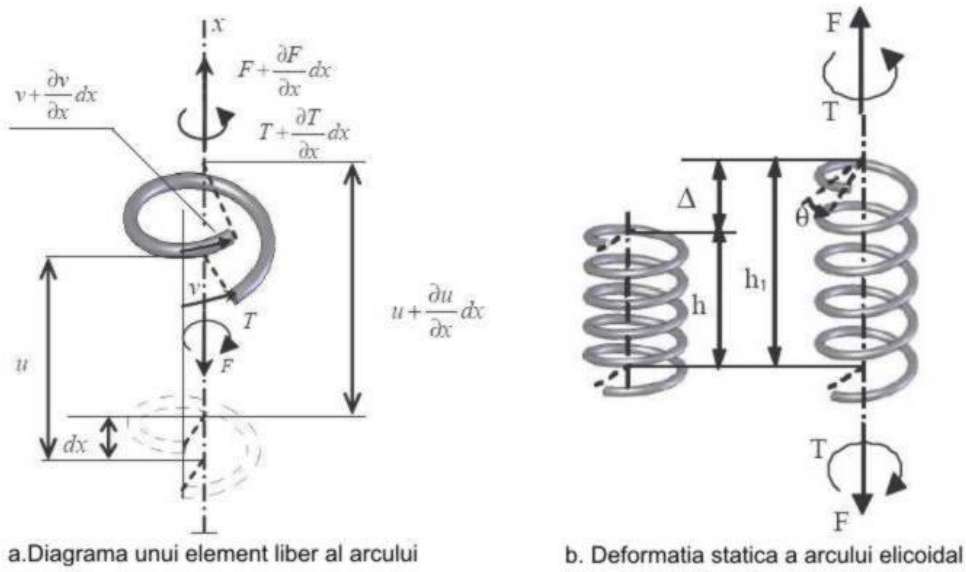


Figura 1.16 Descrierea arcului elicoidal

Coeficienții a, b, c și e întâlniți în ecuațiile de mai sus sunt definiți prin relațiile:

$$a = \frac{r^2}{EI} \frac{\partial F}{\partial E} = (v_x \sin \alpha + \cos \alpha)(\sin \alpha) \left\{ \frac{-v}{1+v} (v_x \sin \alpha + \cos \alpha) + \frac{\cos^2 \alpha}{[1 - (1+u_x)^2 \sin^2 \alpha]^{3/2}} \right\} \tag{1.47}$$

$$b = \frac{r^2}{EI} \frac{\partial F}{\partial \beta} = \frac{r}{EI} \frac{\partial T}{\partial \varepsilon} = \sin^2 \alpha \left\{ \frac{(1+u_x) \cos^2 \alpha}{[1 - (1+u_x)^2 \sin^2 \alpha]^{1/2}} - \frac{\cos \alpha}{1+v} - \frac{2v}{1+v} (1+u_x)(v_x \sin \alpha \cos \alpha) \right\} \tag{1.48}$$

$$c = \frac{r}{EI} \frac{\partial T}{\partial \beta} = \sin \alpha \left[ 1 - \frac{v}{1+v} (1+u_x)^2 \sin^2 \alpha \right] \tag{1.49}$$

$$e = \frac{Mr^2}{EIh} \quad (1.50)$$

unde:  $h$  este lungimea arcului în poziție inițială,  $E$  este modulul de elasticitate Young al materialului de arc,  $M$  este masa totală a arcului,  $I$  este momentul de inerție al secțiunii arcului,  $\nu$  este coeficientul Poisson al materialului de arc și  $\alpha$  este unghiul elipsei arcului în poziție inițială.

Se poate vedea din ecuațiile (1.47), (1.48) și (1.49) că undele de propagare sunt mici și coeficienții au valori aproximative:

$$\begin{aligned} a &= \left(1 - \frac{\nu}{1+\nu} \cos^2 \alpha\right) \sin \alpha, \quad b = -\frac{\nu}{1+\nu} \sin^2 \alpha \cos \alpha, \\ c &= \left(1 - \frac{\nu}{1+\nu} \sin^2 \alpha\right) \sin \alpha \end{aligned} \quad (1.51)$$

### 1.2.6.2. Soluția numerică

Soluția numerică a problemei apărute în ecuațiile (1.45) și (1.46) poate fi obținută și prin metoda caracteristicilor. Această metodă, care se bazează pe propagarea undelor, este aplicată pentru a obține ecuații diferențiale. În principiu, nu este o metodă numerică ci una analitică. Cu toate acestea, câteva dintre rezultate se vor obține numeric. Ecuațiile (1.45) și (1.46) pot fi transformate într-un sistem de ecuații diferențiale sau sub formă de matrice ca cea de mai jos:

$$\begin{bmatrix} a & 0 & b & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ b & 0 & c & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ dx & dt & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & dx & dt & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & dx & dt & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & dx & dt \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \partial u_x / \partial x \\ \partial u_x / \partial t \\ \partial v_x / \partial x \\ \partial v_x / \partial t \\ \partial u_t / \partial x \\ \partial u_t / \partial t \\ \partial v_t / \partial x \\ \partial v_t / \partial t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ du_x \\ dv_x \\ du_t \\ dv_t \end{bmatrix} \quad (1.52)$$

Direcțiile caracteristice sunt determinate din alegerea determinantului matricei:

$$(ac - b^2) \left(\frac{dt}{dx}\right)^4 - (a + c) \left(\frac{dt}{dx}\right)^2 + 1 = 0 \quad (1.53)$$

Ecuția de mai sus are patru rădăcini care sunt:

$$\left(\frac{dt}{dx}\right)_{1,2} = + \left[ \frac{(a+c) \mp \sqrt{(a-c)^2 + 4b^2}}{2(ac-b^2)} \right]^{1/2} \quad (1.54)$$

$$\left(\frac{dt}{dx}\right)_{3,4} = - \left[ \frac{(a+c) \mp \sqrt{(a-c)^2 + 4b^2}}{2(ac-b^2)} \right]^{1/2}$$

Când se folosește teoria liniară se obține:

$$\left(\frac{dx}{dt}\right)_{1,3} = \pm cf = \pm \sqrt{\frac{Elh}{Mr^2} \sin \alpha} = \pm \sqrt{\frac{\sin \alpha}{e}} \quad (1.55)$$

$$\left(\frac{dx}{dt}\right)_{2,4} = \pm cs = \pm \sqrt{\frac{Elh}{Mr^2} \frac{\sin \alpha}{1+\nu}} = \pm \sqrt{\frac{\sin \alpha}{e(1+\nu)}}$$

Cele 4 rădăcini au definit ecuațiile (1.54) sau (1.55) și au determinat un sistem hiperbolic. Forma canonică a sistemului hiperbolic poate fi determinată prin înlocuirea unei coloane în matricea (1.52) și prin atribuirea valorii 0 determinantului.

Astfel rezultă următoarele ecuații:

$$\left\{1 - c \left(\frac{dt}{dx}\right)^2\right\} du_x + \left\{b \left(\frac{dt}{dx}\right)^2\right\} dv_x - \left\{1 - c \left(\frac{dt}{dx}\right)^2\right\} \left(\frac{dt}{dx}\right) du_t - \left\{b \left(\frac{dt}{dx}\right)^3\right\} dv_t = 0 \quad (1.56)$$

În formă diferențială ecuația (1.56) devine:

$$\left\{1 - c \left(\frac{dt}{dx}\right)^2\right\} \Delta u_x + \left\{b \left(\frac{dt}{dx}\right)^2\right\} \Delta v_x - \left\{1 - c \left(\frac{dt}{dx}\right)^2\right\} \left(\frac{dt}{dx}\right) \Delta u_t - \left\{b \left(\frac{dt}{dx}\right)^3\right\} \Delta v_t = 0 \quad (1.57)$$

Valorile necunoscutele ( $u_x$ ,  $v_x$ ,  $u_t$  și  $v_t$ ) în orice punct L, la fel cum este prezentat în figura 1.17, pot fi determinate cunoscând valorile în punctele P, Q, R și S bazându-ne pe cele 4 caracteristici care trec prin L și apoi rezolvând 4 ecuații simultane obținute din ecuația (1.57). Cu toate că caracteristicile sunt curbate din cauza neliniarității ecuațiilor (1.45) și (1.46), se presupune că LP, LQ, LR și LS sunt linii drepte. De aici ecuația (1.57) devine:

$$\left[1 - c \left(\frac{dt}{dx}\right)_{1,P}^2\right] (u_{xL} - u_{xp}) + \left\{ b \left(\frac{dt}{dx}\right)_{1,P}^2 \right\} (v_{xL} - v_{xp}) - \left[1 - c \left(\frac{dt}{dx}\right)_{1,P}^2\right] \left(\frac{dt}{dx}\right)_{1,P} (u_{tL} - u_{tp}) - \left\{ b \left(\frac{dt}{dx}\right)_{1,P}^3 \right\} (v_{tL} - v_{tp}) = 0 \quad (1.58)$$

unde  $u_{xL}$ ,  $u_{xL}$ ,  $u_{tL}$  și  $u_{tL}$  au valori necunoscute în punctul L;  $u_{xp}$ ,  $u_{xp}$ ,  $u_{tp}$  și  $u_{tp}$  sunt valori cunoscute în punctul P; și  $(dt/du_x)_{1,P}$  este panta caracteristicilor [2] familiei care trece prin P. Trei ecuații similare pot fi scrise pentru punctele Q, R și S. Prin rezolvarea simultană a ecuațiilor obținute din ecuația (1.38) pot fi determinate valorile  $u_{xL}$ ,  $u_{xL}$ ,  $u_{tL}$  și  $u_{tL}$  în orice punct L. Trebuie notate valorile în punctele P, Q, R și S și calculate prin interpolare neliniară.

Figura 1.17b prezintă caracteristicile arcului în cazul teoriei liniare când  $c_f$  și  $c_s$  sunt constanți [14].

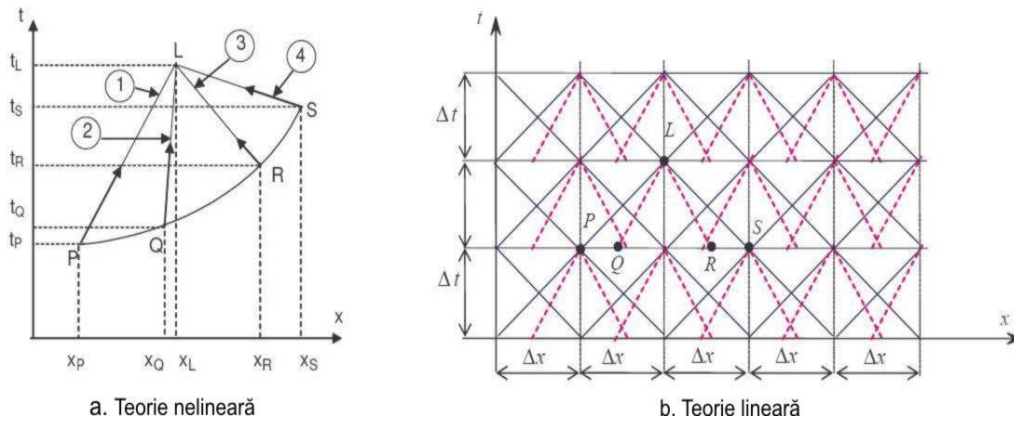


Figura 1.17. Metoda caracteristicilor

### 1.2.6.3. Rezultate numerice la arcurile supuse impactului

Considerăm un arc ideal precum cel prezentat în figura 1.18. Parametrii arcului sunt: lungimea inițială a arcului  $h=482,6$  mm, unghiul elipsei  $a=0,141815$ rd, raza arcului  $r=179,32$  mm, numărul de spire  $n=3$ , coeficientul Poisson  $\nu=0,29$ , diametrul sârmei  $r_f=15,09$  mm, modulul de elasticitate Young  $E=0,2068510^6$  N/mm<sup>2</sup>, comprimarea inițială  $\Delta=165,1$  mm și masa arcului  $M=19,146$  kg.

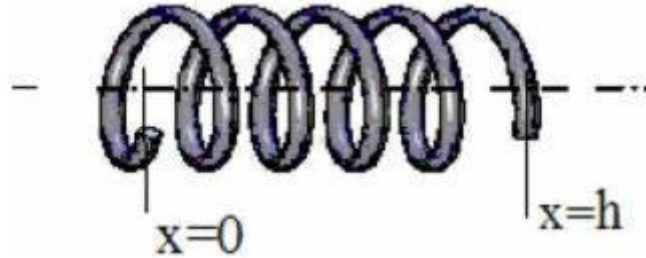


Figura 1.18. Limitele arcului elicoidal

Condițiile inițiale sunt:

$$u_x(x,0)=-\Delta/h \text{ și } u_x(x,0)=0 \tag{1.59}$$

$$u_t(x,0)=0 \text{ și } u_t(x,0)=0 \tag{1.60}$$

*Condiții limită.* Răspunsul dinamic studiat aici este datorat unei viteze specifice care este întâlnită la capătul arcului  $x=0$  (vezi figura 1.19). Condițiile limită sunt:

$$u_t(0,t)=\varnothing_1(t), \quad u_t(0,t)=0, \quad u_t(h,t)=0 \text{ și } u_t(h,t)=0 \tag{1.61}$$

$\varnothing_1(t)$  este definit de valorile date în tabelul 1.2.

Tab. 1.2 Viteza axială la  $x=0$

Timpul (ms)	0	3,375	27,75	50,625
Viteza axială (m/s)	0	9,062	1,165	- 0,3

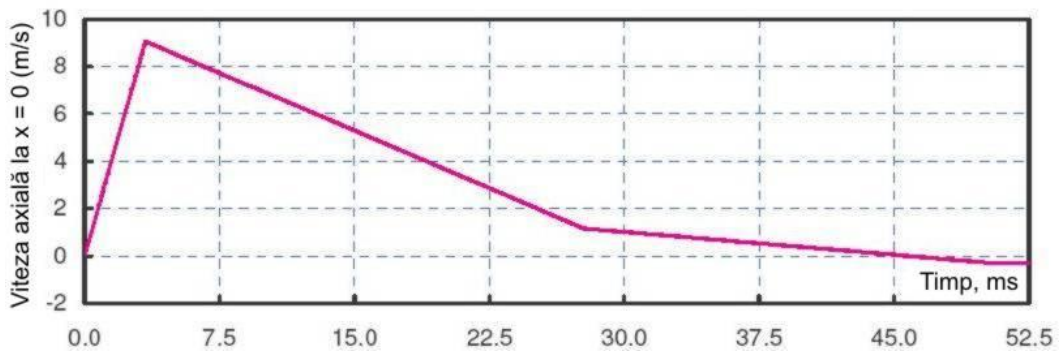


Figura 1.19 Viteza axială la capătul lovit al arcului ( $x=0$ )

Arcul este divizat în secțiuni echidistante în direcția  $x$ :  $\Delta r=h/N$ . Două programe FORTRAN au fost deschise pe același calculator. Problema a fost rezolvată prin metoda caracteristicilor utilizând  $N=180$  puncte atât pentru teoria liniară cât și pentru cea neliniară. În cazul teoriei liniare aceeași problemă a fost rezolvată de către diferența finită Lax-Wendroff utilizând  $N=1000$  puncte.

Rezultatele obținute de calculator prin metoda caracteristicilor pentru teoria liniară și cea neliniară au fost prezentate în figurile 1.20 și 1.21. Deformațiile axiale de torsiune sunt la capătul arcului ce a fost supus testării.

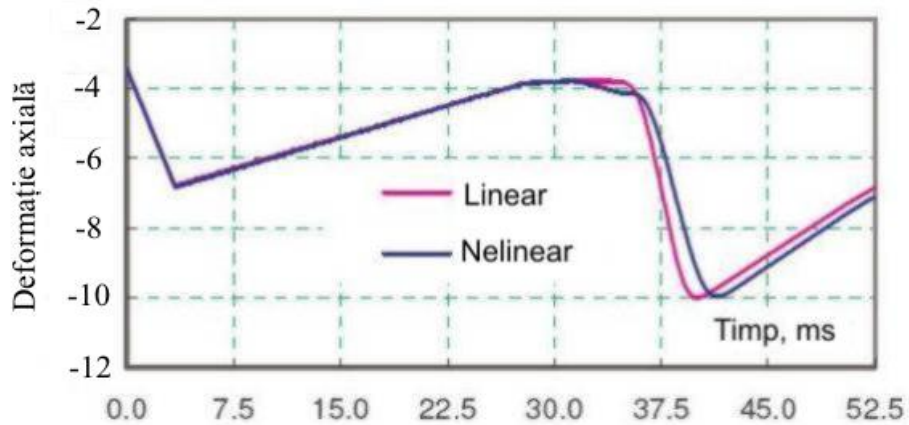


Figura 1.20. Deformația axială la capătul supus testării

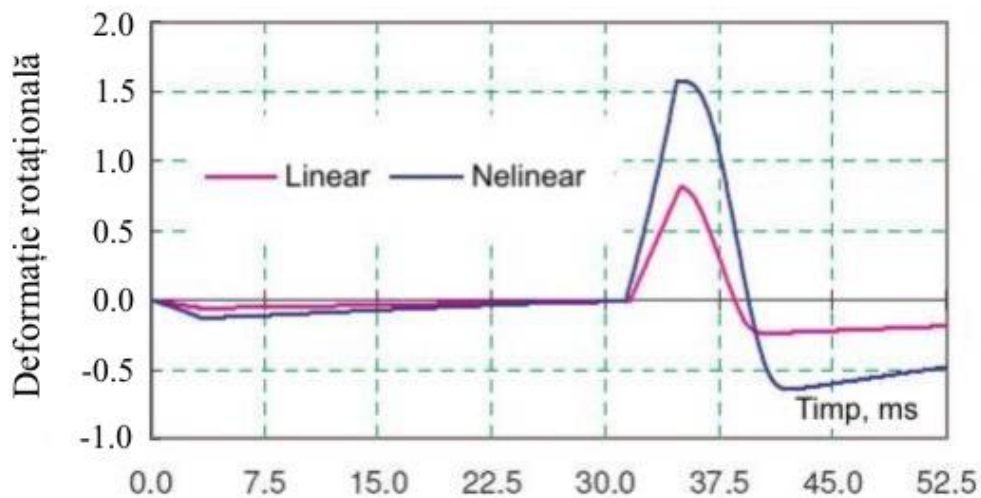


Figura 1.21. Deformația rotațională la capătul supus testării

La fel cum au arătat Phillips și Costello, rezultatele testelor arată că este necesară rezolvarea ecuațiilor de mișcare pentru arcul respectiv și pentru acest tip de încărcare cu efort. Teoria liniară este adecvată pentru aflarea valorii forței axiale din arc dar poate duce la rezultate eronate în aflarea momentului de rotație și întinderii din arc (vezi tabelul 1.3).

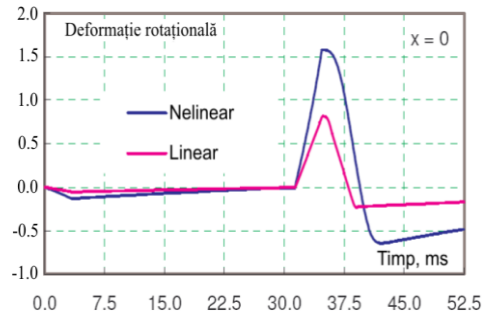
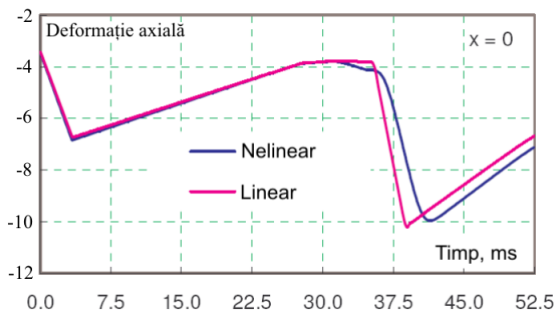
Tabelul 1.3: forța axială, momentul axial și întinderea radială la  $x=0$  și  $t=0,0346$  s

Timpul (m)	Forța axială (N)	Momentul axial (mN)	Expansiunea radială (mm)
Teoria liniară	- 11100	540,5	- 0,950
Teoria neliniară	- 11167,1	1155,4	- 2,8194

Trebuie arătat că odată ce forțele axiale și de rotație sunt cunoscute, tensiunile pot fi calculate din formula calculului de material. În general, cea mai importantă tensiune care apare la un arc elicoidal este datorată momentelor de torsiune din secțiunea materialului de arc. Din moment ce momentul de torsiune dintr-o secțiune a materialului de arc este datorată în principal forței axiale din acel arc, teoria liniară este considerată adecvată pentru calculul tensiunilor.

În figurile 1.22 și 1.23 sunt arătate diagramele deformațiilor la anumite secțiuni ale arcului ( $x=0$ ,  $x=h/4$ ,  $x=h/2$ ,  $x=3h/4$ ,  $x=h$ ). Sunt ilustrate fenomenele ce au loc în cazul răspunsurilor dinamice liniare și neliniare din arcuri. Din cauza neliniarității ecuațiilor (1.45) și (1.46), vitezele undei nu sunt constante și liniile caracteristice sunt curbate. Rezultatele din calculul ecuațiilor neliniare de mișcare prezentate în figurile 1.22 și 1.23 sunt obținute prin metoda Lax-Wendroff.

În figura 1.24 sunt prezentate caracteristicile liniilor din teoria liniară. La momentul  $t=0$ , arcul este tensionat și două unde, unda deformației de torsiune și unda deformației axiale se propagă de-a lungul arcului până ajung de la un capăt la altul la  $x=h$ . Comportarea caracteristicii undelor ce corespund deformației de rotație diferă de cele ce corespund deformației axiale. Evoluția deformațiilor rezultă în funcție de viteza de deformație aplicată la capătul arcului  $x=0$ , și de unda reflectată între cele două capete de arc. Trebuie remarcat că unda deformației axiale este de fapt efectul unei deformației de rotație, după cum se poate vedea pe curbele din figurile 1.22 și 1.23. Unda axială reflectată este atenuată de limitele valorii undei de rotație. Procesul este repetat și indică influența unei deformației axiale asupra comportării unei deformației de rotație.





38 Tipuri de arcuri metalice utilizate la vehicule de cale ferată - 1

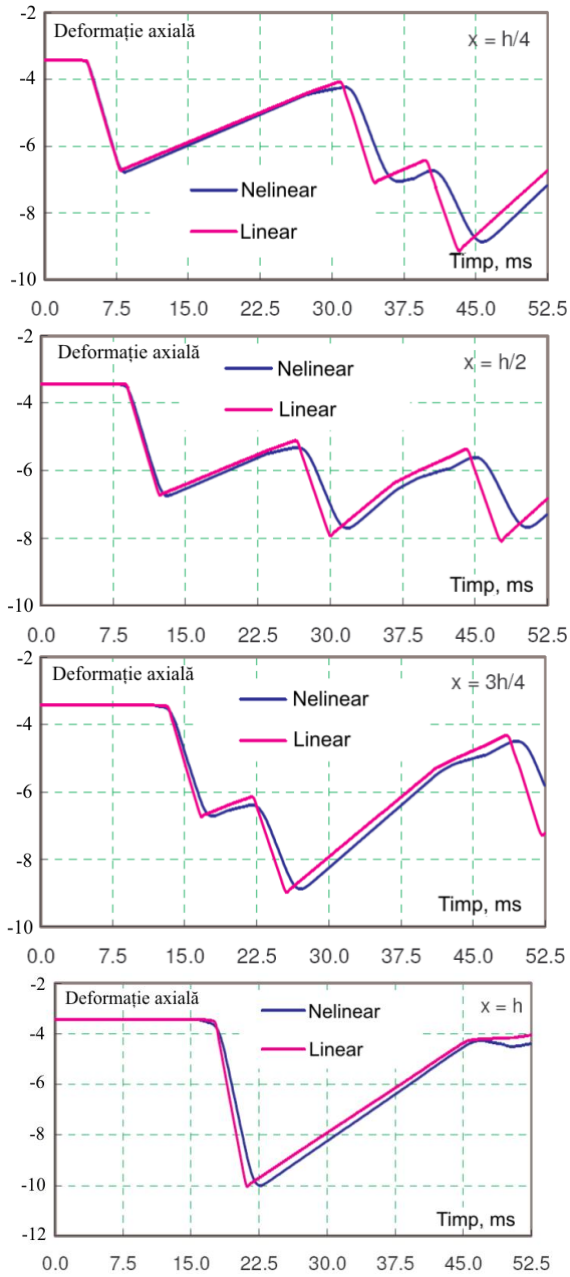


Fig. 1.22. Deformații axiale în arc

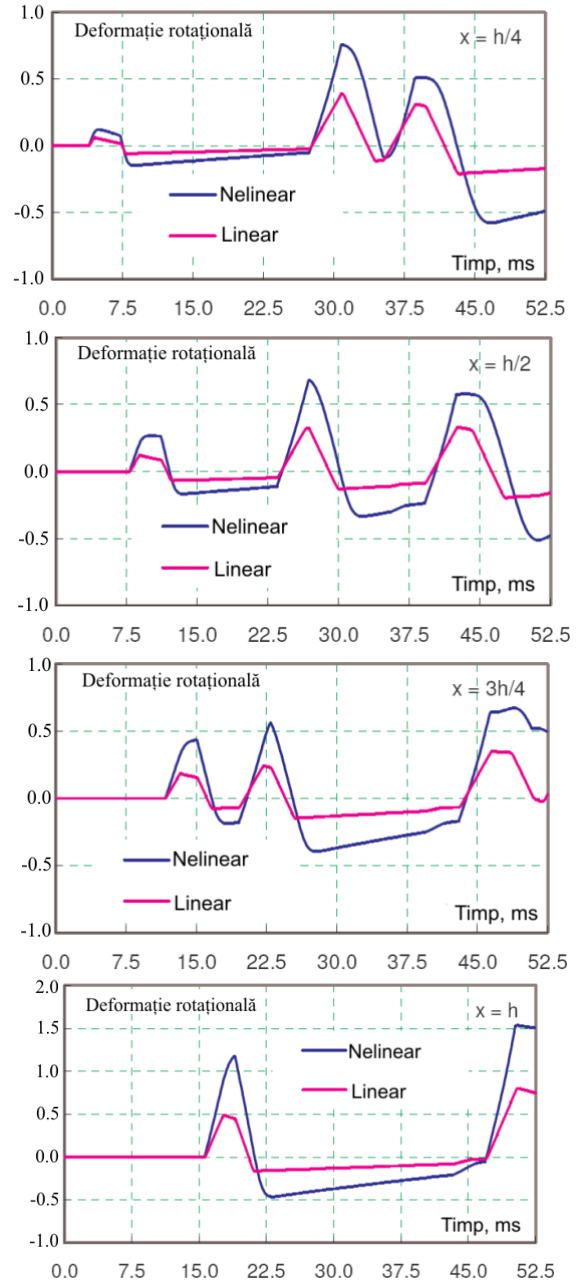


Fig. 1.23. Deformații rotaționale în arc

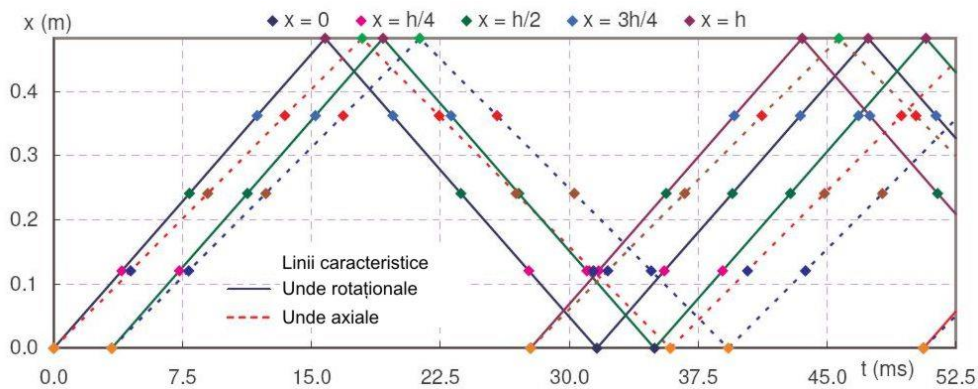


Figura 1.24. Linii caracteristice pentru răspunsul dinamic linear al arcului elicoidal

Soluția numerică a răspunsului dinamic a unui arc elicoidal presupune două ecuații neliniare parțial diferențiale hiperbolice. Cele două metode numerice folosite au fost: metoda curbelor caracteristice și metoda diferenței finite conservative sau metoda Lax-Wendroff. Metoda caracteristicilor neliniare necesită folosirea metodei de interpolare pentru a calcula evoluțiile deformațiilor în orice secțiune interioară a arcului.

Metoda diferenței finite este mai practică și simulează mai precis propagarea undelor de deformare atunci când sunt folosite ecuațiile de mișcare liniare. Rezultatele calculate prin această metodă se potrivesc destul de bine cu rezultatele numerice obținute prin metoda curbelor caracteristice. Programul de cercetare a fost aplicat analizei deformațiilor mari pentru arcuri elicoidale supuse la sarcini axiale. Se poate observa din rezultatele calculate că teoria liniară are o acuratețe rezonabilă legată de deformațiile axiale, dar are o eroare considerabilă față de deformațiile de rotație investigate.

### 1.3. Arcuri lamelare

#### 1.3.1. Considerații generale

Arcurile lamelare (în foi) se utilizează ca elemente elastice în suspensia vehiculelor pe șine, în general sub formă de arcuri deschise, simetrice, de tip trapezoidal sau parabolic. Suspendate la capete de inele sau de eclise prinse în poziție oblică de lonjeroanele șasiului, acestea asigură, pe lângă preluarea elastică și amortizarea șocurilor și vibrațiilor, ghidarea osiilor și orientarea lor radială în curbe [44].

Pentru creșterea siguranței contra deraierii, la circulația vagoanelor de marfă goale, pe căi cu torsiuni mari, pentru a ameliora calitatea de mers și a obține o frecvență de galop aproximativ aceeași la toate stările de încărcare, arcurile lamelare sunt în general cu flexibilitate progresivă (fig. 1.25 și 1.26).

Arcurile trapezoidale sunt formate prin suprapunerea mai multor lamele (foi) de lungimi diferite având aceeași lățime și grosime constantă în lungul lamelei. Lamelele sunt fixate la mijloc prin legătura de arc, în care se consideră încastrate. Sub acțiunea sarcinii exterioare, arcul se comportă ca un solid de egală rezistență, fiind construit pe principiul unui arc monolamelar trapezoidal.

#### 40 Tipuri de arcuri metalice utilizate la vehicule de cale ferată - 1

Arcurile lamelare de tip trapezoidal au o greutate mare și o frecare proprie mare, care se manifestă prin fenomenul de rigidizare la șocuri mici. Autoamortizarea arcului nu este controlabilă datorită influenței asupra frecării dintre lamele, a gradului de uzură și a umidității. Frecarea neuniformă duce la apariția unor zone cu eforturi mari de contact între lamele, în care apar zgârieturi și apoi microfisuri de oboseală.

Arcurile parabolice prezintă caracteristici îmbunătățite în raport cu cele ale arcurilor trapezoidale. De o concepție specială, aceste arcuri cuprind un număr mic de lamele rezistente, având normal aceeași lungime (distanța dintre reazeme) și lățime. Grosimea lamelor scăzând parabolic de la mijloc spre capete, se obțin eforturi constante pe toată lungimea acestora. Pentru obținerea unei fixări optime a lamelor în zona bridei arcului și pentru realizarea suprafețelor de frecare la capete, în aceste zone grosimea lamelor este constantă.

Pentru a se evita orice contact direct între lamelele arcului parabolic, la mijloc sau la capete, s-au introdus garnituri speciale care asigură o întreținere ușoară, uzura redusă și o întrebuințare mult mai bună a materialului.

Pentru obținerea unor condiții optime de amortizare, mai ales atunci când condițiile de cale sunt rele, arcul parabolic poate fi echipat, dacă este necesar, cu elemente de cauciuc care strâng capetele lamelor. Ia naștere astfel o forță suplimentară de frecare, a cărei mărime optimă este determinată prin încercările dinamice efectuate în timpul circulației vehiculului.

Arcul parabolic are o rezistență mărită la coroziune prin posibilitatea de a se aplica o peliculă protectoare datorită spațiilor libere între lamele.

Pe lângă cele menționate și alte avantaje tehnice, ca de exemplu greutatea mai mică față de arcul trapezoidal, rigiditatea constantă în timpul vieții arcului și posibilitățile îmbunătățite de concepție constructivă, pledează în favoarea arcului parabolic.

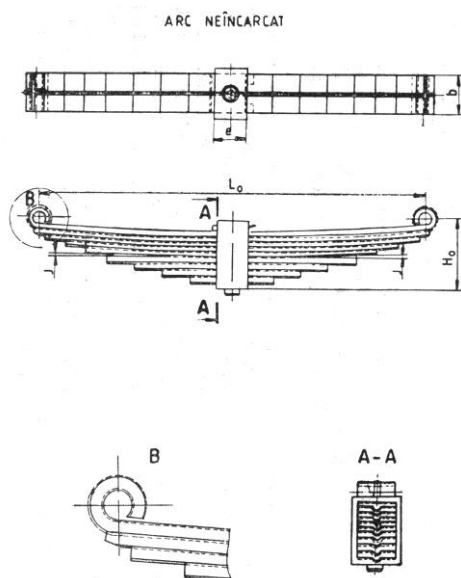


Fig. 1.25.

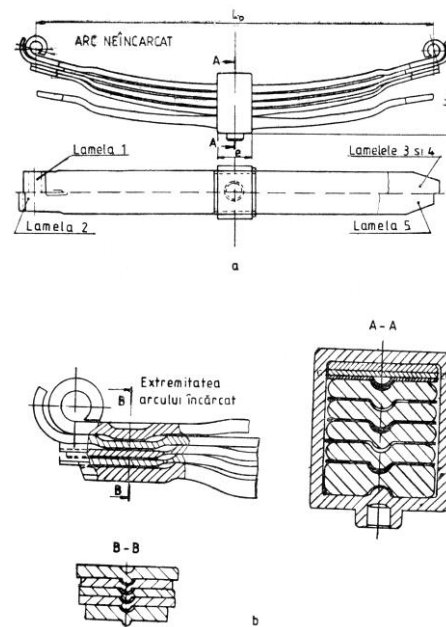


Fig. 1.26.

### 1.3.2. Tipuri de suspensii progresive cu arcuri lamelare

Cele mai simple tipuri de suspensii sunt cu arcuri lamelare legate de șasiu prin legături pendulare, sub formă de inele în poziție oblică. Astfel, în fig. 1.27 se prezintă o variantă, aplicată de DB la vagoane de marfă pe două osii, arc, parabolic progresiv (3+1 lamele) și dispozitiv de precomprimare a lamelelor la capete.

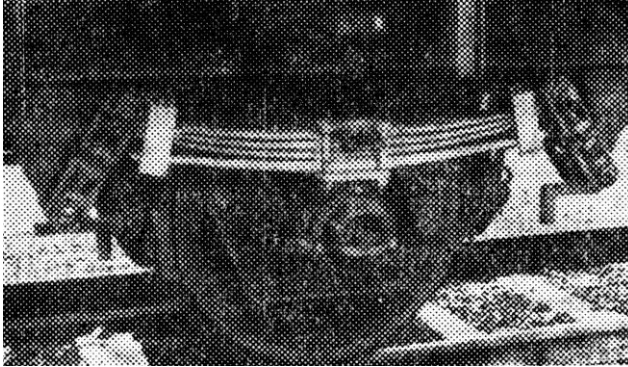


Fig. 1.27 Suspensie cu arc parabolic pentru vagoanele de marfă

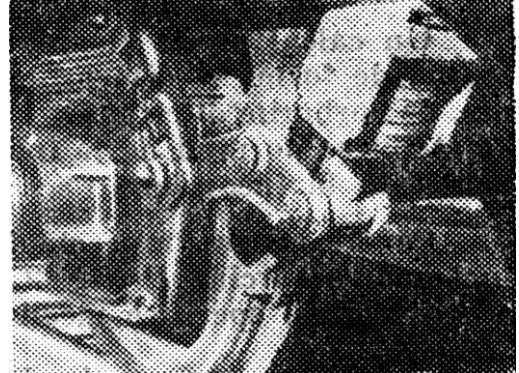


Fig. 1.28. Suspensie cu arc adițional de cauciuc solicitat la compresiune

Soluția NS (fig. 1.28) cuprinde un arc trapezoidal asimetric și – ca arc adițional – un arc de cauciuc de compresiune.

O altă soluție aplicată de DB (fig. 1.29) cuprinde un arc lamelar trapezoidal din cauciuc. La încărcări mici ale vehiculului se asigură o elasticitate mare a suspensiei, cele două arcuri, lucrând în serie iar după consumarea jocului  $j$ , la încărcări mari, suspensia devine mai rigidă, deoarece lucrează numai arcul trapezoidal.

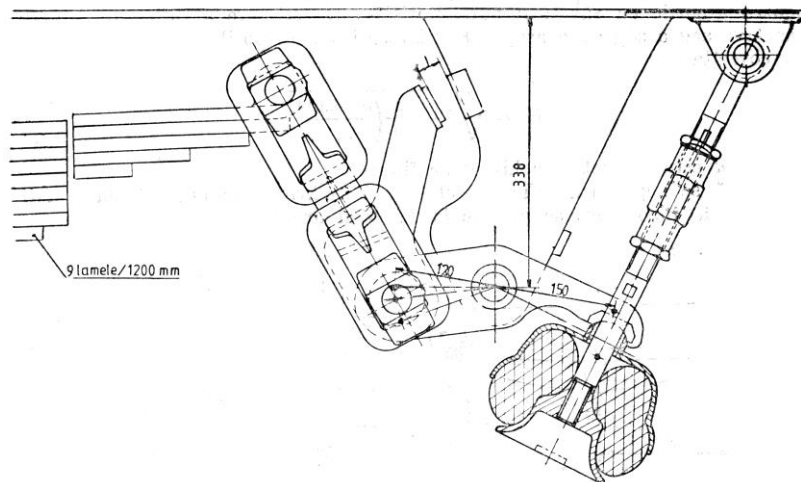


Fig. 1.29. Suspensie cu dublă flexibilitate formată dintr-un arc trapezoidal și arc adițional de cauciuc.

Încercările dinamice efectuate în circulație au arătat o importantă dependență asupra calității de rulare a vehiculelor în funcție de starea căii și o mică influență a gradului de încărcare. Rezultatele cele mai favorabile s-au obținut cu varianta DB (v. Fig. 1.29), cu eforturi de precomprimare a lamelor stabilite în mod corespunzător prin încercări.

### 1.3.3. Elemente de calcul al arcurilor lamelare

Un calcul precis al arcurilor lamelare este dificil de făcut dacă se ține seama de forma și dimensiunile arcului, de efectul strângerii în legătura de arc, de curburile diferite ale lamelor.

De aceea, relațiile de calcul, a flexibilității specifice medii  $k = \frac{1}{c}$  este:

$$k = \frac{L_s^3 K_1}{n b^3 h E} \quad [\text{mm/kM}], \quad (1.62)$$

în care coeficientul: 
$$K_1 = \frac{1}{4} \left[ 1 + \frac{e^3}{L} \left( \frac{1}{3} + \frac{P}{2} \left( \frac{3}{2} + \frac{L}{e} \right) \right) \right] \quad (1.63)$$

unde:  $L_s$  este lungimea desfășurată a lamei principale între axele ochiurilor arcului;  $n$  - numărul lamelor componente;  $n'$  - numărul lamelor de lungime  $L$ ;  $b$ ,  $h$  - lățimea, respectiv, grosimea unei lamele;  $e$  - lățimea legăturii de arc;  $E$  - modulul de elasticitate longitudinală.

Relația (1.62) este valabilă pentru arcurile drepte sau aproximativă pentru arcurile cu săgeți  $P$  mici, pozitive. O estimare a influenței săgeții negative sau a săgeții negative sau a săgeții  $P$  asupra flexibilității  $k$  este posibilă printr-un factor de corecție:

$$K_2 = \sqrt[3]{1 - \frac{16P}{3} \left( \frac{d}{L_s} \right)^3} \quad (1.64)$$

în care  $d$  este diametrul ochiului de fixare.

Dacă se neglijează influența strângerii în brida arcului, cele mai mari tensiuni de încovoiere se produc la mijlocul arcului.

Pentru un arc solicitat la capete numai de sarcina verticală  $\frac{P}{2}$  tensiunea maximă este:

$$\sigma = P(nbi) \tag{1.65}$$

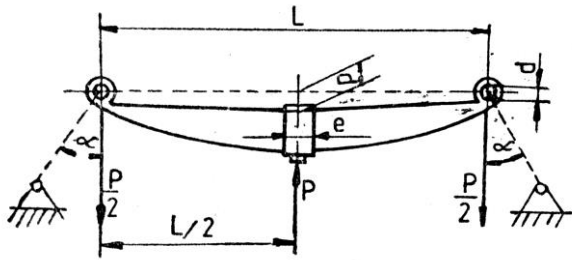


Fig.1.30 Arc trapezoidal suspendat la capete prin inele înclinate

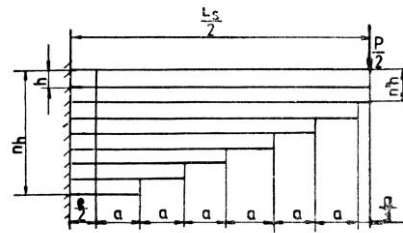


Fig. 1.31 Schema pentru calculul arcurilor trapezoidale simple

Dacă arcul este suspendat prin inele care fac unghiul  $\alpha$  cu verticala, atunci expresiile lui  $k$  și  $a$  se înmulțesc cu:

$$1 + \frac{2p+h}{L} \tan \alpha \tag{1.66}$$

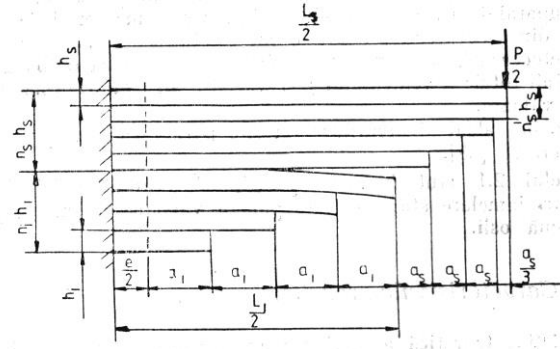


Fig. 1.32. Schemă pentru calculul arcurilor trapezoidale cu dublă flexibilitate.

Lungimile lamelor rezultă conform fig. 1.31, în care:

$$a = \frac{L_s - e}{2 \left( \frac{1}{3} + n - n^2 \right)} \tag{1.67}$$



Numărul lamelelor  $n'$  se alege astfel încât limita superioară a raportului  $\frac{n'}{n}$  să fie  $\frac{1}{3}$ ; valori de la  $\frac{1}{6}$  la  $\frac{1}{4}$  sunt cele mai favorabile.

Un arc trapezoidal cu dublă flexibilitate (progresiv) este format dintr-un arc superior cu  $n_s$  lamele de grosime  $h_i$  și dintr-un arc inferior cu  $n_i$  lamele de grosime  $h_s$  (fig. 1.32). Când ele lucrează împreună, arcul superior și cel inferior formează un arc trapezoidal complet din punctul de vedere al momentului de inerție. Flexibilitatea medie a arcului superior este:

$$k_s = \frac{L_s K_3}{n_s b h_i^3 E} \text{ [mm/kN]}, \quad (1.68)$$

$$\text{cu: } K_3 = \frac{1}{4} \left[ 1 + \left( \frac{1 - I_i}{I_s} \right)^3 \frac{1 - 2v_s + \left( \frac{3 - 4v_s}{3} \right) \frac{L_i}{L_s}}{(1 - v_s)^3} \right], \quad (1.69)$$

în care  $L_i$  lungimea desfășurată a primei lamele (cea mai lungă) a arcului inferior iar  $v_s = \frac{n'_s}{n_s}$ .

Flexibilitatea întregului arc este:

$$k = \frac{L_s K_4}{b (n_s^3 h_s^3 + n_i^3 h_i^3)} \text{ [mm/kN]}, \quad (1.70)$$

$$\text{cu } K_4 = \frac{1}{4} \left[ 1 + \left( \frac{1 - v_s}{1 - v_i} \right)^3 \frac{1 - 2v_s + \left( \frac{3 - 4v_s}{3} \right) \frac{L_i}{L_s}}{(1 - v_s)^3} \right], \quad (1.71)$$

în care:

$$v' = n'_s h_s^3 / (n_s h_s^3 + n_i h_i^3). \quad (1.72)$$

Lungimile, lamelelor se stabilesc cu relațiile:

$$a_s = \frac{\frac{1}{2}(l_s - e)}{\frac{1}{3} + n_s - n_s + n_s \left(\frac{h_1}{h_s}\right)^3}; \quad (1.73)$$

$$a_1 = a_s \left(\frac{h_1}{h_s}\right)^3; \quad (1.74)$$

$$I_1 = I_s \left(\frac{1}{3} + n_s - n_s\right). \quad (1.75)$$

Fișa UIC 517 [65] indică ca tensiunile în arc să fie comparate cu cele existente la un arc standardizat cunoscut, de concepție apropiată montat pe un vehicul comparabil. În cazul când tensiunile sunt mai mari decât cele corespundente din arcul standardizat, se vor efectua încercări la oboseală. Încercarea se efectuează la un milion de cicluri cu o sarcină de bază corespunzătoare sarcinii totale a vehiculului și o variație în amplitudine de  $\pm 25\%$  din această valoare.

În tabelul 1.3 sunt indicate principalele caracteristici ale unor tipuri de arcuri lamelare standardizate pentru vagoane de marfă pe boghiuri și cu două osii.

#### 1.3.4. Caracteristicile arcurilor lamelare

Caracteristica teoretică a unui arc cu flexibilitate constantă, în lipsa frecării dintre lamele, este o dreaptă ( $q$ ) care are coeficientul unghiular egal cu rigiditatea

$$c = \frac{1}{k} \text{ a arcului.}$$

Pentru a arăta efectul frecării asupra caracteristicii arcului se consideră un arc încărcat cu sarcina  $P_0$  careia îi corespunde o săgeată  $f_0$  (fig. 1.33). Deformarea arcului prin creșterea sarcinii (încercare) nu este posibilă decât dacă se aplică pe arc o forță  $P_{c0}$  care să învingă atât forța elastică  $P_0$ , cât și forța  $P_{f0} = \varphi P_{c0}$  ( $\varphi$  - coeficientul de frecare relativă) corespunzătoare frecării dintre lamele. La descărcarea arcului frecarea își schimbă sensul, opunându-se forței elastice, iar arcul va rămâne nedeformat până la o valoare minimă  $P_{d0}$  a forței aplicate. Prin urmare a atinge săgeata  $f_0$  sub sarcină crescătoare este necesară forța:

$$P_0 = P_{c0} - \varphi P_{c0} \quad (1.76)$$

de unde se obține:

$$P_{c0} = c f_0 (1 - \varphi). \quad (1.77)$$

La sarcini descrescătoare rezultă:

$$P_{d0} = c f_0 (1 + \varphi). \quad (1.78)$$



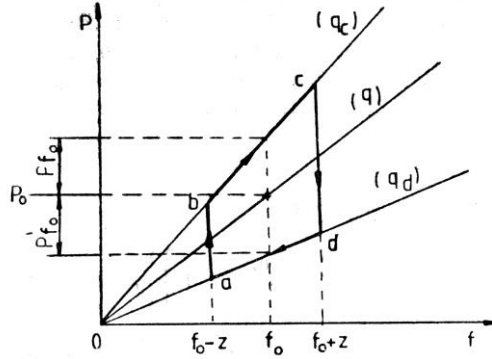


Fig. 1.33. Stabilirea caracteristicii teoretice a arcului lamelar.

Prin urmare, la încărcare arcul va avea o caracteristică  $(q_c)$  și rigiditatea  $c_c = \frac{c}{1-\varphi}$  iar la descărcare caracteristica  $(q_d)$  și  $c_d = \frac{c}{1+\varphi}$ .

Presupunând că sub acțiunea unei sarcini dinamice arcul își modifică săgeata între  $f_0 - z$  și  $f_0 + z$ , va rezulta ciclul teoretic de funcționare  $a-b-c-d$ .

Lucrul mecanic al forțelor de frecare corespunzător unui ciclu de funcționare este egal cu aria trapezului  $abcd$ :

$$L_f = \frac{1}{2} (P_c + P_d) (f_c - f_d) \quad (1.79)$$

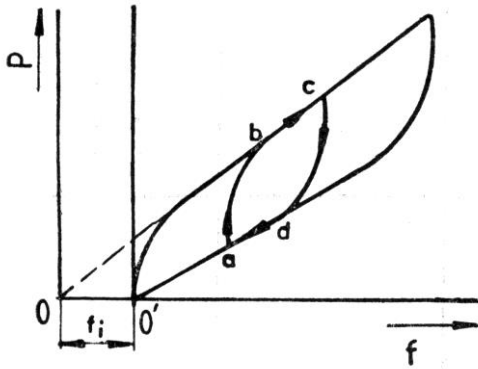


Fig. 1.34 Caracteristica reala a arcului lamelar.

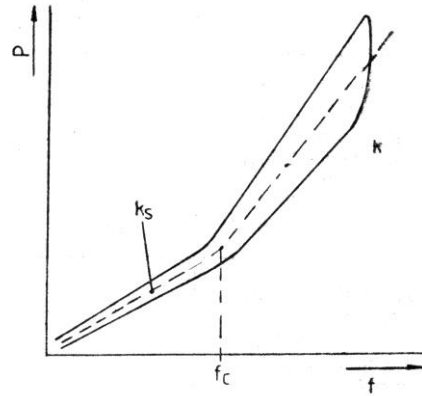


Fig. 1.35 Caracteristica arcului lamelar cu dubla flexibilitate.

Fenomenul histerzis, produs de forțele de frecare dintre lamele, constituie factorul cel mai important prin care caracteristica reală a arcului diferă de cea teoretică. Histerzisul depinde de coeficientul de frecare dintre lamele, de numărul și

dimensiunile lamelelor, de distribuția forțelor de frecare pe suprafața lamelelor. Examinând caracteristica reală a arcului (fig. 1.34), se observă de asemenea că după descărcare acesta nu revine la poziția inițială 0, ci apare o săgeată reziduală  $f_i$ .

Tipuri de arcuri lamelare standardizate UIC

Tabelul 1.3

Tipul arcului	Pentru boghiuri	Pentru vagoane cu două osii		
	Parabolic pentru 22,5 t/osie	Parabolic 20 t/osie	Parabolic 22,5 t/osie	Trapezoidal 20 t/osie
Flexibilitățile medii ale arcului determinate pe stand la o încărcare de 1 kN, în mm/kN: - arcul superior - ansamblul arcului	1.15 0.61	1.52 0.63	1.27 0.56	1.07 0.48
Flexibilitățile medii ale ansamblului arcului suspendat prin inele unificate, în mm/kN: - arcul superior - ansamblul arcului	1.13 0.54	1.82 0.59	1.55 0.55	0.88 0.48
Sarcina de comutare (la schimbarea flexibilității), în kN	40	37.6	41.4	40.5
Lungimea lamelei principale, între axele ochiurilor de prindere, în mm	1200	1200	1200	1200
Înălțimea arcului stare liberă, în mm	116	232	227	216
Secțiunea lamelor, în mm <sup>2</sup> ; - arcul superior - arcul inferior	120-21 120-28	120-20 120-35	120-21 120-36	120-15 120-20
Numărul de lamele; - arcul superior - arcul inferior	4 1	4 1	4 1	5 4
Dimensiunile bridei, m; - lățime - înălțime - înălțime	100 163 150	100 170 150	100 170 150	100 204 150
Masa, în kg	95	97	103	130

La arcurile cu dublă flexibilitate, având caracteristica prezentată în fig. 1.35, până la atingerea săgeții (de comutare)  $f_c$  lucrează numai arcul superior, după care lucrează ambele arcuri.

#### 1.4.Elemente elastice formate din inele tip RINGFEDER

##### 1.4.1. Generalități.

Tampoanele cu arcuri metalice au evoluat de la folosirea ca element elastic a arcului volut la pachetul de arcuri inelare (fig. 1.36) cu mare capacitate de absorbire a energiei și de disipare a acesteia prin frecare.

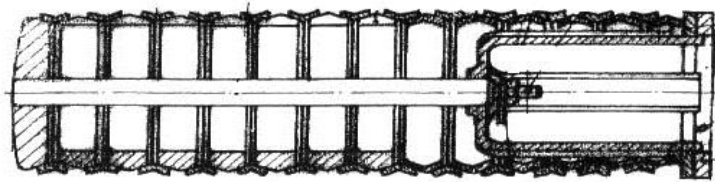


Fig. 1.36. Element elastic cu inele de tip RINGFEDER

Tampoanele cu arcuri inelare reprezintă tipul constructiv cel mai răspândit la vagoanele de marfă, în ceea ce privește vagoanele de călători și locomotivele, acestea beneficiind de condiții de exploatare mai ușoare decât vagoanele de marfă, tampoanele folosesc un amortizor hidraulic legat în paralel pachetul de inele pentru a mări capacitatea de înmagazinare a energiei și de disipare a ei pentru a mări siguranța în circulație și confortul călătorilor.

În concluzie arcurile inelare reprezintă în momentul de față o soluție constructivă larg utilizată pentru echiparea tampoanelor laterale ale vehiculelor de cale ferată din țară cât și pe plan european.

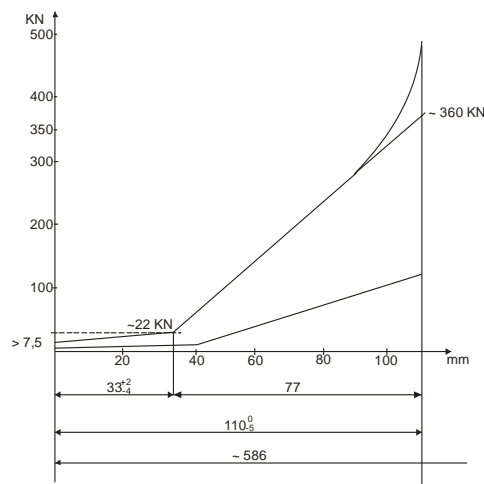


Fig. 1.37 Diagrama teoretică a pachetului de inele

**1.4.2. Calculul presiunii dintre inele**

Sub acțiunea forței axiale P , între inele se produce o presiune p care obligă inelele exterioare să-și mărească diametrul iar inelele interioare să-și reducă diametrul și să pătrundă în cele exterioare , ceea ce conduce la reducerea înălțimii pachetului de inele fig.(1.38.).

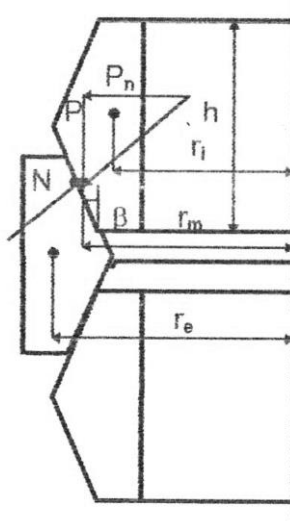


Figura 1.38 Solicitățile arcului inelar

Presiunea p este considerată uniform repartizată pe suprafața conică Sm de contact între inele, de rază medie rm , se calculează cu relația (1.58):

$$p = \frac{P}{S_m \sin \beta} \tag{1.80}$$

unde :

Sm - suprafață conică de contact între inelele [mm<sup>2</sup>]

$$S_m = \frac{\pi r_m h}{\cos \beta} \tag{1.81}$$

- P - forța axială [N] P=350000 N
- μ - coeficientul de frecare β=14° 2' 10" ≈ 14°
- rm - raza medie [mm] rm=74mm
- h - înălțimea unui inel [mm] h=32mm

$$S_m = \frac{\pi \cdot 74 \cdot 32}{\cos 14^\circ} = 7400 \text{ mm}^2$$

$$p = \frac{350000}{7400 \cdot \sin 14^\circ} = 1700 \text{ N/mm}^2$$

50 Tipuri de arcuri metalice utilizate la vehicule de cale ferată - 1

Dacă se înlocuiește  $\mu$  cu  $\operatorname{tg} \varphi$  rezultă :

$$P = \frac{p \cos \varphi}{S_m \cdot \sin(\beta + \varphi)} \quad (1.82)$$

cu:  $\varphi$  - unghiul de frecare  $\varphi = 8^\circ$

$$P = \frac{350000}{700000} = 0,5$$

Componenta pe direcție radială a presiuni este dată de relația :

$$P_r = \frac{P}{\pi \cdot r_m \cdot h \cdot \operatorname{tg}(\beta + \varphi)} \quad (1.83)$$

$$P_r = \frac{350000}{\pi \cdot 120 \cdot 12} = 77348$$

Forța de destindere  $P'$  se calculează din condiția ca la descărcare să se producă aceeași variație de presiune  $p_r$ , dar de sens contrar :

$$P' = P \frac{\operatorname{tg}(\beta - \varphi)}{\operatorname{tg}(\beta + \varphi)} \quad (1.84)$$

$$P' = 350000 \frac{\operatorname{tg}(48^\circ - 8^\circ)}{\operatorname{tg}(48^\circ + 8^\circ)} = 127$$

Pentru a evita autoblocarea arcului trebuie ca unghiul de inclinare  $\beta$  să fie mai mare de cât unghiul de frecare  $\varphi$ .

Pentru calculul tensiunilor în inele se consideră că acestea sunt uniform repartizate în secțiunile radiale ale inelelor a căror grosime poate fi considerată mică în raport cu diametrul lor .

Pentru inelul interior tensiunea este  $\sigma_e$  de întindere și se obțin din condiția de echilibru aplicată pentru o jumătate de inel :

$$\sigma_e = \frac{2hr_m p_r}{2A_e} = \frac{P}{\pi \cdot A_e \cdot \operatorname{tg}(\beta + \varphi)} \quad (1.85)$$

$$\sigma_e = \frac{350000}{\pi \cdot 21400} = 514$$

Pentru inelul interior tensiunea este :

$$\sigma = \frac{P}{\pi A_i \sin(\beta)} \quad (1.86)$$

**1.4.3. Capacitatea de acumulare a energiei de șoc și caracteristica arcului inelar.**

Sub acțiunea sarcinii inelele se deformează, producându-se deformațiile specifice :

- pentru inelul exterior:  $\epsilon_e = \frac{\sigma_e}{E}$  (1.87)

- pentru inelul interior:  $\epsilon_i = \frac{\sigma_i}{E}$  (1.88)

unde: E-modulul de elasticitate:  $E = 2,1 \cdot 10^5 \frac{N}{mm^2}$ .

Rezultând astfel o variație a razelor medii cu :

- pentru inelul exterior:  $\Delta r_e = \frac{\sigma_e \cdot r_e}{E}$  (1.89)

- pentru inelul interior:  $\Delta r_i = \frac{\sigma_i \cdot r_i}{E}$  (1.90)

Ca urmare inelul pătrunde mai mult în cel exterior și are loc o deplasare relativă pe direcția axei celor două inele date de relația :

$$\Delta s_1 = \frac{(\Delta r_e) \cdot \sigma_e \cdot r_e}{E \cdot \beta} \quad (1.91)$$

Dacă se introduc  $\sigma_e$  și  $\sigma_i$  date de relațiile (1.85) și (1.86) în relația (1.91), se obține :

$$\Delta s_1 = \frac{P}{\pi \cdot E \cdot \sin(\beta + \varphi) \cdot \sin \beta} \cdot \left[ \frac{r_e}{A_e} + \frac{r_i}{A_i} \right] \quad (1.92)$$

52 Tipuri de arcuri metalice utilizate la vehicule de cale ferată - 1

---

$$\Delta s_1 = \frac{35}{\pi \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot \text{tg} 14^\circ \cdot (14^0 + 8^0)} \cdot \left[ \frac{76,638}{248,143} + \frac{71,342}{189,709} \right] = 3,6 \text{ mm} .$$

Astfel pentru  $n_1$  inelele h avem săgeata  $f_1$  :

$$F_1 = n_1 \cdot \Delta s_1 \quad (1.93)$$

unde:  $n_1$  – numărul de inele exterioare și interioare a pachetului de inele  $n_1=19$

$\Delta s_1$  – deplasarea relativă  $\Delta s_1=3,6\text{mm}$

$$F_1 = 19 \cdot 3,6 = 68,4 \text{ mm}$$

Pentru  $n_2$  inelele de înălțime h rezultă săgeata  $f_2$  :

$$f_2 = n_2 \Delta s_2 \quad (1.94)$$

unde:

$n_2$  = numărul de inele cu fantă  $n_2=7$

$\Delta s_2$  - deplasarea relativă conform fantei inelului

$$\Delta s_2 = \Delta s_1 + \Delta s_1^* \quad (1.95)$$

unde :

$\Delta s_1^*$ - deplasarea relativă datorită fantei  $\Delta s_1^*=4\text{mm}$

$\Delta s_2=3,6+4=7,6\text{mm}$

$f_2=7 \cdot 7,6=53,2\text{mm}$

Săgeata maximă f este dată de relația :

$$f = f_1 + f_2 \quad (1.96)$$

$$f = 68,4 + 53,2 = 121,6 \text{ mm}$$

Precomprimarea tamponului:

$$f_3 = f - D \quad (1.97)$$

unde :

D- cursa tamponului  $D=110 \text{ mm}$

$$f_3 = 121,6 - 110 = 11,6 \text{ mm}$$

Cursa moale a tamponului  $f_2^*$  este dată de relația :

$$f_2^* = f_2 - f_3 \quad (1.98)$$

$$f_2^* = 53,2 - 11,5 = 41,6 \text{ mm}$$

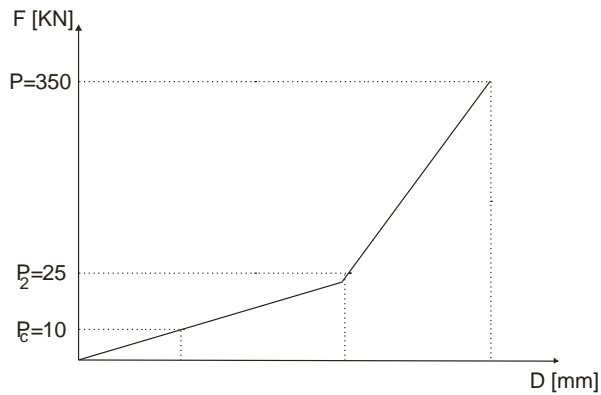


Figura 1.39 Schema de încărcare a arcului

Energia potențială de deformație înmagazinată, în ipoteza aplicării progresive a sarcinii , este dată de relația :

$$W_e = \frac{P f}{2} \tag{1.99}$$

unde:

P- forța;  
f –săgeata.

Pentru săgeata  $f_1$  , energia potențială de deformație înmagazinată este :

$$W_{e1} = \frac{(P+P_2) \cdot f_1}{2} \tag{1.100}$$

unde :

P - forța axială maximă :  $P = 350000 \text{ N}$   
 $P_2$  - forța la care se anulează fanta de la inelele cu fanta  $P = 2500 \text{ N}$



Pentru cursa moale a tamponului  $f_2^*$  , energia potențiala de deformație înmagazinata este :

$$W_2 = \frac{(P+P_c) f_2^*}{2} \tag{1.101}$$

unde :

$P_c$ - forța de precomprimare a inelelor





Unde energia potențială de deformare totală înmagazinată de tampon este dată de relația :

$$W_e = W_{e1} + W_{e2}$$

$$W_e = 12825000 + 728000 = 13553000 \quad \text{N mm}$$

Raportul dintre energia potențială de deformare consumată prin frecare  $W_a$  și energia potențială de deformare înmagazinată  $W_e$  este :

$$\frac{W_a}{W_e} = 1 - \frac{\operatorname{tg}(\beta - \varphi)}{\operatorname{tg}(\beta + \varphi)} \quad (1.102)$$

$$\frac{W_a}{W_e} = 1 - \frac{\operatorname{tg}(14^\circ - 8^\circ)}{\operatorname{tg}(14^\circ + 8^\circ)} = 0,74$$

Prin urmare , aproximativ trei sferturi din energia potențială de deformare înmagazinată este consumată prin frecările între inele și transformată în căldură . Diagramele caracteristice pun în evidență acest fapt prin aria suprafeței cuprinse între curba de încărcare și cea de descărcare a arcului .

### 1.5. Calculul cu ajutorul metodei elementului finit (MEF)

#### 1.5.1. Fundamentele modelării cu element finit

Obiectivul analizei cu element finit este de a determina cât mai precis răspunsurile unui sistem modelat și supus la anumite sarcini. La crearea unui model cu elemente finite trebuie să se țină cont de faptul că acest model este o idealizare a unui sistem fizic real. Cu foarte puține excepții, cum ar fi analiza statică a sistemelor de grinzi, cadre sau membrane, analiza cu element finit nu oferă răspunsuri exacte. Totuși, cu o modelare potrivită, oferă soluții adecvate. Când e foarte dificil să se obțină o formulare analitică a unei probleme, metoda elementului finit s-a dovedit a fi una dintre cele mai bune metode de a aborda problema [53].

Crearea unui model prin metoda elementului finit trebuie să conducă spre o acuratețe și o eficiență computațională cât mai mare. În majoritatea cazurilor, folosirea unui model complex și foarte rafinat nu este justificat dat fiind faptul că cel mai probabil oferă acuratețe computațională dar crește în mod inutil timpul de procesare. Tipul și complexitatea modelului depinde de tipul rezultatelor care trebuie să fie obținute. Ca regulă generală, se pornește cu un model cât mai simplu, rezultatele obținute, combinate cu înțelegerea comportamentului sistemului vor ajuta să decidem dacă modelul mai trebuie ajustat, și care anume parte a lui mai trebuie ajustată [4].

### 1.5.2. Tipuri de elemente finite

Cele mai comune tipuri de elemente finite sunt: bară, grindă, tensiune plană, solicitare plană, axial simetric, membrană, placă, carcasă, caramidă, tetraedru, hexaedru, elemente de margine și elemente de degajare. Majoritatea aplicațiilor din inginerie pot fi modelate cu modelele de elemente finite menționate mai sus. În afara acestor elemente de bază, celelalte tipuri speciale de elemente cum ar fi cele de conductă sau rigide sunt disponibile în bazele de date a multor programe de calcul și pot fi folosite la aplicații speciale.

Elementele de bază pot fi împărțite în 3 categorii, ținând cont de dimensiunile lor: elemente liniare, elemente de suprafață și elemente de volum. Bara, grinda și elementele de margine sunt elemente liniare. Tensiunea plană, solicitarea plană, axial simetric, membrana, placa și carcasa sunt elemente de suprafață. Solidul, tetraedrul și hexaedrul sunt elemente de volum. Ar trebui menționat că sunt diferențe considerabile între modelarea corectă în analiza dinamică sau statică [52], [54].

#### Elemente de tip bară

Structuri din bare cum ar fi rame de acoperiș sau poduri pot fi modelate cu elemente tip bară. În general, un element al unei structuri poate fi modelat printr-o bară dacă îndeplinește următoarele condiții:

- lungimea acestuia este mult mai mare decât grosimea sau lățimea (în general "mult mai mare" poate fi cuantificat de la 8 la 10 ori mai mare pentru majoritatea aplicațiilor);
- este conectat cu restul structurii prin balamale care nu permit transmiterea momentelor;
- este supus la solicitări externe care se aplică doar la îmbinări.

Elementele de tip bară pot suferi doar întindere. Prin urmare, singura proprietate a secțiunii care trebuie cunoscută este aria secțiunii axiale. Profilele geometrice ale elementelor de tip bară sunt identice cu cele ale elementelor grindă. În figura 1.40 se arată geometria și forțele nodale ale unei bare tridimensionale. Astfel o bară tridimensională are trei grade de libertate per nod, adică, trei deplasări (alungiri) după axele X, Y și Z.

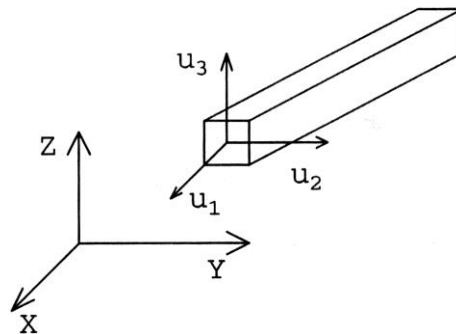


Figura 1.40 Bară tridimensională.

## Grinzi

Grinzile sunt probabil elementele utilizate cel mai frecvent. În afara de aplicația evidentă în rame, multe alte sisteme cum ar fi articulații mecanice, sisteme de conducte și grinzi de poduri pot fi modelate cu elemente de tip grindă [24].

Pentru ca un element de structură să fie modelat printr-o grindă, una dintre dimensiunile sale trebuie să fie de cel puțin 10 ori mai mare decât celelalte două. Spre deosebire de bare, grinziile pot suporta forțe tăietoare și momente, pe lângă încovoieră și compresiune. Geometria și deplasările/rotațiile la un nod sunt arătate în figura 1.41. Se observă că o grindă tridimensională are 6 grade de libertate per nod, adică 3 deplasări și 3 rotații funcție de axele X, Y, Z.

Secțiunile cele mai comune de grindă includ secțiuni I, T, circulare etc. Proprietățile secțiunilor care trebuie specificate în cazul grinziilor includ aria axială, suprafețele de tăiere, rezistența la răsucire, momentele de inerție, modelele secțiunii. În tabelul 1.4 se prezintă ariile de tăiere pentru câteva profile comune.

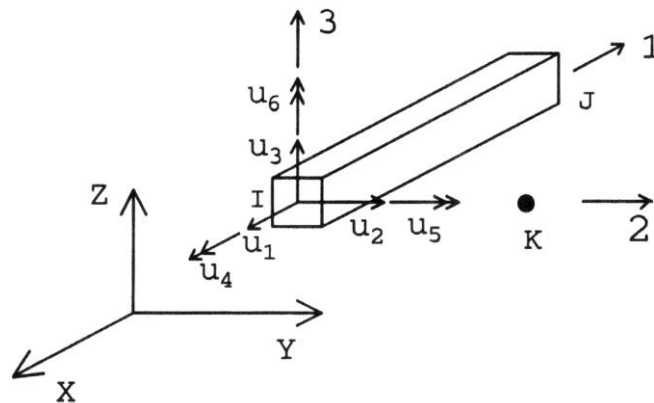


Figura 1.41. Element de tip grindă tridimensional

Dacă aria secțiunii grinzii nu este simetrică axial, orientarea elementului de tip grindă față de axele X, Y, Z este critică. Cele mai multe programe de element finit orientează o grindă cu ajutorul unui nod suplimentar K, care împreună cu nodurile de capăt I și J, definesc sistemul de coordonate locale 1, 2, 3, vezi figura 1.41 (sistemele 123 și XYZ din figura 1.41 coincid). În cazul general însă, cele două sisteme nu sunt identice.

Este recomandat ca valoarea ariei de tăiere să fie luată în calcul, dat fiind că acest fapt îmbunătățește acuratețea soluției. De obicei, valori diferite de zero pentru secțiunile de tăiere sunt luate în considerare dacă  $L < 10D$ , unde L și D sunt dimensiunile cele mai mari, respectiv cele mai mici ale grinzii [17], [25].

Constanta torsională este egală cu momentul polar de inerție doar pentru secțiuni circulare. Folosirea unei constante de torsiune greșite este o sursă foarte comună de erori în analiza ramelor. Constanta torsională pentru variate secțiuni non-circulare este disponibilă în variate surse din literatura de specialitate.

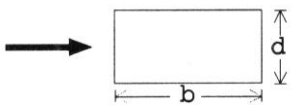
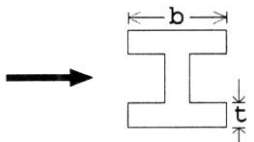
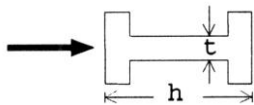
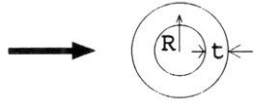
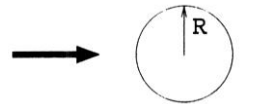
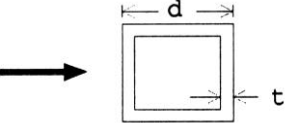
**Elemente elastice solide bidimensionale.**

Există trei tipuri de elemente bidimensionale:

1. elemente de tensiune plană
2. elemente de solicitare plană
3. elemente axial simetrice

Toate elementele bidimensionale sunt definite în planul YZ. Folosirea acestora și descrierea configurației și proprietăților lor este dată în cele ce urmează.

Tabel 1.4

Nr. Crt.	Aria secțiunii	Tipul secțiunii	Suprafața de tăiere
1.		Secțiune dreptunghiulară b : lungime d : lățime	$\frac{5}{6} \cdot b \cdot d$
2.		Secțiune I b : lățime t : grosimea tălpilor	$\frac{5}{3} \cdot b \cdot t$
3.		Secțiune I h : înălțime t : grosimea inimii	$\approx t \cdot h$
4.		Secțiune circulară cu perete subțire R : raza mediană t : grosimea peretelui	$\frac{\pi \cdot R \cdot t}{2}$
5.		Secțiune circulară plină R : raza	$0,9 \cdot \pi \cdot R^2$
6.		Secțiune pătratică cu perete subțire d : lățime t : grosimea peretelui	$2 \cdot t \cdot d$

**Elemente de tensiune plană**

Când un sistem structural este supus la condiții de tensiune plană, componentele tensiunilor normale la planul YZ devin nule.

$$\sigma_{xx} = \tau_{yx} = \tau_{zx} = 0 \tag{1.76}$$

Un exemplu reprezentativ de problemă de tensiune plană este o placă subțire încărcată pe margini cu o sarcină uniformă în planul YZ. Datorită grosimii mici a plăcii, tensiunile care apar pe marginea ei sunt foarte mici în comparație cu

tensiunile din planul YZ și pot fi ignorate în analiză. Cele mai utilizate elemente de tensiune plană sunt ori rectangulare ori triunghiulare. În orice caz, fiecare nod are două grade de libertate de translații, după cum se vede în figura 1.42.

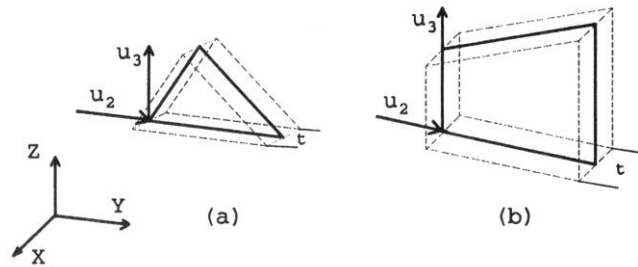


Figura 1.42. Elemente de solicitare plană a) triunghiular b) rectangular

Ca regulă generală, este de preferat un element rectangular din motive de isotropie geometrică. Totuși, este indicat să se folosească elemente tringhiulare pentru a modela mai bine margini neregulate sau regiuni de lângă goluri, vezi figura 1.43.

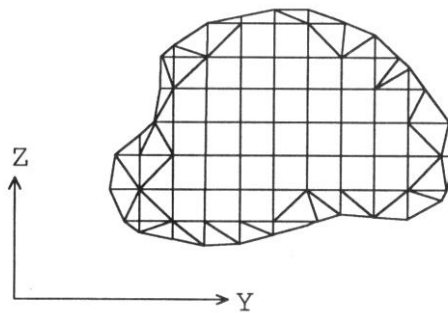


Figura. 1.43. Elemente de solicitare plană rectangulare și triunghiulare

Depinzând de aproximația tensiunilor din interiorul elementului, se folosesc două tipuri de elemente de tensiune plană: elemente cu variație constantă a tensiunii (CST) cunoscute ca și compatibile, și elemente cu variație liniară a tensiunii (LST) cunoscute ca și incompatibile. Elementele incompatibile sunt folosite cel mai adesea la modelarea regiunilor cu variații semnificative în gradientul de tensiune. O dispunere mai rafinată este necesară dacă se folosesc elemente compatibile. Cea mai bună abordare a unui model, care combină eficiența computațională a elementelor compatibile cu acuratețea celor incompatibile, este să se folosească elemente incompatibile doar acolo unde e necesară o mare acuratețe a soluției, de exemplu în regiuni cu variație mare a gradientului tensiunii, de exemplu pe lângă fisuri sau găuri. În practică însă, se folosesc elementele incompatibile pentru întreg modelul. Trebuie depus un efort de a se păstra raportul de mărime cât mai aproape de 1 (raportul dintre dimensiunile cele mai lungi și cele mai scurte ale elementului) [56].

În analiza tensiunilor plane trebuie să:

a. să păstreze raportul de mărime cât mai aproape de unitate, adică să se tindă spre elemente tringhiulare echilaterale sau pătrate.

b. să păstreze unghiurile cât mai aproape de  $90^\circ$  la elemente rectangulare.

### Elemente de solicitare plană

Un sistem este considerat ca fiind în condiții de solicitare plană dacă una dintre dimensiunile sale, de exemplu în lungul axei  $X$ , este mult mai mare decât celelalte două și este supusă unei sarcini care nu variază în lungul axei  $X$ . Exemple tipice sunt barajele, tunelele dar și sisteme mai mici cum ar fi bare comprimate de forțe normale la secțiunea lor transversală. Dacă o structură îndeplinește condițiile de solicitare plană și este forțată să se deformeze după cea mai lungă dimensiune, atunci solicitarea  $\varepsilon_{xx}$  este nulă, ( $\sigma_{xx}$  nu este nulă). Dacă structura nu este restrânsă la o singură axă, atunci  $\varepsilon_{xx}$  este o constantă diferită de zero. Acest din urmă caz este cunoscut ca solicitare plană generalizată. În orice caz, totuși, se pot determina tensiunile prin simpla modelare a unei secțiuni din planul  $YZ$  care suportă sarcina aplicată unei unități de lungime pe axa  $X$  [28], [29].

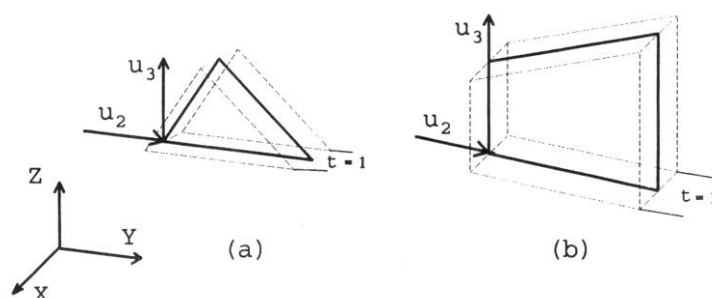


Figura 1.44 Elemente de solicitare plană a) triunghiulare b) rectangulare

Cele mai comune elemente de solicitare plană sunt ori triunghiulare ori rectangulare cu două grade de libertate de translație, per nod, după cum se vede în figura 1.44. Au aceeași geometrie I, aceleași grade de libertate ca și elementele de tensiune plană, diferența fiind că elementele de solicitare plană au grosime unitară, pe când grosimea elementelor de tensiune plană este  $t$ . Remarcile făcute despre raportul de mărime și elementele compatibile și incompatibile la elementele de tensiune plană sunt valide și pentru elementele de solicitare plană.

### Elemente axial simetrice

Rezervoare de oțel sau beton, rotoare, diuze – toate sunt structuri axial simetrice reprezentative. În mod asemănător cu structurile tridimensionale care sunt sub acțiunea unei tensiuni sau solicitări plane, structurile axial simetrice solocitate de sarcini axial simetrice pot fi analizate ca sisteme bidimensionale. Pentru a analiza o structură axial simetrică, cum ar fi un cilindru de grosime  $t$ , supus la o presiune internă uniformă  $p$ , se modelează intersecția cilindrului cu planul  $YZ$  în cadranul pozitiv al sistemului  $XYZ$ , reprezentat cu linii continue în figura 1.45(b) ( $Z$  este axa sarcinii și de simetrie geometrică, iar coordonatele radiale sunt specificate în lungul axei pozitive  $Y$ ). Mai multe programe de calcul nu permit valori negative pentru  $Y$ . Sarcina  $p$  aplicată modelului din figura 1.45.(b) corespunde unei secțiuni a structurii obținute prin rotirea unei secțiuni a structurii în jurul axei  $Z$  cu un unghi de unitate

$\theta = 1$  rad. Elementele axial simetrice triunghiulare și rectangulare au două grade de libertate, două translații per nod, vezi figura 1.45(c) și 1.46(d).

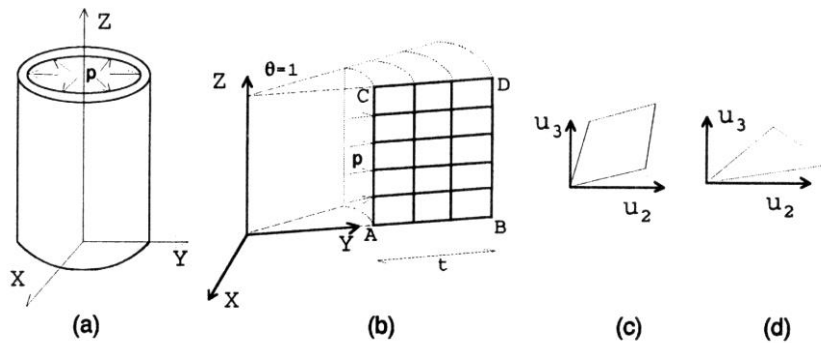


Figura 1.45. (a) Cilindru sub presiune internă (b) Model axial simetric în planul YZ (c) element rectangular (d) element triunghiular

Atât elementele triunghiulare cât și cele rectangulare s-au dovedit a fi foarte exacte în comparație cu soluțiile analitice clasice. Comentariile făcute în discuția elementelor de tensiune plană compatibile sau incompatibile sunt valabile și pentru elementele axial simetrice [63].

#### Elemente de tensiune plane tridimensionale sau membrane

Exemple de structuri care pot fi analizate cu elemente de tip membrană includ acoperișuri alcătuite din materiale asemănătoare textilelor care sunt folosite la acoperirea stadioanelor sportive. Datorită grosimii lor foarte mici, asemenea materiale pot dezvolta doar tensiuni în plan [64].

Membranele pot fi considerate ca și elemente de tensiune plană tridimensionale. Diferența constă în faptul că membranele au trei în loc de două grade de libertate, de translație, după cum se vede în figure 1.46. Trebuie ținut cont de faptul că o membrană nu trebuie să fie așezată în mod necesar în planul YZ cum se întâmplă în cazul elementelor de tensiune plană bidimensionale.

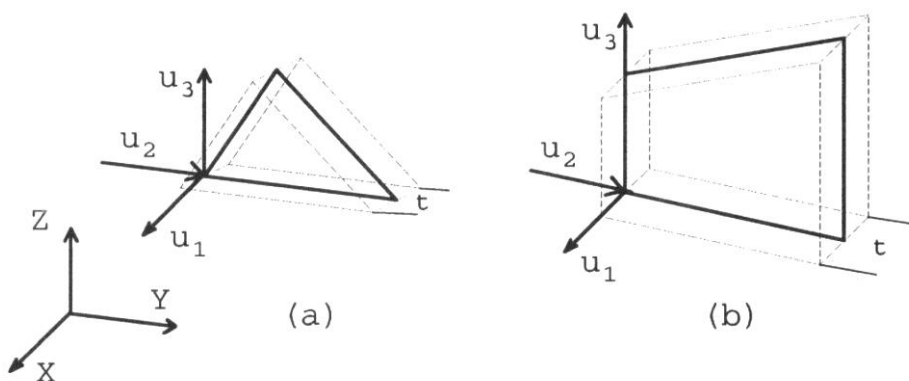


Figura 1.46. Membrane : (a) triunghiulare (b) rectangulare

### Plăci și carcase

Modelele de plăci și carcase sunt folosite în mod extensiv. Ele sunt folosite în mod comun la structuri arhitecturale, containere, avioane, vase, rachete și componente de utilaje. Plăcile sunt structuri plane, plate cu o grosime foarte mică în comparație cu celelalte dimensiuni ale lor.

Comportamentul la aplicarea unei sarcini a plăcilor este asemănător cu cel al grinzilor. În fapt, comportamentul plăcilor poate fi asemuit cu cel al unei rețele de grinzi răspândite în două direcții perpendiculare în același plan. Acțiunea la sarcină bidimensională a plăcilor are ca rezultat structuri ușoare și economice. În modelarea cu elemente finite a unei plăci, ceea ce modelăm este suprafața intermediară, care este un plan paralel cu cele două suprafețe ale plăcii și care împarte grosimea în două părți egale.

Modelarea plăcilor se face de obicei cu modele triunghiulare sau rectangulare. Fiecare punct nodal posedă cinci grade de libertate în sistemul  $xyz$ : trei translații în lungul axelor  $x, y$  și  $z$  precum și două rotații în jurul axelor  $x$  și  $y$ . Nu există un grad de libertate specificat pentru direcția  $z$ , normală la planul plăcii, vezi figura 1.47. Totuși, o valoare foarte mică a rigidității rotaționale este dată pentru axa  $z$ , pentru a elimina instabilitatea numerică.

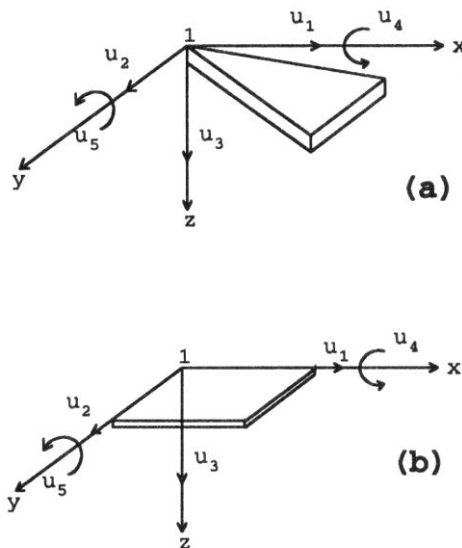


Figura 1.47. Plăci și grade de libertate la nodul 1. (a) triunghiular (b) rectangular

Carcasele subțiri pot fi considerate ca și plăci cu o suprafață curbată. În acest text carcasele vor fi considerate elemente de placă folosite pentru modelarea suprafețelor curbate. De fapt, majoritatea programelor disponibile în comerț pentru modelarea cu element finit se bazează pe plăci pentru modelarea carcaselor și a structurilor cu suprafețe curbate. În ceea ce privește plăcile subțiri, suprafața mediană a carcaselor subțiri e modelată cu elementele de tip placă.



Două aspecte trebuie considerate când se modelează carcase subțiri cu elemente de placă:

a. pentru o bună acuratețe a soluției, e recomandabil ca plăcile să aproximeze carcasa la unghiuri de aproximativ  $4^\circ$  până la  $10^\circ$  (figura 1.48).

b. lipsa unui grad de libertate rotațional în jurul axei z poate cauza o instabilitate numerică. Poate apărea cazul în care plăcile se intersectează la un unghi mai mic de  $4$  grade, vezi figura 1.49. Instabilitatea numerică ar putea să nu permită procesarea modelului și poate cauza un mesaj de eroare. O soluție a acestei probleme este folosirea unor elemente elastice de rotație cu rigiditate foarte mică relativ la axele paralele la laturile comune ale elementelor.

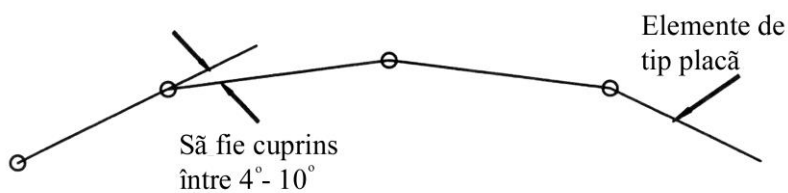


Figura 1.48. Modelarea carcaselor subțiri prin plăci

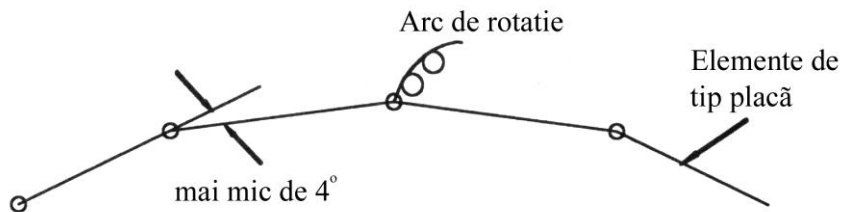
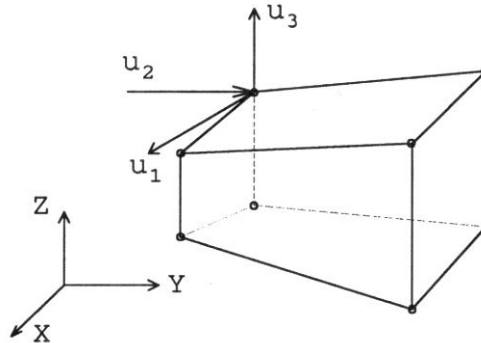


Figura 1.49. Arc de rotație cu rigiditate redusă pentru evitarea instabilității numerice

### Elemente elastice tridimensionale sau cărămizi.

Plăcile groase, componente cilindrice sau sferice groase, îmbinări groase sunt doar câteva exemple unde elementele solide pot fi folosite pentru a realiza o analiză cu element finit. În general, structurile sau componentele structurale cu o grosime comparabilă cu celelalte două dimensiuni pot fi modelate cu cărămizi.

Elementele solide sunt elemente tridimensionale cu trei grade de libertate translaționale per nod. Ele pot fi studiate ca membrane care pot ține cont și de variația tensiunilor pe grosime. Nodurile sunt introduse de obicei la oricare intersecție a trei plane sau la mijlocul intersecției a două plane. O cărămidă cu opt noduri și gradele de libertate corespunzătoare unui nod sunt arătate în figura 1.50.



Figur 1.50. Element tip cărămidă și gradele de libertate la un nod.

Avantajul folosirii elementelor solide în locul plăcilor sau grinzilor pentru modelarea componentelor cu grosime mare este că elementele solide pot oferi informații legate de variația tridimensională a tensiunilor și deformațiilor componentelor. Plăcile și grinzile nu pot oferi asemenea informații și ar trebui folosite cu grijă și doar pentru o analiză preliminară a sistemelor având mărimi comparabile pe toate trei dimensiunile.

Când elementele solide sunt interconectate cu grinzi, plăci sau carcase trebuie avută o foarte mare grijă să se păstreze gradele de libertate rotaționale la nodurile comune. Aceasta se poate obține relativ ușor prin extinderea artificială a grinzilor sau plăcilor în elementele solide, vezi figura 1.43.

### Elemente tetraedrale și hexaedrale

În locul elementelor cărămidă, elementele tetraedrale sau hexaedrale pot fi folosite în modelarea structurilor tridimensionale. Tetraedrul poate fi văzut ca o extindere a tringhiului în a treia dimensiune, vezi figura 1.51, în timp ce hexaedrul poate fi considerat omologul dreptunghiului extins în a treia dimensiune. Trebuie luat în considerare ca elementul hexaedric are aceeași formă geometrică ca și elementul cărămidă cu opt noduri din figura 1.50. Diferența dintre acestea este formularea teoretică și acuratețea computațională. Elementele tetraedrale și hexaedrale folosite cel mai adesea au doar trei grade de libertate, de translație per nod, vezi figura 1.51(a). Acuratețea elementelor tetraedrale și hexaedrale este sporită prin introducerea unor noduri suplimentare la jumătățile laturilor, figura 1.51 (b).

Tehnicile automate de discretizare favorizează elementele tetraedrale și hexaedrale asupra cărămizilor pentru crearea modelelor detaliate a sistemelor tridimensionale cu geometrii complexe, de exemplu Supergen, Supersurf, Hypergen și Hexagen în Algor. În aplicații practice, folosirea elementelor tetraedrale necesită atenție pentru elaborarea unor modele fără "găuri". În general, elementele hexaedrale sunt mai exacte decât cele tetraedrale și ar trebui preferate în realizarea modelelor. Cu toate acestea, elementele tetraedrale sunt mai versatile deoarece ele permit realizarea unor geometrii mai complexe și facilitează tranziția între regiunile cu granulație mare și cele cu granulație mică. În majoritatea cazurilor, combinarea elementelor tetraedrale cu cele hexaedrale oferă soluția optimă.

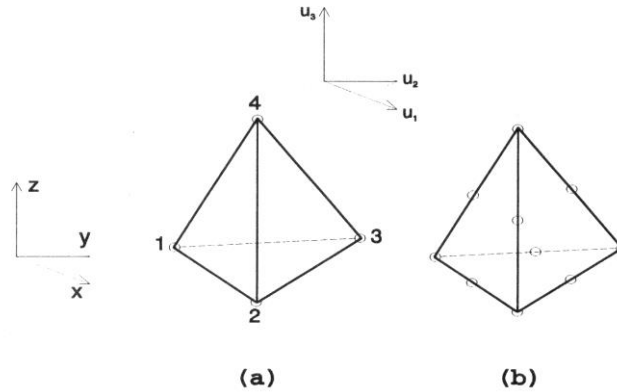


Figura 1.51. (a) tetrahedru cu 4 noduri (b) tetrahedru cu 10 noduri

### Elemente limită

Elementele de limită sunt folosite pentru modelarea condițiilor de limită și legăturilor dintre componentele structurale. Prin urmare, ele pot fi folosite ori pentru evaluarea reacțiilor la reazeme rigide, flexibile, și legături elastice ori pentru specificarea deplasărilor diferite de zero și rotațiilor la noduri. (elementele de limită au două noduri). Linia definită de cele două noduri specifică direcția în care, sau în jurul căreia, este evaluată reacțiunea (forță sau moment) sau e specificată deplasarea (translație sau rotație), vezi fig 1.52.

Elementele de limită care sunt folosite pentru obținerea forțelor de reacțiune (elemente de limită rigide) sau pentru specificarea deplasărilor de translație (elemente de limită de deplasare) pot fi considerate elemente bară cu doar o rigiditate translațională diferită de zero. Când sunt folosite pentru a evalua reacția momentelor sau a specifica rotațiile, ele se aseamănă cu grinzi cu doar o rigiditate diferită de zero, adică rigiditatea rotațională în jurul axei specificate de utilizator.

Elementele de margine elastice sunt folosite pentru modelarea suporturilor flexibile și pentru calcularea reacțiunilor la margini înclinate. Rigiditatea elementelor elastice este definită de utilizator. Este nevoie de atenție foarte mare când se modelează reazeme înclinate. În acest caz, utilizatorul ar trebui să folosească elementele limită translaționale sau elastice și să folosească o rigiditate moderat de ridicată pentru elementele elastice.

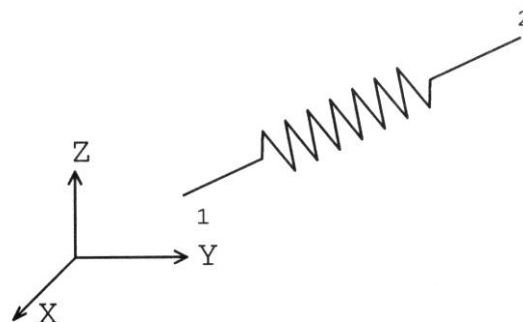


Figura 1.52. Elemente de margine

După cum am menționat în paragraful asupra plăcilor și carcaselor, elementele de limită cu rigiditate redusă pot fi folosite și la modelele de carcase subțiri, vezi figura 1.49.

### 1.5.3. Alegerea tipurilor de elemente

Înainte de alegerea tipurilor de elemente pentru modelarea unei structuri, trebuie să schițăm sistemul fizic, indicând geometria generală condițiile limită, sarcinile și regiunile cu discontinuități materiale sau geometrice. Schița ar trebui să indice și sistemul global de coordonate și dimensiunile structurii.

Mai departe, trebuie studiat dacă mărimea modelului poate fi redusă. Tensiunile și solicitările plane precum și elementele axial simetrice permit reducerea problemelor tridimensionale la probleme bidimensionale. În plus, prezența planelor de simetrie permite modelarea unei singure părți a structurii. Conturul sistemului fizic ne va ajuta în alegerea corectă a tipurilor de modele. De exemplu, pentru a modela componente încărcate transversal sau axial din sisteme mecanice, electrice sau civile, putem folosi grinzi și bare. Elemente de tensiune plană sunt potrivite pentru modelarea acțiunilor în plan ale plăcilor și grinzilor scurte. Elementele de solicitare plană sunt folosite de obicei pentru modelarea pereților de sprijin sau a barajelor lungi. Elementele axial simetrice sunt folosite pentru modelarea structurilor care au o simetrie de rotație față de o axă și sunt încărcate simetric sau antisimetric față de aceeași axă, cum ar fi cilindri supuși la presiuni interne.

Alegerea tipurilor de elemente depinde și de rezultatele cerute. De exemplu, cilindrul din figura 1.53 cu capetele încastrate și supus la o sarcină concentrată poate fi modelat în mai multe feluri:

- a) o grindă dacă suntem interesați de un calcul aproximativ al deformațiilor
- b) un model implicând plăci/carcase poate fi folosit dacă avem nevoie de un calcul mai exact

Alegerea dintre plăci sau elemente solide nu este întotdeauna ușoară. Ca regulă generală, se folosesc plăci pentru modelarea structurilor neaxial simetrice, carcase subțiri și a structurilor plane, și cărămizi, modele tetraedrale sau hexaedrale pentru structurile groase. Mișcările reazemelor elastice pot fi modelate cu elemente de limită rigide și elastice. Elementele de degajare sunt potrivite pentru modelarea cablurilor și a spațiilor dintre structuri sau componente structurale.

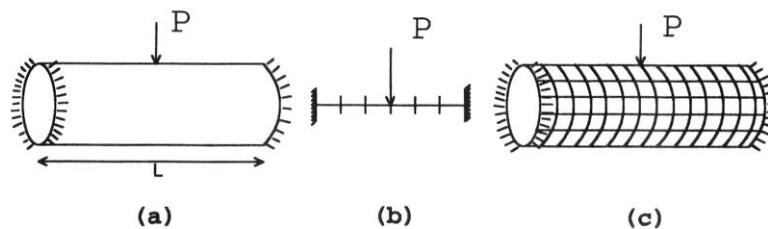


Figura 1.53. (a) cilindru cu capetele încastrate supus la o sarcină concentrată; (b) modelul grindă; (c) modelul cu placă/carcasă

Anumite probleme pot fi rezolvate prin mai multe tipuri de analiză. De exemplu, cilindrul supus la presiune internă, poate fi analizat în cel puțin trei moduri diferite:

a. o problemă de solicitare plană. În acest caz, geometria modelului constă dintr-o secțiune circulară obținută prin intersectarea cilindrului cu planul YZ. Folosindu-se elemente de solicitare plană, obținem rezultate valide pentru orice secțiune a cilindrului depărtată de capetele încastrate.

b. o problemă axial simetrică. Modelul care se folosește cu elemente axial simetrice este arătat în figura 1.45(b) cu linii continue. În acest model, toate nodurile de pe laturile AB și CD sunt restrânse, iar presiunea  $p$  este aplicată pe latura AC. Deformația și tensiunile rezultate din analiza modelului axial simetric sunt valide pentru toată structura. A se nota ca putem analiza cilindrul astfel pentru că sarcina este și ea axial simetrică.

c. o structură cu adevărat tridimensională. Cilindrul e modelat folosindu-se plăci, vezi figura 1.53(c). Acesta e cel mai elaborat și cel mai puțin eficient model; ar fi alegerea potrivită dacă sarcina nu ar fi axial simetrică.

### Combinăția diferitelor tipuri de elemente

În majoritatea cazurilor, trebuie alese mai multe tipuri de elemente pentru modelarea unui sistem, de exemplu, pentru un pod se pot folosi plăci pentru modelarea punții, grinzi pentru piloane, elemente solide pentru întărituri și elemente elastice pentru fundații. Pentru modelarea intersecțiilor de conducte sau a pereților lateral și inferior ai unui rezervor, se pot folosi plăci cu granulație mai fină în regiunea intersecției, vezi figura 1.54. Totuși, se poate obține o acuratețe mai mare în regiuni critice prin folosirea plăcilor pentru conducte sau pereți și elemente solide pentru regiunile de la intersecții, vezi figura 1.55. Pentru fiecare componentă modelată cu un tip de element, trebuie urmate recomandările corespunzătoare aceluși tip de element.

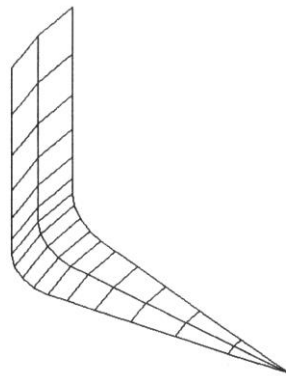


Figura 1.54. Model cu plăci pentru secțiune inferioară și laterală a unui rezervor

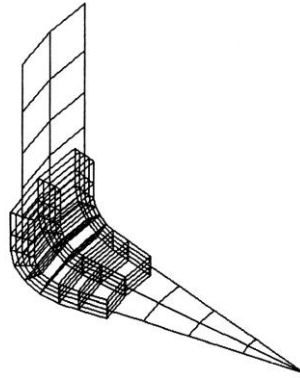


Figura 1.55. Model combinat de plăci și elemente solide pentru secțiune inferioară și laterală a unui rezervor

Când se combină diferite tipuri de elemente care nu au aceleași grade de libertate, de exemplu, plăci și elemente solide sau grinzi și elemente tetraedrale, trebuie acordată atenție gradelor de libertate la nodurile comune. Acest lucru este ilustrat în figura 1.56(a). Pentru a simula continuitatea tensiunilor și solicitărilor în punctul A, grinzi AB, BC, BD și BE au fost adăugate modelului, vezi figura 1.56(b).

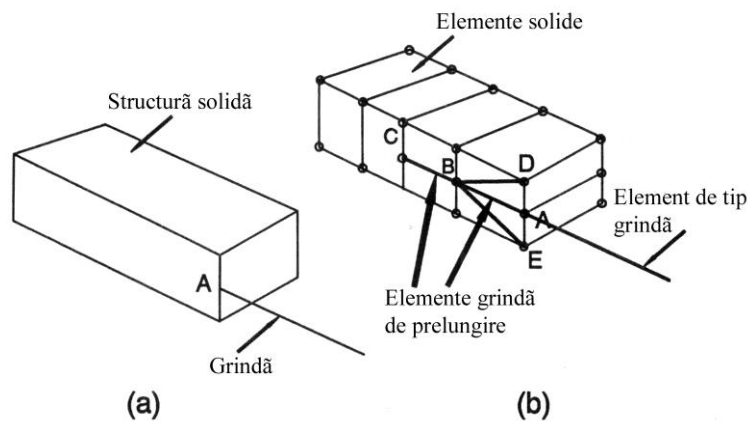


Figura 1.56. Modelarea unei intersecții solid-grindă.

#### 1.5.4. Principii de modelare

Crearea unui model adecvat este pasul principal în analiza cu element finit. Scopul este să se dezvolte cel mai potrivit model nodal care oferă suficiente elemente pentru a obține rezultate exacte fără a se pierde interpretarea datelor sau timpul de procesare. Modelarea trebuie mereu să fie bazată pe înțelegerea conceptuală a sistemului fizic și pe judecata asupra comportamentului anticipat al structurii. Pe lângă a înțelege comportamentul sistemului, analistul trebuie să facă efortul de a înțelege conceptele fundamentale a teoriei elementului finit. Nerealizarea acestor fapte va duce în mod aproape sigur la rezultate lipsite de semnificație.

Recomandări generale

1. Definierea nodurilor în apropiere de punctele de aplicare a sarcinilor, punctele de discontinuități geometrice, la reazeme și la acele regiuni unde este nevoie de informații legate de tensiuni sau deformații.
2. Un element finit discretizat trebuie să fie uniform oriunde este aplicabil. Totuși, neuniformitatea este adesea necesară pentru a obține rezultate corecte în regiunile cu schimbări rapide în geometrie sau sarcină. Granulația trebuie rafinată doar în acele regiuni unde geometria, tensiunile sau sarcina se schimbă dramatic, vezi figura 1.57.
3. E de preferat să se folosească elementele rectangulare, solide cu șase fețe sau hexaedrale, cu excepția locurilor unde sunt necesare elemente triunghiulare, solide cu patru fețe și elemente tetraedrale pentru a acomoda neregularități în geometrie sau sarcină.
4. Când se folosesc plăci pentru a modela suprafețe curbe, se menține un unghi subîntins de sub  $10^\circ$  (figura 1.48).
5. O granulație mai fină este necesară pentru a obține în mod exact tensiunile decât deformațiile. Dacă e nevoie, se face un studiu de convergență, se pornește cu un model simplu, cu un număr relativ redus de elemente și se progresează apoi spre un model mai rafinat cu un număr mai mare de elemente. Figura 1.59. ilustrează procedura cu modele de tensiune plană pentru o grindă scurtă, încastrată într-o parte.

*Raportul de aspect*

Este definit ca raportul dintre dimensiunea cea mai lungă și cea mai scurtă a elementului. În figura 1.59. se prezintă configurații de tipuri de elemente tridimensionale clasificate ca și "bune", "slabe" și "ilegale". Elementele bune sunt caracterizate de un raport de aspect apropiat de unitate și unghiuri în jur de  $90^\circ$ . Elementele slabe ar trebui evitate, deoarece pot duce la rezultate slabe. Elementele ilegale sunt inacceptabile și nu ar trebui folosite în procesul de modelare. Când sunt desenate în mod neintenționat forme ilegale de elemente, ele creează viduri în modelele de element finit. Mai multe programe pentru analiza elementului finit disponibile în comerț permit identificarea acestor erori.

6. Dacă câmpul tensiunilor are gradiente similare în toate direcțiile, se încearcă să se păstreze un raport de aspect de 1. Elementele cu un raport mare ar trebui evitate, vezi figura 1.59(a). Totuși, elementele caracterizate ca slabe în figura 1.59 pot fi folosite în analiză, în condițiile în care ele modelează regiuni ale structurii unde gradientul tensiunii variază foarte lent în lungul dimensiunii cele mai mari a elementelor. Elementele ilegale ar trebui evitate. Datorită geometriei lor și locațiilor nodurilor, elementelor ilegale nu li pot asocia proprietăți de element finit.
7. Pentru regiuni cu variații mici ale tensiunilor, raportul de aspect poate fi și 40 la 1 și totuși să dea rezultate bune. Ca regulă generală totuși, raportul de aspect al elementelor ar trebui menținut sub 10 pentru analiza deformațiilor și sub 3 pentru analiza tensiunilor, vezi figura 1.60(b). Trebuie luat în considerare că în analiza deformațiilor accentul este plasat pe deplasarea nodurilor în timp ce la analiza tensiunilor suntem interesați de acuratețea computațională atât a deplasărilor cât și a tensiunilor.
8. Schimbările rapide a mărimii elementelor trebuie evitate. Când e necesară folosirea unor elemente de diferite mărimi, se modelează regiunile tranziționale schimbând dimensiunile elementelor adiacente cu un factor mai mic de 2.

*Elemente înclinate*

Înclinarea este definită ca variația unghiurilor de vârf ale elementelor de la  $60^\circ$  pentru triunhuri și  $90^\circ$  pentru patrulatere. Se observă că două dintre elementele slabe din figura 1.59. (b) pot fi caracterizate ca înclinate.

9. Pentru elementele triunghiulare se evită unghiurile ascuțite mai mici de  $30^\circ$  iar pentru elementele patrulatere se evită unghiurile obtuze mai mari de  $120^\circ$ , figura 1.59(b). Ca regulă generală, folosirea elementelor înclinate este acceptabilă atunci când interesează în principal un calcul exact al deformațiilor. Pentru un calcul al tensiunilor, atunci mai puține elemente înclinate ar trebui încadrate în model.

*Discontinuități geometrice*

10. Găurile, fisurile și schimbări localizate ale geometriei pot fi caracterizate ca discontinuități geometrice. Modelarea discontinuităților geometrice depinde de interesul pentru un calcul exact în regiunile din vecinătatea discontinuităților. Dacă nu interesează deformații sau tensiuni în regiunea discontinuității atunci se poate folosi un model global al structurii care are o granulație mare în jurul discontinuității. Dacă scopul este de a obține răspunsul în jurul discontinuității atunci trebuie să se folosească un model local. Spre deosebire de modelul global, modelul local folosește o granulație fină în jurul discontinuității.

Există două abordări de bază în modelarea găurilor, fisurilor și zgârieturilor:

- Prima implică folosirea unui model local. Aceasta necesită o discretizare detaliată pentru o modelare foarte exactă a regiunii din jurul discontinuității.
- dacă se cunoaște factorul de concentrare a tensiunii,  $K$ , un model care calculează tensiunea în jurul discontinuității poate fi folosit. Acest model este mai puțin exact decât cel de la punctul a.

Când există schimbări geometrice bruște, ar trebui folosită o discretizare mai rafinată în regiunea unde sunt localizate schimbările, vezi figura 1.54 și 1.57. Un model similar cu cel din figura 1.55 care folosește o discretizare densă de elemente solide pentru a conecta plăci în regiunea de interes este o altă alternativă.

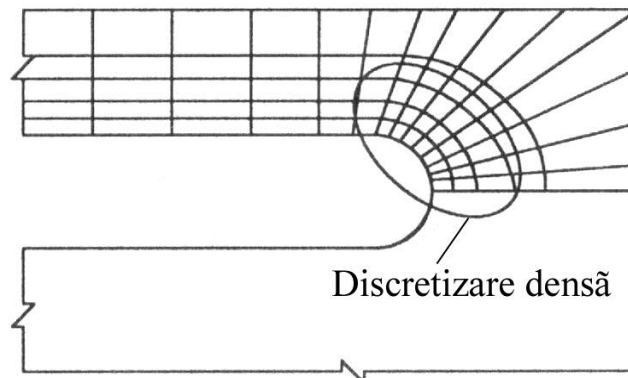


Figura 1.57. Placă cu concentrator de tensiune



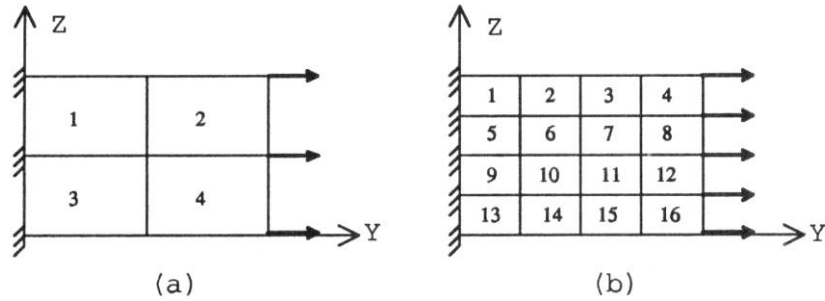


Figura 1.58. Modele cu 4 și 16 elemente ale unei grinzi încastrate la un capăt

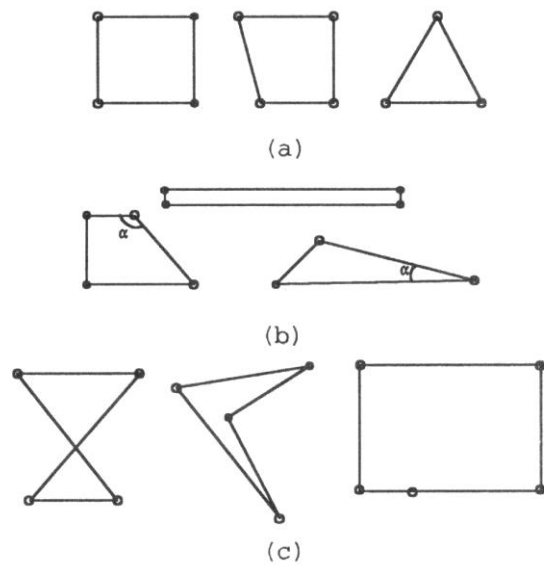


Figura 1.59. (a) "Bun"; (b) "Slab"; (c) "Illegal"

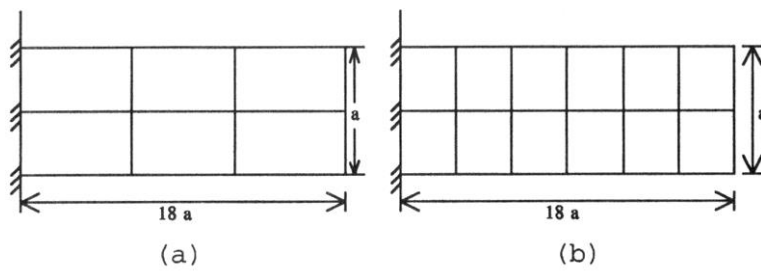


Figura 1.60. (a) raport de aspect foarte mare; (b) raport de aspect în limite acceptabile pentru analiza deformației

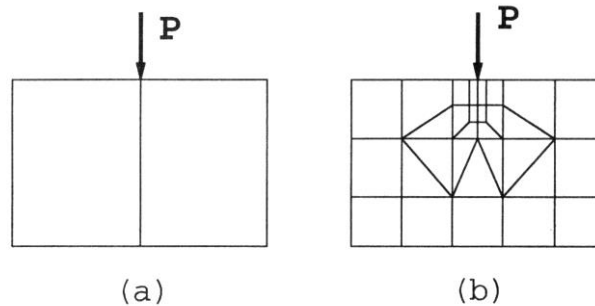


Figura 1.61. Discretizarea în vecinătatea sarcinilor concentrate (a) mare; (b) densă

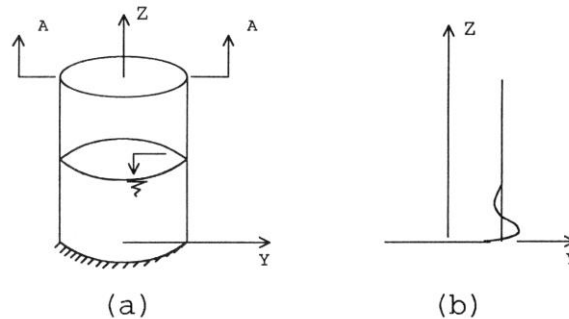


Figura 1.62. (a) cilindru plin cu lichid; (b) variația momentelor și atenuare a lungimii în secțiunea A-A.

#### *Discontinuități ale materialului*

11. Schimbările bruște ale proprietăților materialului pot fi abordate cu metodele sugerate pentru discontinuități geometrice, adică folosindu-se modele globale sau locale.
12. Pentru materiale isotrope, raportul lui Poisson nu trebuie să se apropie de 0,5. În plus, pentru un raport al lui Poisson apropiat de 0, structura poate să își piardă aproape toată rigiditatea, iar ca și consecință rezultatele pot fi eronate.
13. Pentru materiale anisotrope, limitele teoretice ale raportului lui Poisson și ale modulului Young în direcțiile specificate trebuie verificate pentru a se evita erori.

#### *Schimbări bruște ale rigidității*

14. Se recomandă a fi evitate modelele cu elemente care au rapoarte de rigiditate diferind cu mai mult de  $10^4$ . Raportul rigidității maxime/minime este de obicei dat în rezultatele numerice ale programului folosit. Variațiile mari de rigiditate a unui model pot duce la singularități și matrici care nu pot fi prelucrate numeric de procesor. Variații mari de rigiditate pot avea loc la modele care conțin elemente cu dimensiuni foarte mici sau foarte mari, la modele care simulează componente moi sau foarte rigide.

#### *Schimbări bruște de sarcină*

15. O discretizare rafinată trebuie folosit în vecinătatea schimbărilor bruște de sarcină pentru a captura variația tensiunilor în acea zonă. Un exemplu este

arătat în figura 1.61. Mărimea regiunii care trebuie modelată cu o discretizare mai rafinată depinde de lungimea de atenuare de la punctul de aplicare al sarcinilor, vezi figura 1.62.

### 1.5.5. Aplicarea condițiilor limită

Condițiile limită tipice implică articulație, încastrare și suport liber. Articulațiile sunt simulate punându-se toate deplasările egale cu zero cu excepția celor în direcțiile în care se pot deplasa articulațiile. Condițiile tipice pentru o bară bidimensională sunt ilustrate în figura 1.63. Condițiile limită sunt specificate în sistemul global de coordonate.

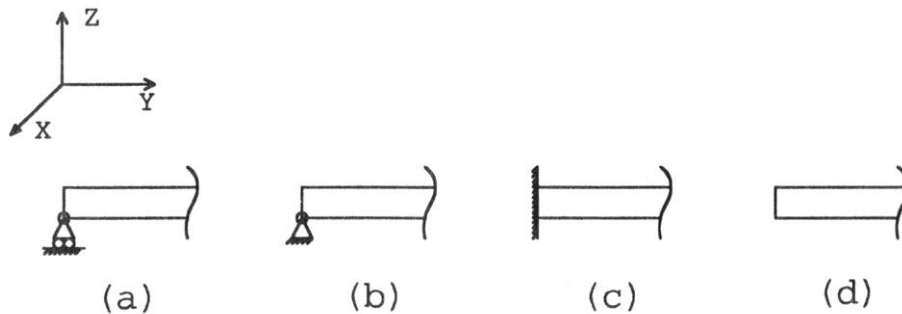


Figura 1.63. (a) articulație; (b) balama; (c) încastrare; (d) margini libere.

În probleme care implică grinzi este necesar a se include legături cu balamale. Asemenea legături nu permit transferul momentelor sau forțelor tăietoare.

Considerând rama din figura 1.64, în care deplasările orizontale ale nodurilor 2, 4 și 6 sunt aceleași. Acesta este un caz des întâlnit în analiza ramelor unde rigiditatea axială a grinzilor este mult mai mare decât rigiditatea flexională a coloanelor. Programele de analiză a elementului finit de obicei permit utilizatorului să impună deplasări egale la nodurile așezate de-a lungul anumitor direcții, cu ajutorul opțiunii master-slave, de exemplu Algor Software Companion with Verification Examples. Folosirea opțiunii master-slave poate duce la reducerea substanțială a gradelor de libertate și prin urmare trebuie folosită oriunde e posibil.

Deplasările de magnitudini și direcții specificate precum și condițiile limită înclinate pot fi definite de-a lungul limitelor structurii cu ajutorul elementelor limită.

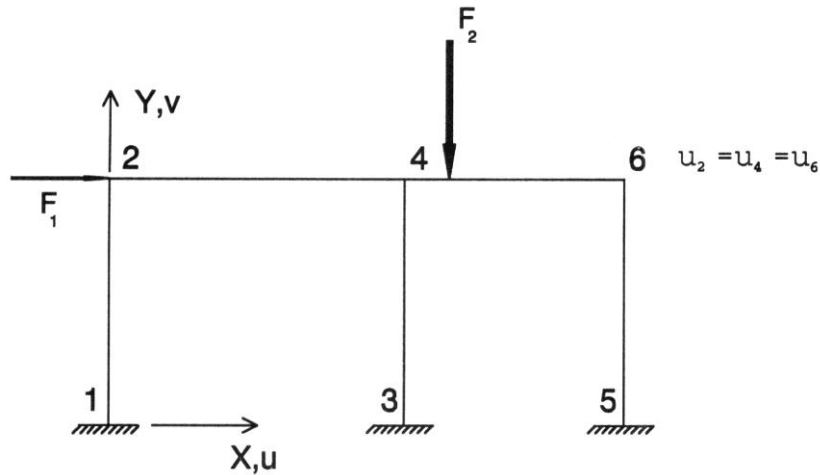


Figura 1.64. Opțiunea Master-Slave

În cazul simetriei, condițiile limită trebuie specificate și la planurile de simetrie. În cazul oricărui tip de analiză cu excepția celei modale și cinematice, condițiile limită nu trebuie să permită mișcarea corpurilor rigide. Prezența mișcării corpurilor rigide nu garantează o soluție singulară a problemei.

### 1.5.6. Aplicarea sarcinilor

În multe probleme statice, contribuția sarcinilor pasive la deformația structurilor poate fi neglijată în comparație cu contribuția sarcinilor active. Pentru aceste cazuri, setarea masei sau densității la 0 nu doar că nu afectează soluția dar și economisește mult timp de procesare. Cu toate acestea, în analiza dinamică masa sau densitatea corpurilor trebuie introdusă pentru a se lua în calcul efectele forțelor de inerție.

Sarcinile și reacțiunile concentrate produc tensiuni mari în vecinătatea punctelor de aplicare. Prin urmare, modelarea trebuie rafinată foarte mult în jurul sarcinilor concentrate, dacă sunt necesare rezultate suficient de exacte în jurul acestor sarcini, vezi figura 1.61.

În analiza statică și dinamică a barelor, doar sarcinile nodale pot fi aplicate elementelor bară. Sarcinile nodale pot fi doar forțe concentrate dat fiind faptul că nodurile nu pot suporta momente. În analiza statică a grinzilor și ramelor, programele comerciale folosesc sarcini echivalente ca lucru mecanic pentru a putea lua în considerare efectele unor sarcini uniforme care acționează asupra structurii. Aceasta implică faptul că deplasările nodurilor evaluate la rame supuse unor sarcini concentrate sau uniform distribuite vor fi exacte, adică practic identice cu soluțiile rezistenței materialelor, în condițiile în care nodurile sunt introduse la punctele de aplicare a forțelor concentrate și la capetele sarcinilor uniforme, vezi figura 1.65 pentru sarcini neuniforme. O soluție apropiată de cea exactă poate fi obținută dacă se introduc noduri adiționale între capetele sarcinilor neuniforme, vezi figura 1.66. Pentru analiza dinamică, este nevoie de noduri intermediare pentru orice sarcină care acționează asupra unei grinzi, bare sau rame, vezi figura 1.67. Trebuie menționat că pentru orice alt tip de element e nevoie de noduri intermediare pentru analiza statică și dinamică.

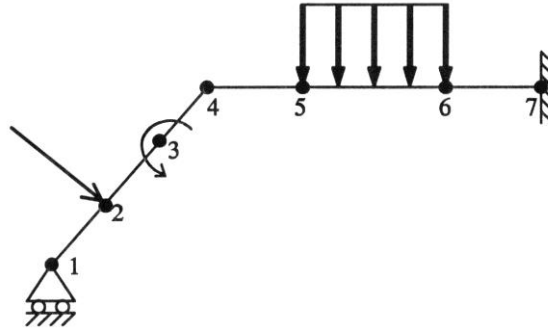


Figura 1.65. Modelul pentru sarcina uniformă statică

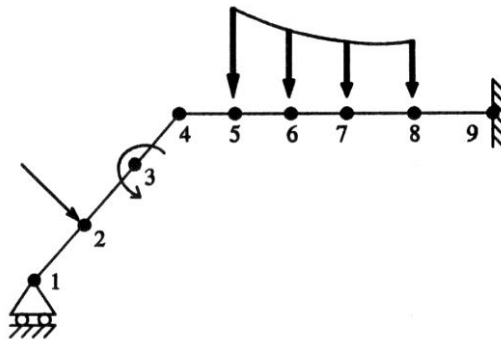


Figura 1.66. Modelul pentru sarcina neuniformă statică

Pentru elemente de arie sau volum, e nevoie de atenție la definirea direcției sarcinilor distribuite, vezi figura 1.68. Momentele nu pot fi definite la nodurile elementelor ce au doar grade de libertate de translație, cum ar fi elementele bidimensionale și tridimensionale solide, tetraedrale și hexaedrale. În aceste cazuri, dacă e nevoie să se definească momentul într-un punct,  $M$ , acesta poate fi simulat cu două forțe opuse  $F$  acționând la o distanță  $d$  astfel încât  $M = F \cdot d$ .

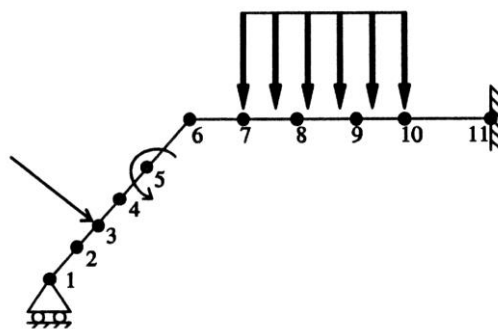


Figura 1.67. Modelul pentru analiza dinamică a ramei

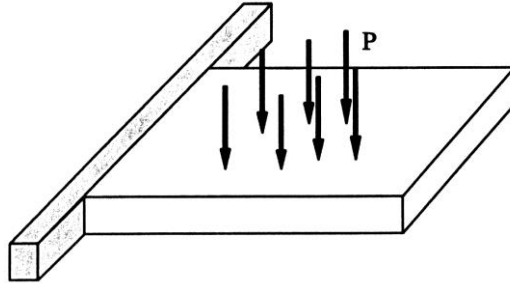


Figura 1.68. Placă solicitată de o sarcină uniformă

### 1.5.7. Componente structurale rigide

Componente structurale cu rigiditate mare sunt întâlnite adesea în practică. De exemplu, există situații unde o porțiune a unei structuri sau o legătură a ei este mult mai rigidă decât restul structurii, vezi figura 1.69.(a) și (b), sau când un obiect relativ mare și cu rigiditate ridicată este susținut de o structură flexibilă, figura 1.69.(c). Modelarea detaliată a articulațiilor grindă-coloană pot să necesite simularea articulațiilor ca rigide, adică alocarea unui IR care e mult mai mare decât  $I_1$  și  $I_2$ , vezi figura 1.69.(d).

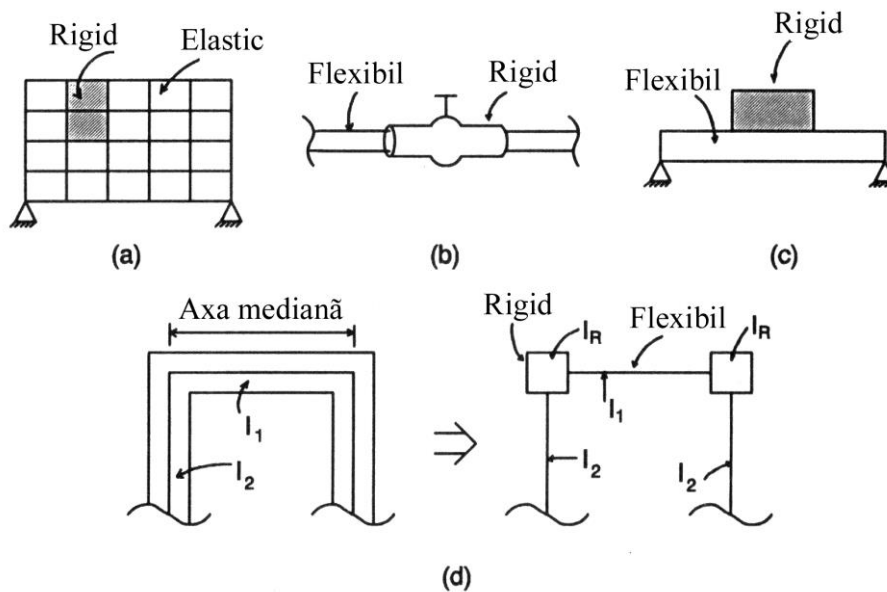


Figura 1.69. Modelarea componentelor structurale rigide

Modelarea componentelor foarte rigide prin alocarea unor valori arbitrare mari pentru proprietățile materialelor sau a secțiunilor poate duce la rezultate eronate. O procedură cu doi pași, prezentată în figura 1.70, este recomandată

pentru evitarea acestui tip de erori. Procedura se referă la o structură cu proprietăți elastice  $E_1$  care include componente rigide cu proprietăți elastice  $E_2$ . Trebuie notat că procedura necesită ca structura să fie analizată de două ori.

a. Se modelează toată structura folosindu-se o discretizare destul de inexactă. Întregii structuri, incluzând părțile rigide, I se atribuie proprietățile elastice  $E_1$ . Apoi, se efectuează analiza statică a structurii pentru a se obține valoarea maximă a matricii de rigiditate,  $k_{max}$ .

b. se analizează structura în starea dată dar cu o discretizare mai rafinată și se atribuie părților flexibile modulul  $E_1$  și părții rigide un modul  $E_2$  astfel încât coeficientul maxim de rigiditate corespunzător unui element al părții rigide să fie în gama  $4k_{max}$  până la  $5k_{max}$ .

Metodologia se poate extinde cu ușurință pentru a analiza structuri cu părți moi.

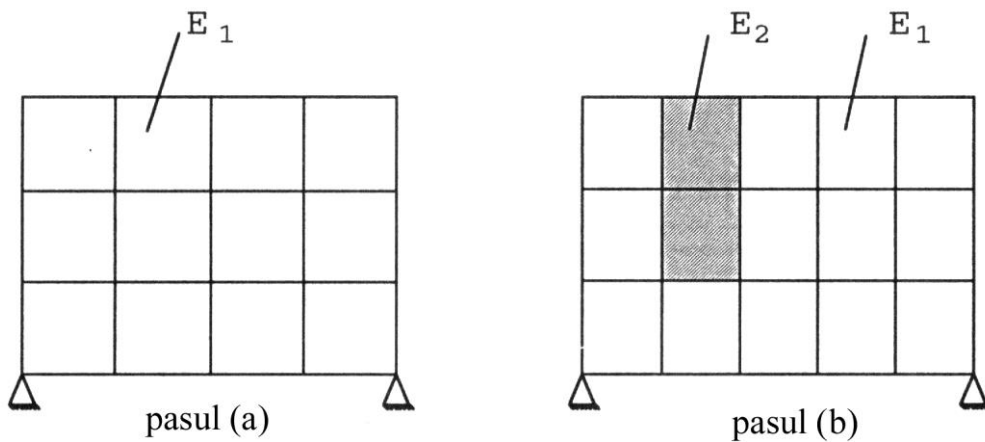


Figura 1.70. Abordarea în doi pași pentru modelarea părților rigide

### 1.5.8. Limite înclinate

Modelarea și calcularea reacțiilor la reazeme înclinate se poate face cu arcuri elastice. Dacă suportii sunt rigizi, se poate folosi o abordare în doi pași:

a. Se modelează structura folosindu-se condiții limită fixe la suporturile înclinate. Se face o analiză statică pentru a se obține valoarea maximă a matricii de rigiditate a structurii, ( $k_{max}$ ).

b. Se analizează structura folosindu-se arcuri elastice de translație pentru modelarea suporturilor înclinate. Fiecare arc trebuie să fie orientat în direcția deformației reținute. În plus, rigiditatea asociată fiecărui arc trebuie să se încadreze în gama  $4k_{max}$  –  $5k_{max}$  pentru a se păstra rigiditatea necesară pentru ca arcurile să oprească deformația.

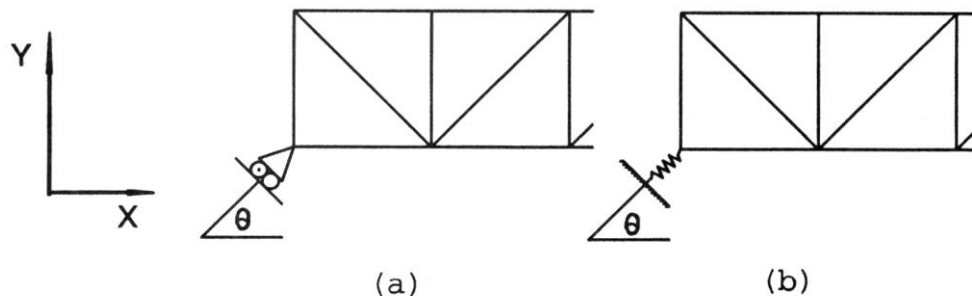


Figura 1.71. (a) condiții limită înclinate; (b) model cu element limită elastic

### 1.5.9. Recomandări pentru evaluarea tensiunilor

Evaluarea tensiunilor folosind elemente finite necesită un model mai exact decât cel necesar pentru calcularea deformațiilor. Aceasta se atribuie faptului că tensiunile se calculează folosind derivatele deformațiilor. Dacă discretizarea elementului finit nu este suficient de exactă, tensiunile calculate la elemente adiacente pot diferi substanțial. Multe programe elimină asemenea discrepanțe făcând media tensiunilor din toate elementele incidente în același nod. Acestea includ și opțiuni pentru aprecierea adecvării discretizării în evaluarea tensiunilor, și identifică părți ale structurii care necesită o modelare mai rafinată pentru îmbunătățirea rezultatelor.

În evaluarea rezultatelor tensiunilor, analistul trebuie să se concentreze pe examinarea componentelor tensiunilor în regiunile critice. Asemenea regiuni critice include marginile, punctele de aplicare a sarcinilor concentrate și regiunile în care:

- a. tensiunile von Mises, Tresca, sau tensiunile principale sunt mari;
- b. geometria structurii se schimbă considerabil;
- c. rigiditatea sau masa sistemului prezintă schimbări drastice.

Nodurile din colțuri prezintă dificultăți în calcularea tensiunilor. Din păcate, în multe cazuri tensiunile maxime au loc la colțuri iar mărimile lor pot influența drastic proiectul.

Ca regulă generală, cu cât un nod are mai multe grade de libertate, cu atât mai exactă trebuie să fie discretizarea pentru a calcula tensiunea cât mai exact.

## 1.6. Calculul cu ajutorul metodei elementelor finite (MEF) utilizând programul ALGOR

### 1.6.1. Prezentarea programului ALGOR

Mai multe tehnici analitice sunt disponibile pentru a determina compatibilitatea modelului analizat. Mediul Superview IV Results oferă acces la aceste tehnici oferind atât tensiunile brute în coordonate locale și multe valori derivate din acestea. Valorile derivate includ criteriile von Mises și Tresca, tensiunile principale minime și maxime și rezultate specifice elementelor. Dat fiind că acuratețea rezultatelor analitice depinde de modul de alegere al discretizării și aplicarea parametrilor MEF, mediul Superview IV Results oferă o estimare a preciziei la nodurile comune. Această valoare a preciziei ajută la determinarea compatibilității modelului.



ALGOR folosește metoda tensiune la noduri pentru estimarea tensiunilor. Folosind o schemă de extrapolare, calculele folosind tensiunile nodale oferă o acuratețe mai mare decât calculele derivate din tensiunile interioare elementelor. Afișarea tensiunilor la noduri produce o reprezentare mai reală și mai practică a unui model supus unor sarcini, deoarece valorile tensiunilor în noduri sunt mai folositoare decât valorile tensiunilor pe un element întreg.

Tensiunile calculate pe elemente întregi oferă informații la punctele Gauss. Punctele Gauss sunt punctele de integrare numerică la care soluția cu element finit și cea teoretică sunt cele mai asemănătoare. Tehnica mai veche făcea media acestor tensiuni și o plasa central sau pe fețele elementelor 2D sau în centrul elementelor 3D, și poate oferi diferențe semnificative între elemente alăturate. Dat fiind că soluțiile analizei cu elemente finite sunt aproximări ale unei funcții continue, rezultatele din aceste regiuni pot fi grosiere așa încât să ofere imaginea concretă a comportării unui element la tensiune.

Calcularea tensiunilor la noduri individuale corectează această problemă. Folosind metoda celor mai mici pătrate locale, tensiunile sunt extrapolate din puncte Gauss la nodurile asociate. Aprecierea exactă a tensiunilor la noduri e foarte importantă mai ales când nodurile sunt pe suprafața sau marginea ansamblului analizat, deoarece aceste noduri coincid de obicei cu zonele critice ale modelului. Informații legate de acuratețe sunt disponibile și pentru nodurile comune mai multor elemente.

Când se afișează suprafața unui model, intensitatea sau tensiunea în fiecare punct al fiecărui element al discretizării ce definește suprafața e calculată și o valoare potrivită pentru afișare fiind asociată aceluși punct. Scara folosită pentru afișarea modelului e analizată, având culoarea și nuanța potrivită fiecărui punct determinat, în funcție de valoarea calculată pentru acel punct. Modelul este apoi redesenat cu suprafața colorată conform tehnicii mai sus menționate. Mediul Superview IV Results oferă opțiuni de vizualizare, pentru a permite controlul asupra felului în care modelul e afișat. Aceasta permite vizualizarea modelului în modul cel mai convenabil scopului urmărit.

În continuare se definesc următoarele tensiuni oferite de program.

### Tensiune Von Mises

Afișarea rezultatelor este sub forma tensiunii echivalente Von Mises. Aceasta poate fi afișată pentru elemente de suprafață (2-D, plăci, etc.) și elemente de volum.

Ecuția folosită este:

$$\sigma_e = \sqrt{0,5 \cdot [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2] + 3 \cdot (\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)} \quad (1.103)$$

Unde  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  și  $\sigma_z$  sunt tensiunile axiale în direcțiile globale, iar  $\tau_{xy}$ ,  $\tau_{yz}$ ,  $\tau_{zx}$  (figura 1.72) sunt forțele tăietoare. Tensiunea von Mises este întotdeauna pozitivă.

În funcție de tensiunile principale  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  și  $\sigma_3$  tensiunea echivalentă von Mises este dată de relația:

$$\sigma_e = \sqrt{0,5 \cdot [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (1.104)$$

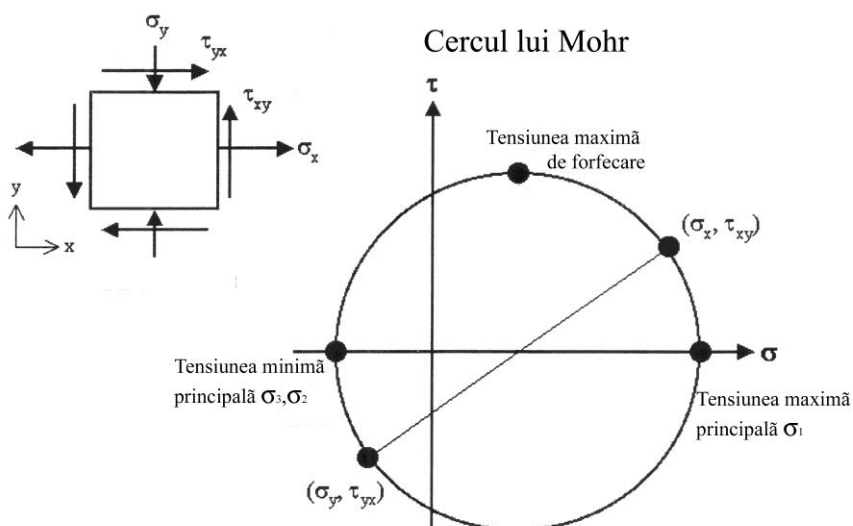


Figura 1.72 Starea de tensiune dintr-un element și cercul lui Mohr

#### Tensiunea principală minimă ( $\sigma_3$ )

Afișează tensiunea principală minimă ( $\sigma_3$ ). Aceasta poate fi afișată pentru elemente de suprafață (2-D, plăci etc.) și volum. Semnul (+) indică întindere și (-) compresiune (figura 1.72)

#### Tensiunea principală intermediară ( $\sigma_2$ )

Afișează tensiunea principală intermediară ( $\sigma_2$ ). Aceasta este tensiunea în direcție normală la tensiunile principale minimă și maximă. Aceasta poate fi afișată pentru elemente de suprafață (2-D, plăci etc.) și volum. Semnul (+) indică întindere și (-) compresiune (figura 1.72).

#### Tensiunea Principală maximă ( $\sigma_1$ )

Afișează rezultatele pentru tensiunea principală maximă ( $\sigma_1$ ). Aceasta poate fi afișată pentru elemente de suprafață (2-D, plăci etc.) și volum. Semnul (+) indică întindere și (-) compresiune (figura 1.72).

#### Tensorul tensiunilor

Afișează componentele tensiunii în direcția aleasă. Practic, folosește atât tensorul tensiune cât și componentele locale ale tensiunii. Tensorul tensiunii poate fi afișat pentru elemente suprafață (2-D, plăci etc.) și volum.

- direcția  $xx$  – componentele tensorului tensiunii ce reprezintă tensiunea normală pe direcția  $x$ . Semnul (+) indică întindere și (-) compresiune.
- direcția  $yy$  – componentele tensorului tensiunii ce reprezintă tensiunea normală pe direcția  $y$ . Semnul (+) indică întindere și (-) compresiune.
- direcția  $zz$  – componentele tensorului tensiunii ce reprezintă tensiunea normală pe direcția  $z$ . Semnul (+) indică întindere și (-) compresiune.
- direcția  $xy$  – componentele tensorului tensiunii ce reprezintă tensiunea de forfecare în planul  $xy$  ( $x$  indică direcția normală,  $y$  indică direcția tensiunii de forfecare). Semnul (+) indică întindere și (-) compresiune.

- direcția yz – componentele tensorului tensiunii ce reprezintă tensiunea de forfecare în planul yz (y indică direcția normală, z indică direcția tensiunii de forfecare). Semnul (+) indică întindere și (-) compresiune.

- direcția zx – componentele tensorului tensiunii ce reprezintă tensiunea de forfecare în planul zx (z indică direcția normală, x indică direcția tensiunii de forfecare). Semnul (+) indică întindere și (-) compresiune.

### 1.6.2. Calculul pentru arcurile elicoidale ale suspensiei boghiurilor Y25Lsdi

Calculul s-a efectuat pentru arcurile elicoidale ale suspensiei boghiului Y25Lsdi destinate echipării vagoanelor de marfă. A fost ales tipul de solicitare axială de compresiune întrucât arcurile elicoidale având diametrul spirei de Ø31mm respectiv Ø24,4mm sunt legate în paralel în cadrul suspensiei boghiului. Subansamblul studiat a fost sprijinit pe secțiunea transversală, pe capătul leagănelui boghiului, iar forțele de compresiune au fost aplicate în capătul opus în acord cu situația din exploatare.

Arcurile au fost discretizate în elemente de volum (cărămidă și tetraedale) astfel:

- arcul exterior Ø31mm cu număr de noduri 3484 având 7485 elemente de discretizare;
- arcul interior Ø24,4mm cu număr de noduri 2269 având 5692 elemente de discretizare.

Forțele aplicate au fost următoarele:

- pentru arcul exterior Ø31mm 49000N;
- pentru arcul interior Ø24,4mm 43000N.

Caracteristicile mecanice ale oțelului 50CrV4 utilizat sunt:

- limita de elasticitate  $R_{p0.2} = 1511 \text{ N/mm}^2$ ;
- rezistența la rupere  $R_m = 1636 \text{ N/mm}^2$ .

Tensiunea conform ipotezei von Mises este de aproximativ  $1700 \text{ N/mm}^2$ , mai mică decât tensiunea de rupere pentru forța maximă aplicată.

Tensiunile maxime pentru solicitarea de întindere în toate situațiile tratate sunt sub valoarea limitei de elasticitate de  $1511 \text{ N/mm}^2$ .

Rezultatele calculului sunt prezentate în tabelul 1.5 și în figurile 1.73 – 1.94.

Tabel 1.5

Tensiuni calculate	Arc Ø31mm		Arc Ø24,4mm	
	$\sigma_{\max}[\text{N/mm}^2]$	$\sigma_{\min}[\text{N/mm}^2]$	$\sigma_{\max}[\text{N/mm}^2]$	$\sigma_{\min}[\text{N/mm}^2]$
Tens. von Mises	1672	0,27	1576	0,34
Tens. max. princ.	1150	-28,14	862	-41,50
Tens.interm.princ.	408	-37,17	356	-164,46
Tens. min. princ.	156,40	-1128,58	121,79	-1056,51
Tensor z-z	937,51	-186,11	499,14	-755,64
Tensor y-y	599,35	9,22	258,14	-400,56
Tensor x-x	563,47	-842,01	386,04	-644,13
Tensor z-x	658,88	-487,91	215,91	-369,35
Tensor y-z	327,20	-740,45	316,62	-604,97
Tensor x-y	638,18	-797,52	575,34	-272,49

Săgeata arcului exterior rezultă a fi de 100mm, iar a arcului interior de 60mm.

Din calculul teoretic rezultă în mod evident că arcul va rezista în exploatare întrucât nu sunt depășite valorile admisibile impuse de materialul utilizat.

### 1.7 Concluzii

Arcurile metalice constituie elemente elastice cu o largă folosire atât la suspensia vehiculelor feroviare ca și izolatori de vibrații cât și la echiparea tampoanelor cuplelor centrale și sistemelor de legare ca izolatori de șoc. O particularitate a arcurilor metalice este că au în general o variație liniară a forței în funcție de săgeată. Rolul arcurilor metalice ce echipează suspensia sau izolatorii de șoc este de a înmagazina energie potențială de deformare și în consecință de a reduce efectele excitațiilor aplicate sistemului mecanic provocând fie reducerea amplitudinilor vibrațiilor atunci când sunt folosite în cadrul suspensiei, fie reducerea amplitudinii șocului atunci când sunt folosite în echiparea izolatoarelor de șoc. Marele impediment al arcurilor metalice este că la orice ciclu de funcționare energia potențială înmagazinată de deformare este redată complet sistemului mecanic sub formă de energie cinetică dacă nu sunt însoțite de elemente care să asigure amortizarea. De aceea în mod imperios desprindem două tipuri de arcuri metalice:

1. arcuri metalice fără amortizare care de regulă funcționează în paralel cu elemente elastice ce pot asigura o amortizare și în consecință posibilitatea disipării unei părți a energiei potențiale de deformare ce nu mai apare în imediat ciclul următor de oscilație. Aceste arcuri sunt arcurile de tip elicoidal, tip bară de torsiune.

2. arcuri metalice cum sunt arcurile cu foi sau de tip Ringfeder care datorită mișcării relative dintre anumite suprafețe, prin frecare columbiană dobândesc calitatea de amortizare și în consecință la fiecare ciclu de funcționare o parte din energia potențială de deformare este eliminată din sistemul mecanic cu consecințe evidente asupra scăderii nivelului amplitudinii excitației introduse în sistem.

În acest capitol au fost prezentate tipurile de arcuri metalice utilizate la echiparea vehiculelor feroviare.

S-a făcut de asemenea un studiu asupra comportării dinamice atât pe direcție verticală cât și pe direcție transversală a arcurilor elicoidale cel mai des folosite în echiparea suspensiei vehiculelor feroviare. Studiul teoretic subliniază o serie de particularități ce pot fi utilizate în proiectarea acestor arcuri. S-a prezentat metode de calcul atât în regim static cât și în regim dinamic pentru majoritatea tipurilor de arc ce pot fi utilizate de proiectanți atunci când apare problema proiectării unui arc metalic cu anumite caracteristici impuse.

În cadrul acestui capitol s-a recurs la folosirea unor metode moderne de calcul, cum este cea a elementului finit propunând utilizarea unui program pe care l-am agreat datorită conformității cu rezultatele experimentale pe care le-am obținut, programul ALGOR.

Programul ALGOR folosește metoda tensiune la noduri, calculele utilizând tensiunile nodale, oferă o acuratețe mai mare decât calculele derivate din tensiunile interioare elementelor. Afișarea tensiunilor la noduri produce o reprezentare mai reală și mai practică a unui model supus unor sarcini, deoarece valorile tensiunilor în noduri sunt mai folositoare decât valorile tensiunilor pe un element întreg. Calcularea tensiunilor la noduri individuale corectează inconvenientele tensiunilor calculate pe elemente întregi. Aprecierea exactă a tensiunilor la noduri e foarte importantă mai ales când nodurile sunt pe suprafața sau marginea ansamblului analizat, deoarece aceste noduri coincid de obicei cu zonele critice ale modelului din punct de vedere al rezistenței. În plus, la evaluarea rezultatelor tensiunilor programul oferă depistarea ușoară a zonelor critice în condițiile existenței valorilor

tensiunilor: tensiune echivalentă von Mises, tensiune principală minimă, tensiune principală intermediară, tensiune principală maximă și a tensiunilor ce aparțin tensorului tensiunilor.

În consecință compararea acestor rezultate teoretice cu eventuale rezultate experimentale este extrem de facilă.

Se subliniază faptul că rezultatele asupra tensiunilor determinate cu programul ALGOR s-au dovedit a fi foarte apropiate de rezultatele experimentale. În baza studiilor teoretice prezentate în acest capitol ce au fost confirmate de studiile experimentale consider că modul de abordare în proiectarea arcurilor metalice trebuie să se bazeze pe metoda elementului finit și chiar pe alte programe diferite de programul ALGOR utilizat de mine pentru că poate să constituie primul pas în proiectarea și desfășurarea cercetării propriuzise ce evident are ca scop stabilirea unei soluții finale care să răspundă din punct de vedere al duranței necesare, respectiv al fiabilității.

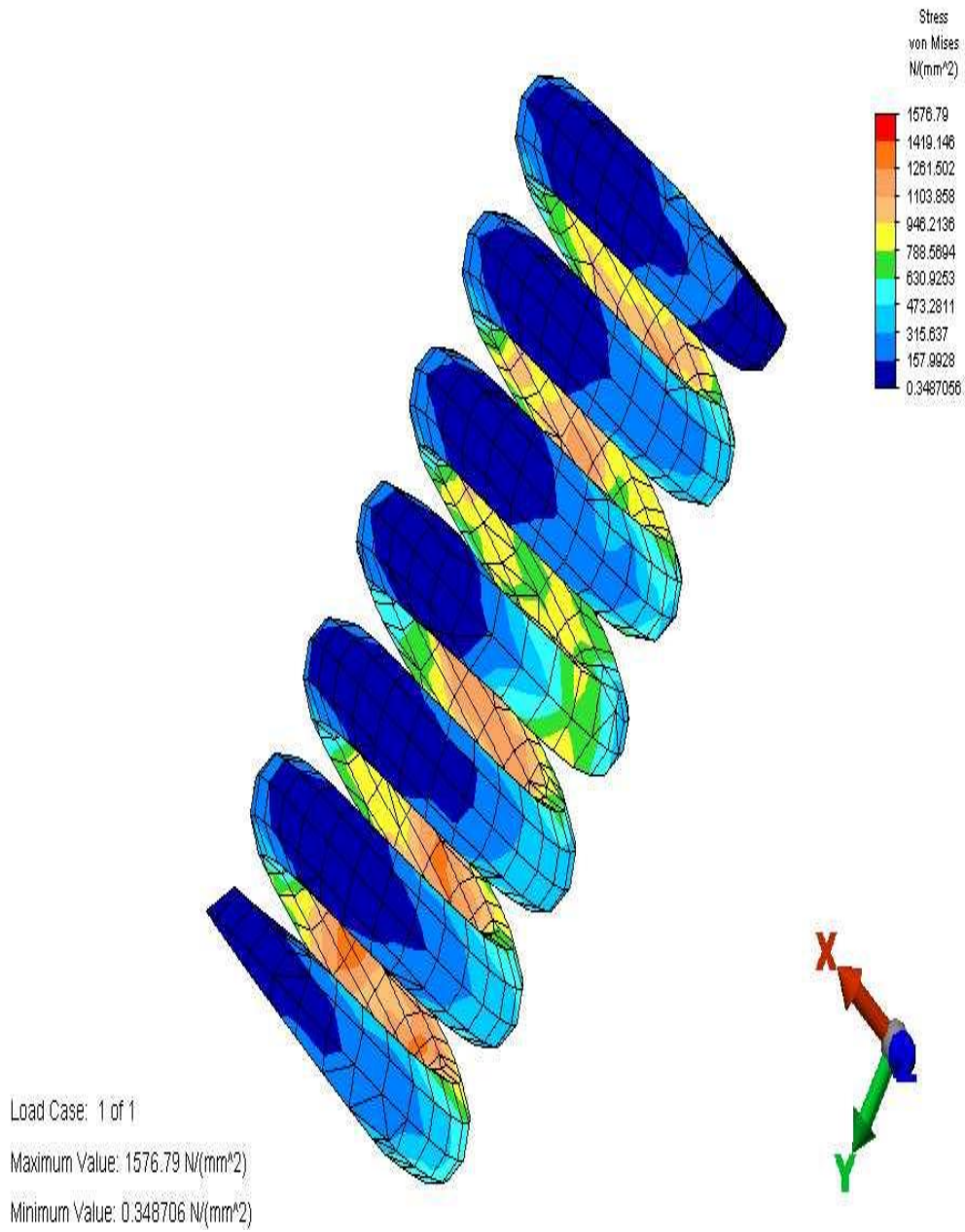


Figura 1.73. Arc  $\Phi 24$

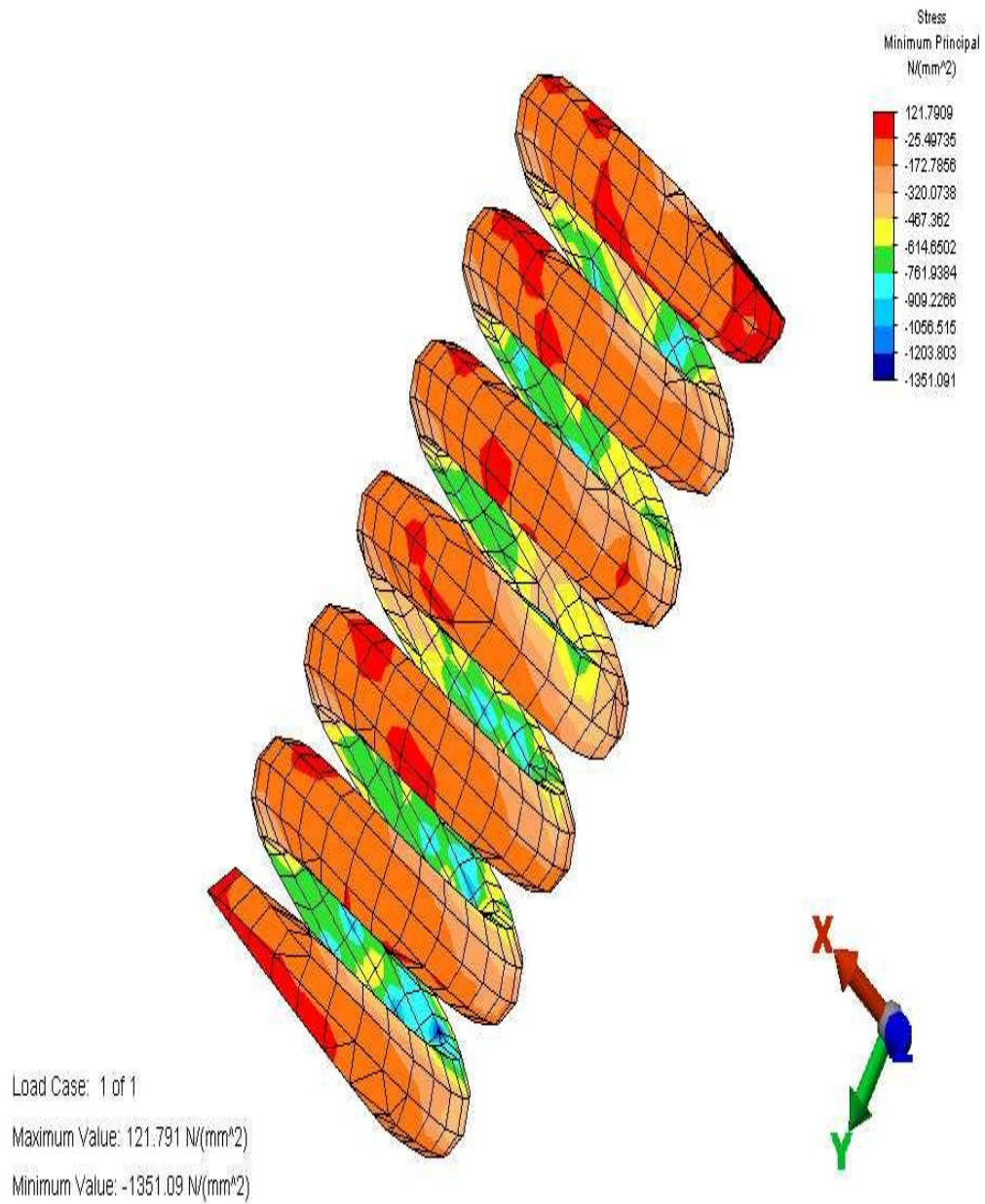


Figura 1.74. Arc  $\Phi 24$



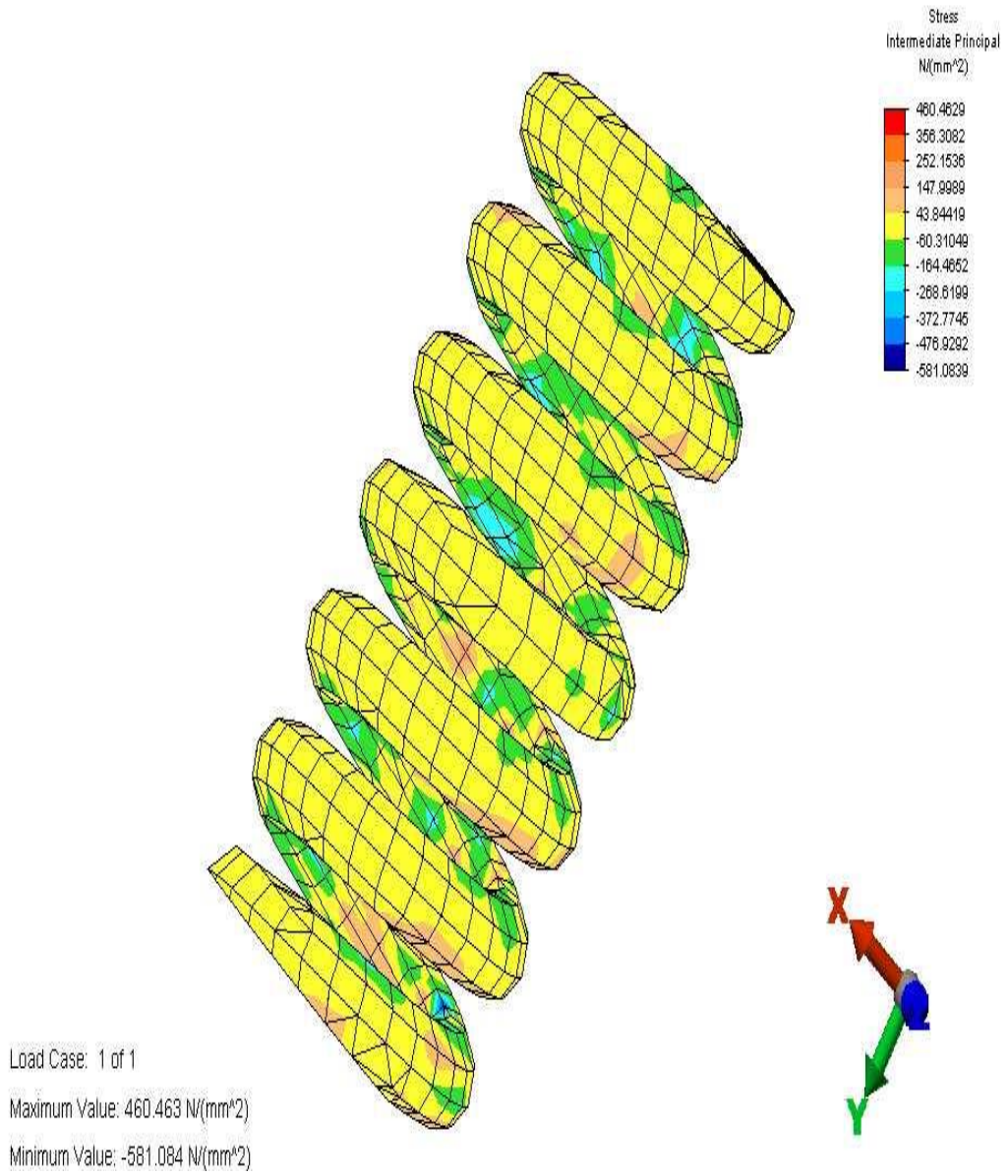


Figura 1.75. Arc  $\Phi 24$



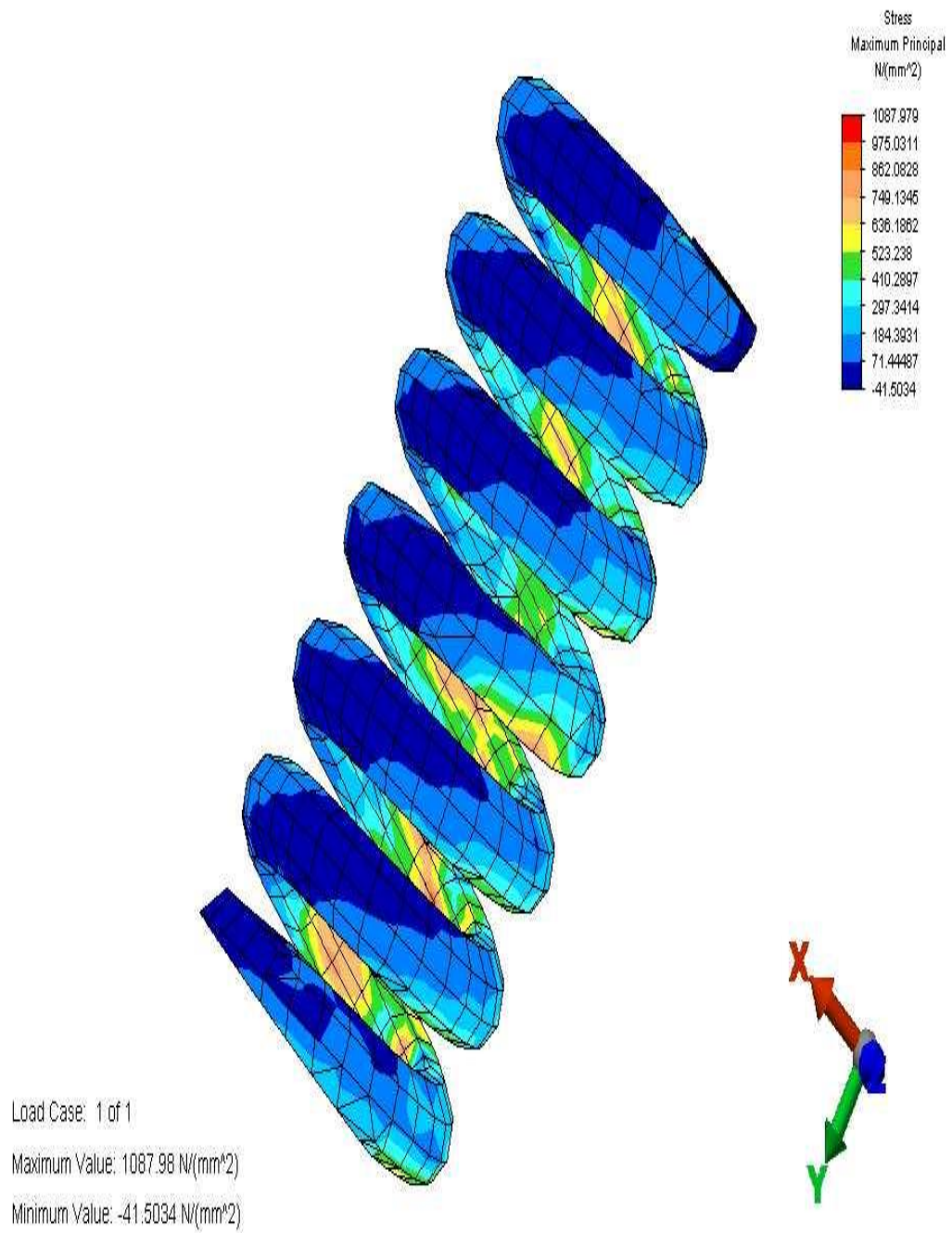


Figura 1.76. Arc  $\Phi 24$

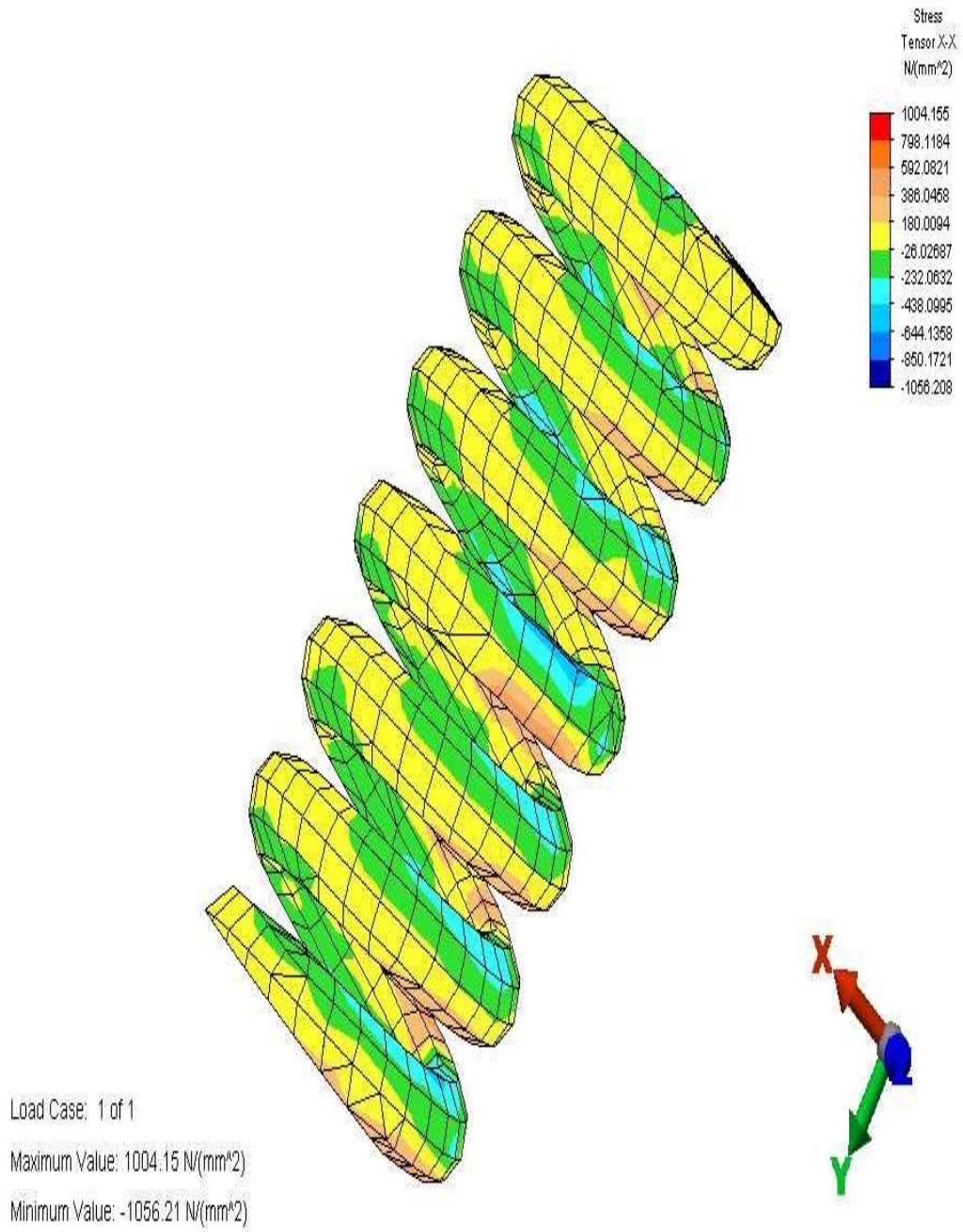


Figura 1.77. Arc  $\Phi 24$

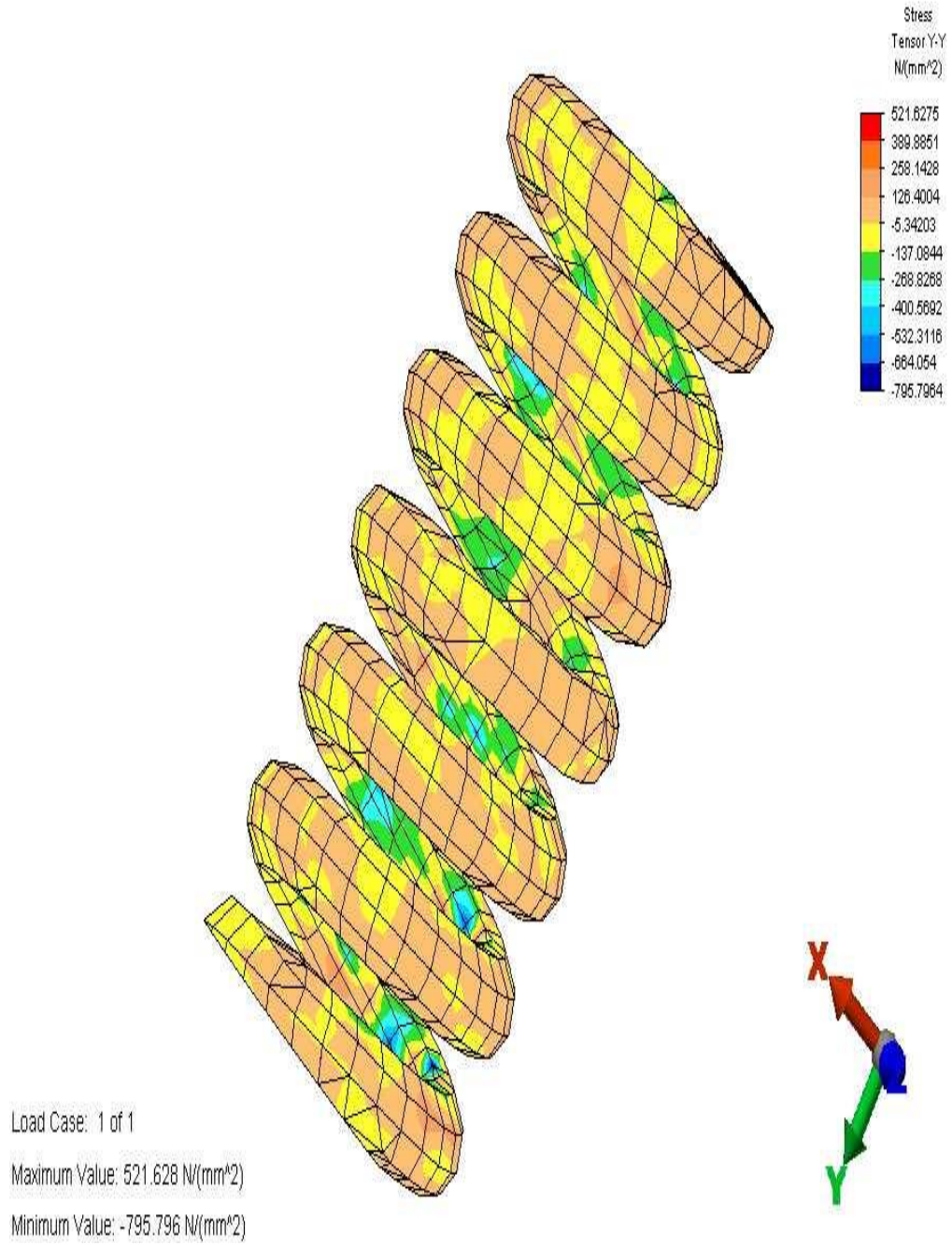


Figura 1.78. Arc  $\Phi 24$

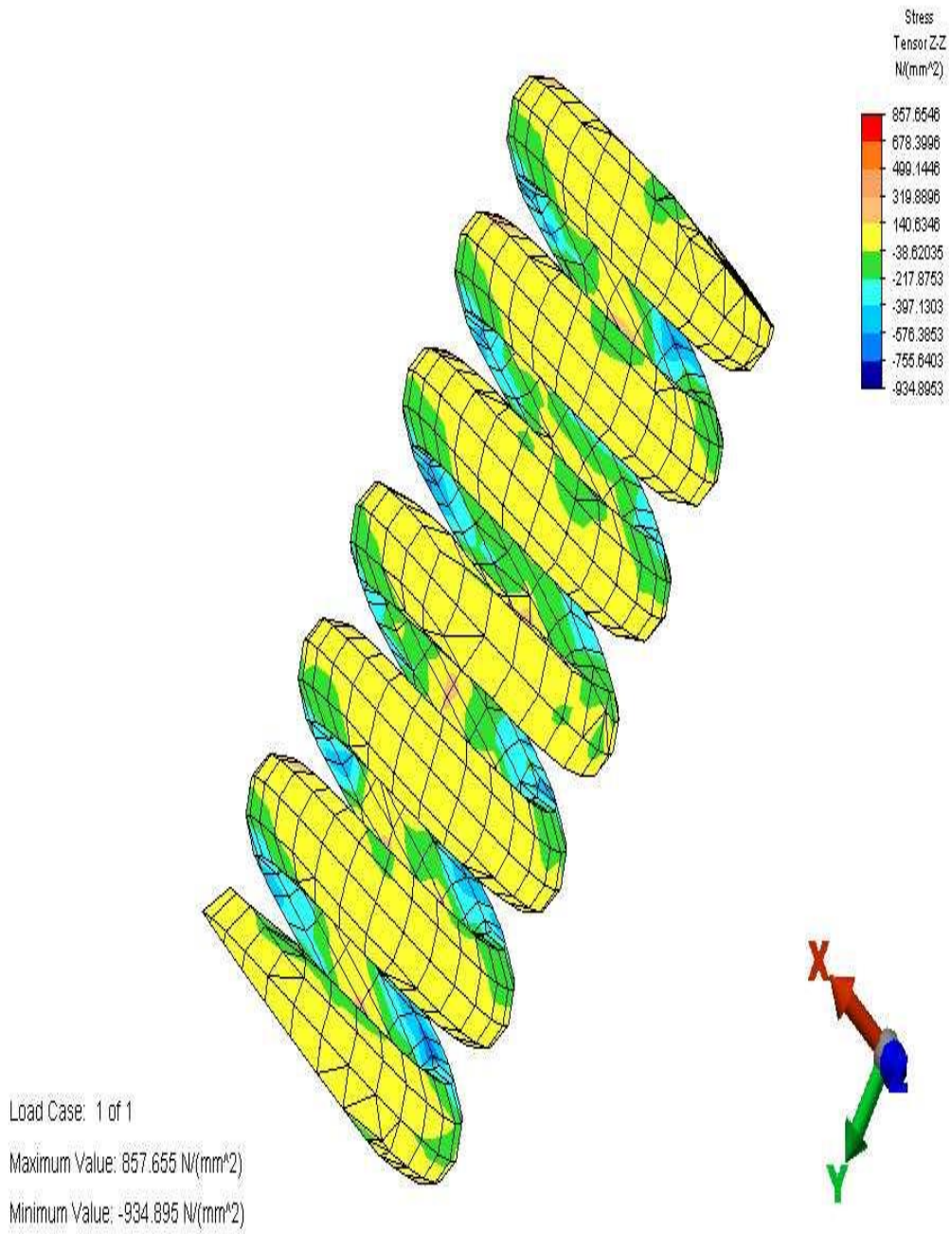


Figura 1.79. Arc  $\Phi 24$ .



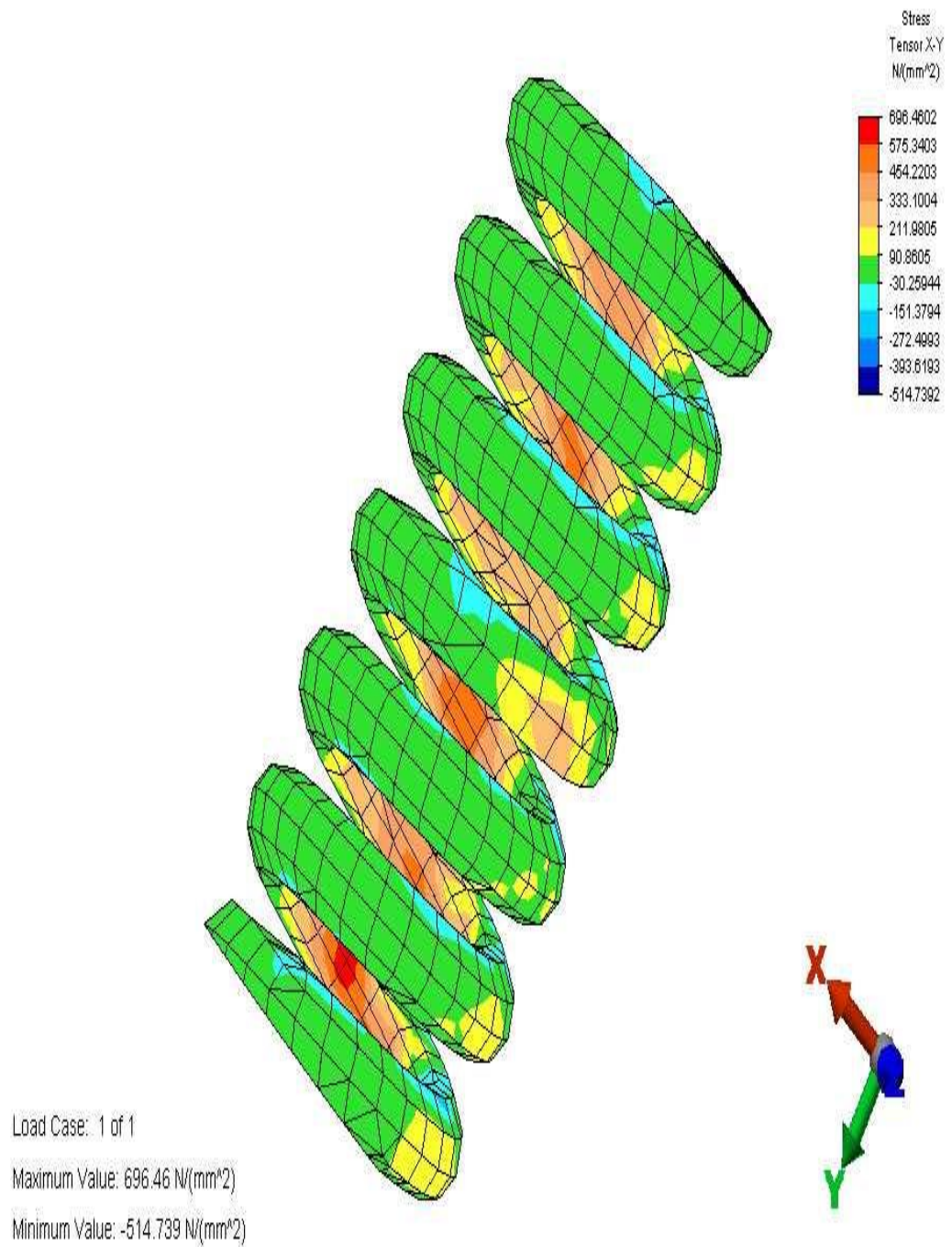


Figura 1.80. Arc  $\Phi 24$

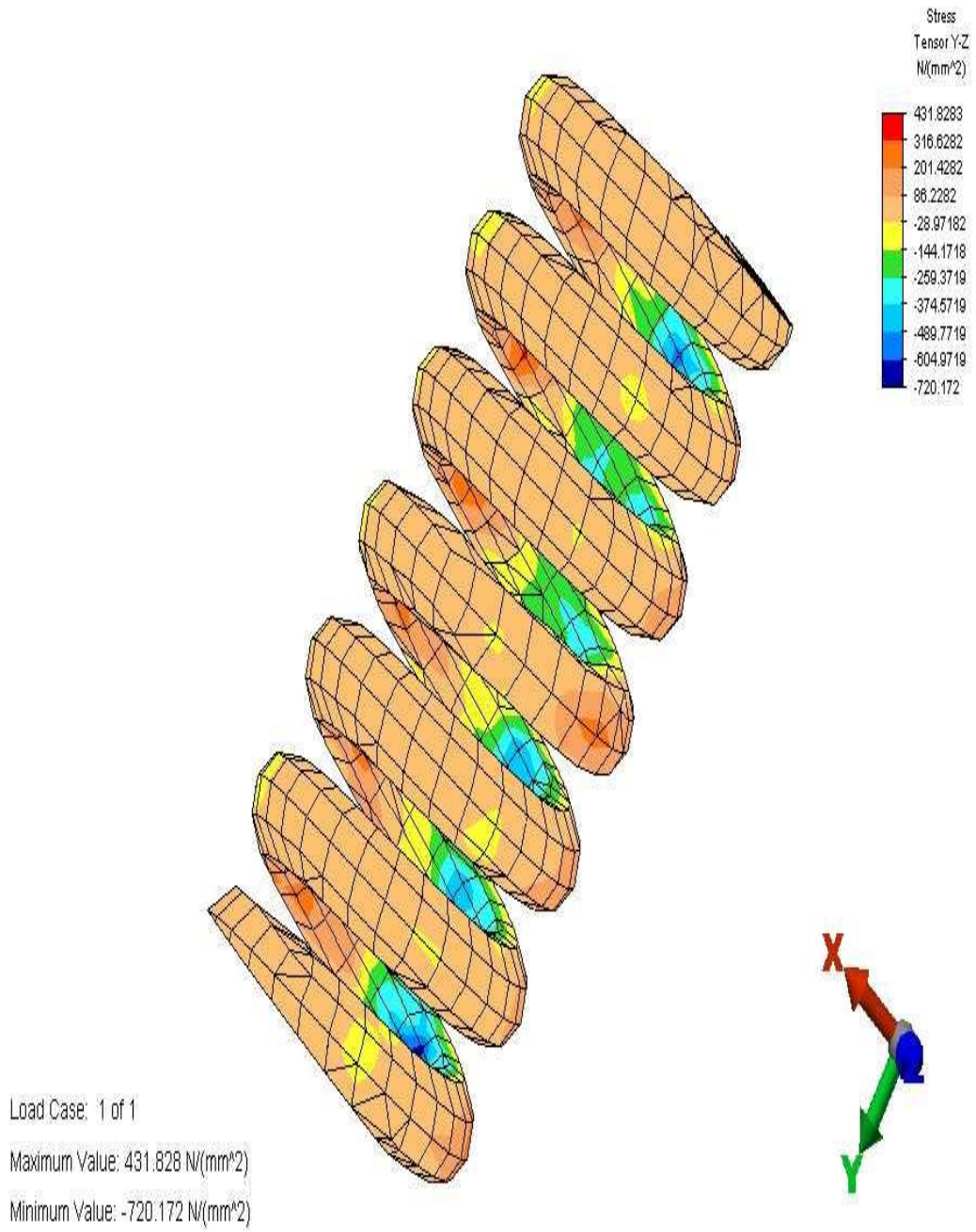


Figura 1.81. Arc  $\Phi 24$ .

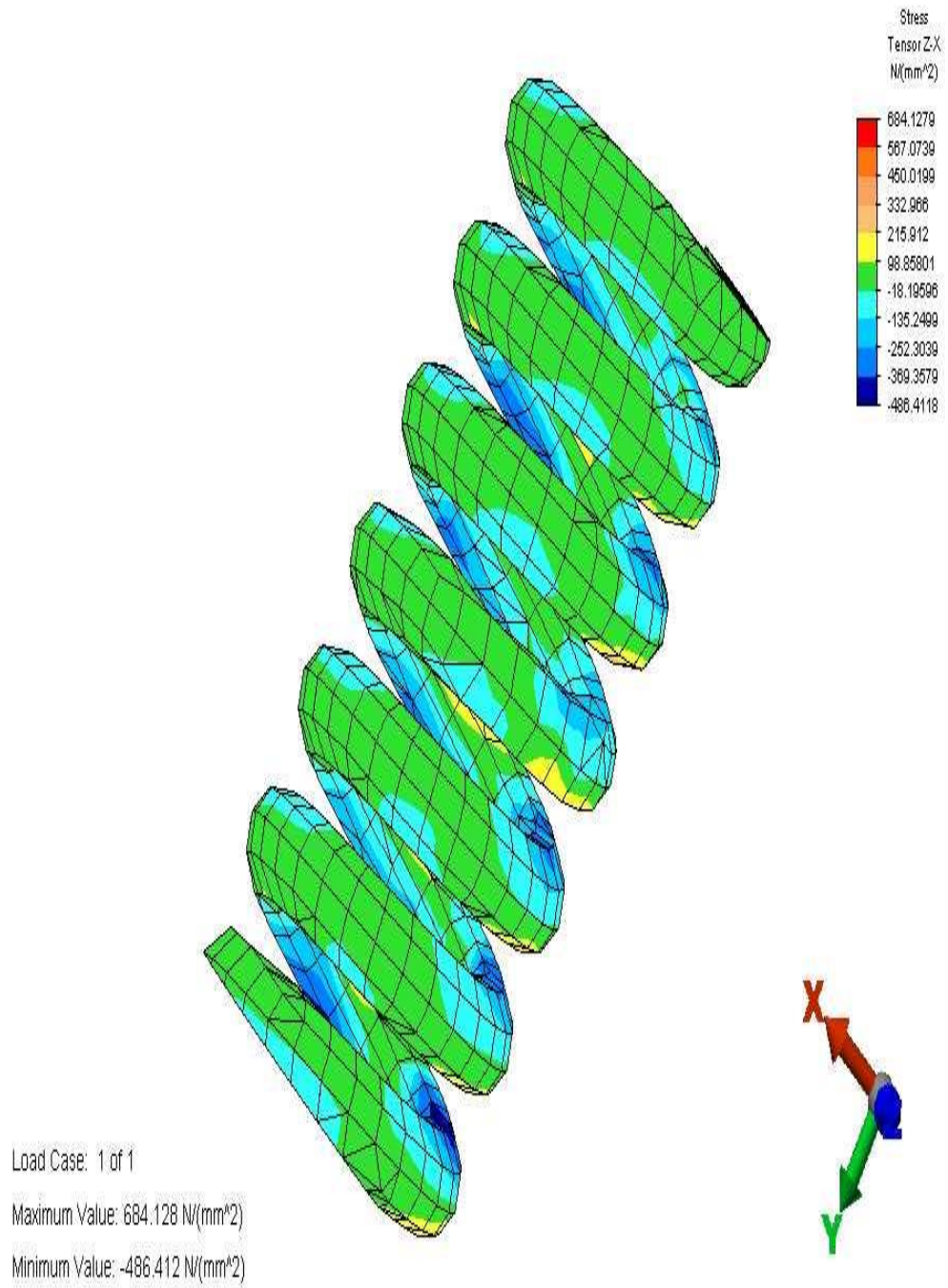


Figura 1.82. Arc Φ24

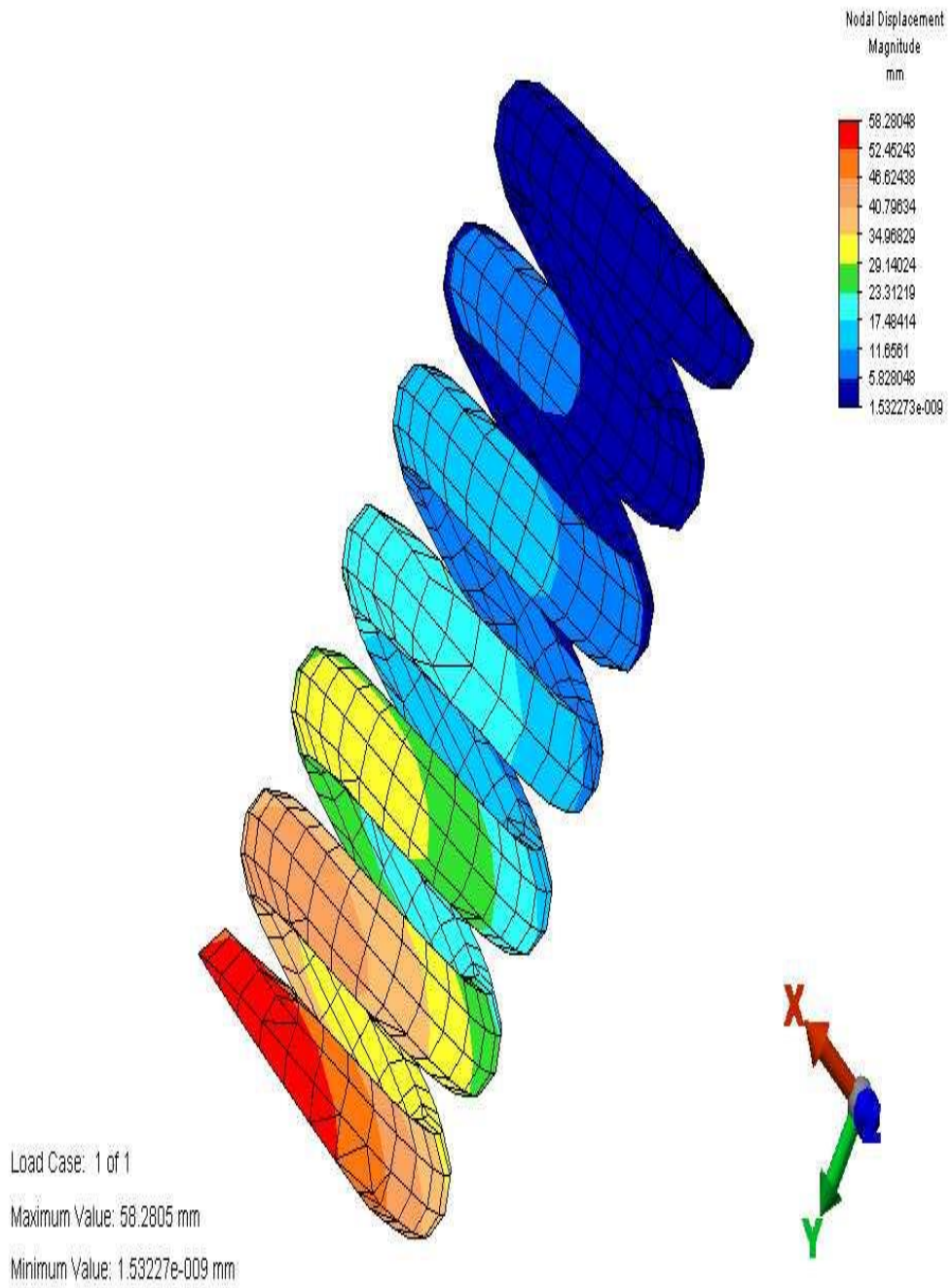


Figura 1.83. Arc  $\Phi 24$ .



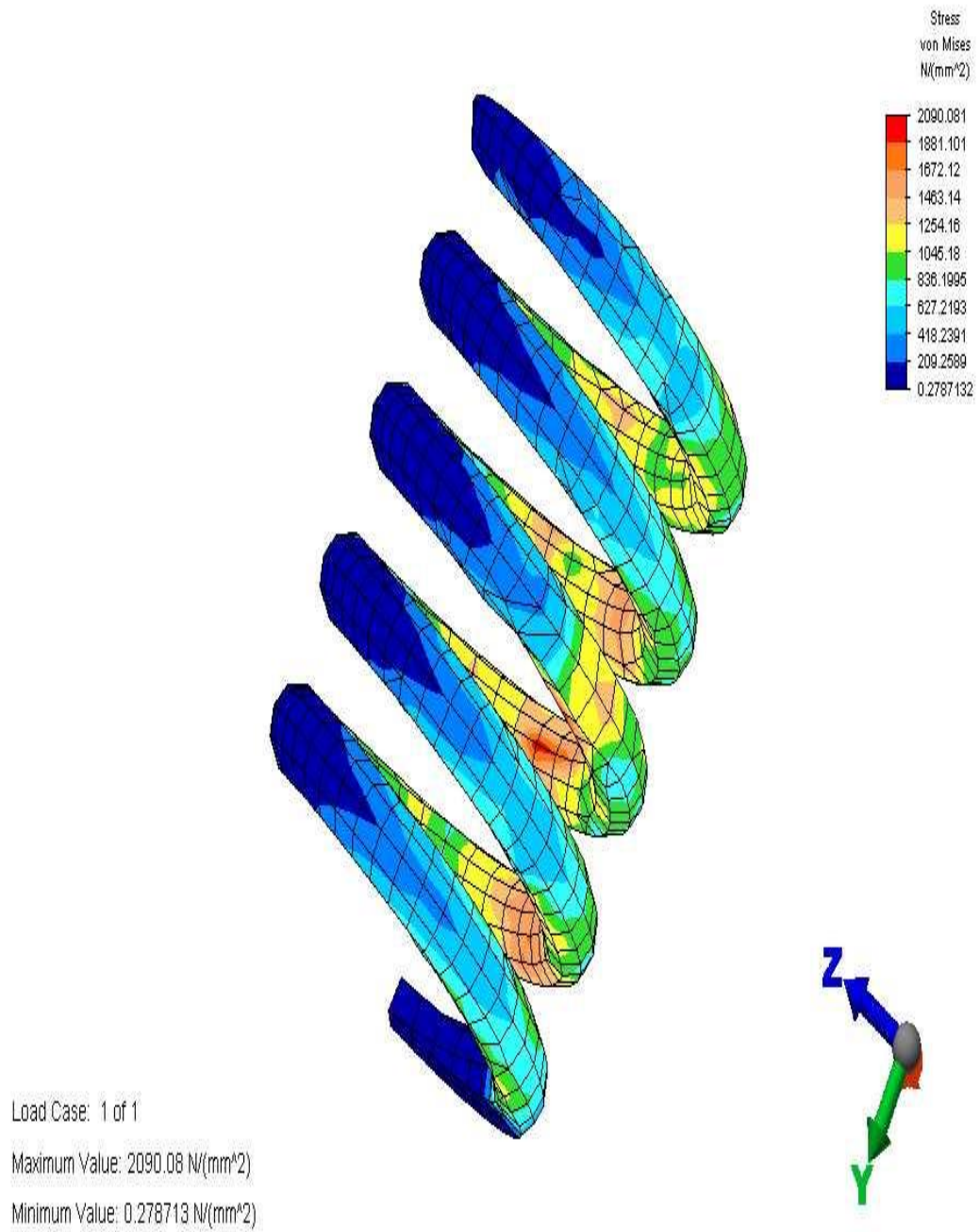


Figura 1.84. Arc  $\Phi 31$ .

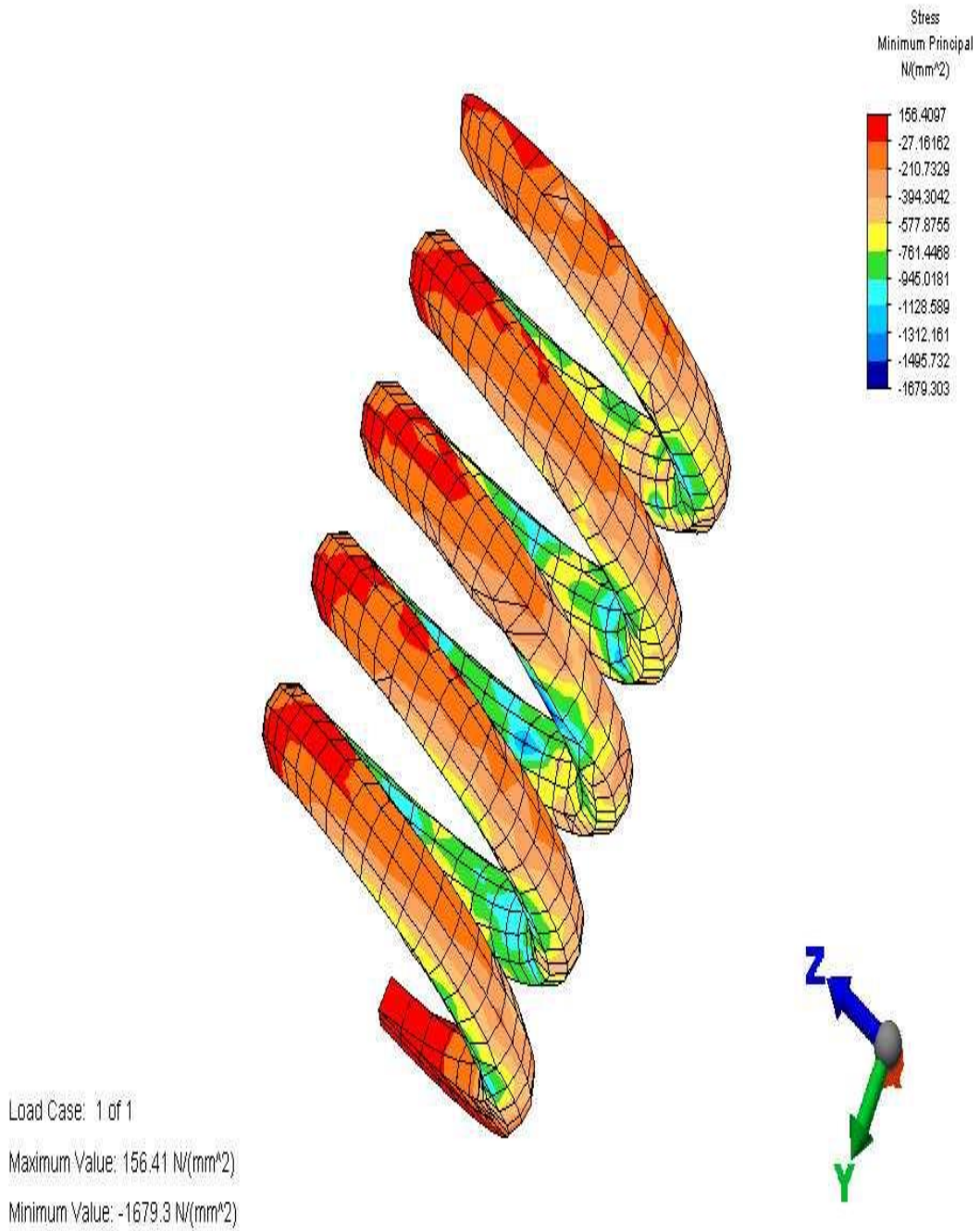


Figura 1.85. Arc  $\Phi 31$ .

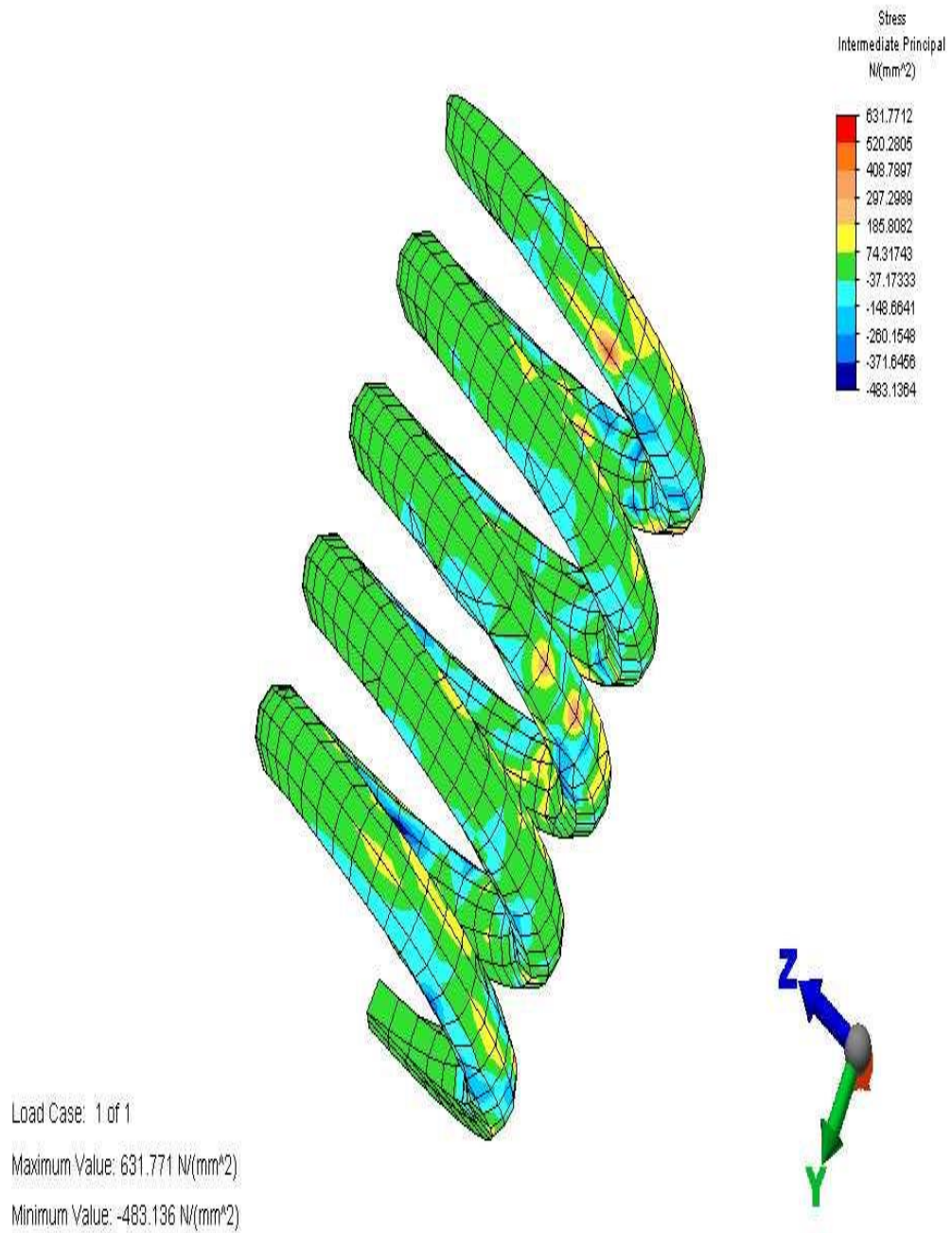


Figura 1.86. Arc  $\Phi 31$ .

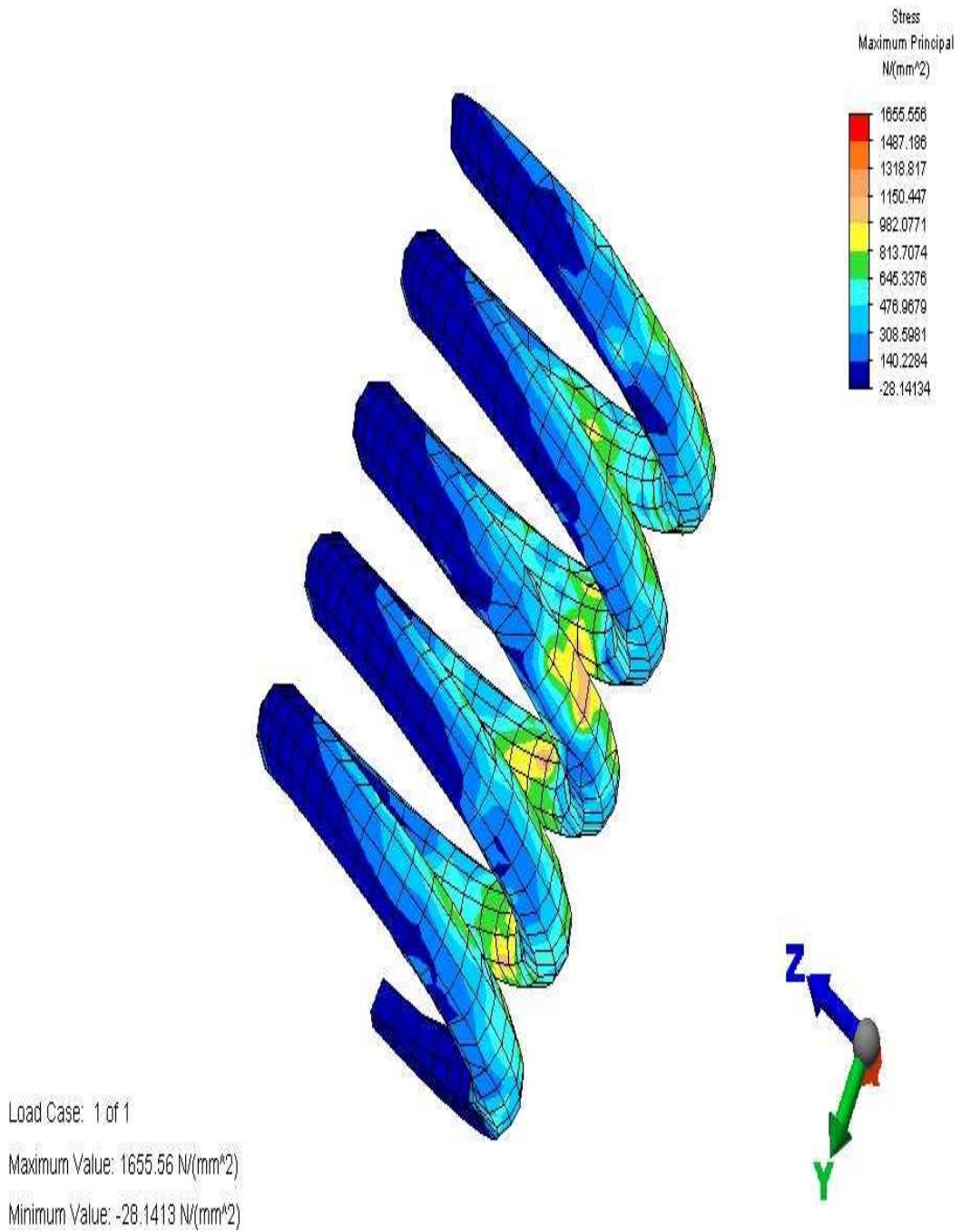


Figura 1.87. Arc  $\Phi 31$ .



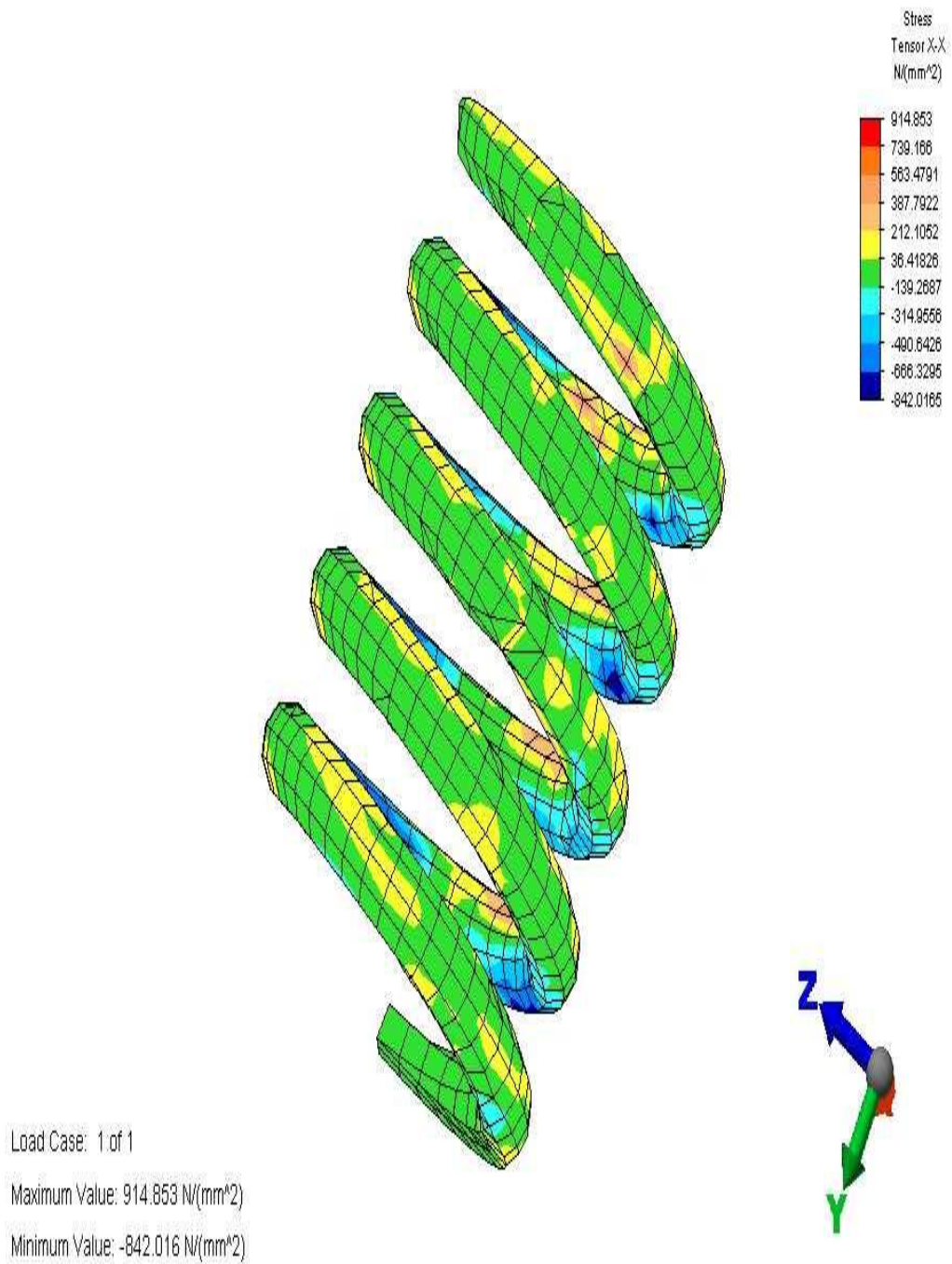


Figura 1.88. Arc Φ31.

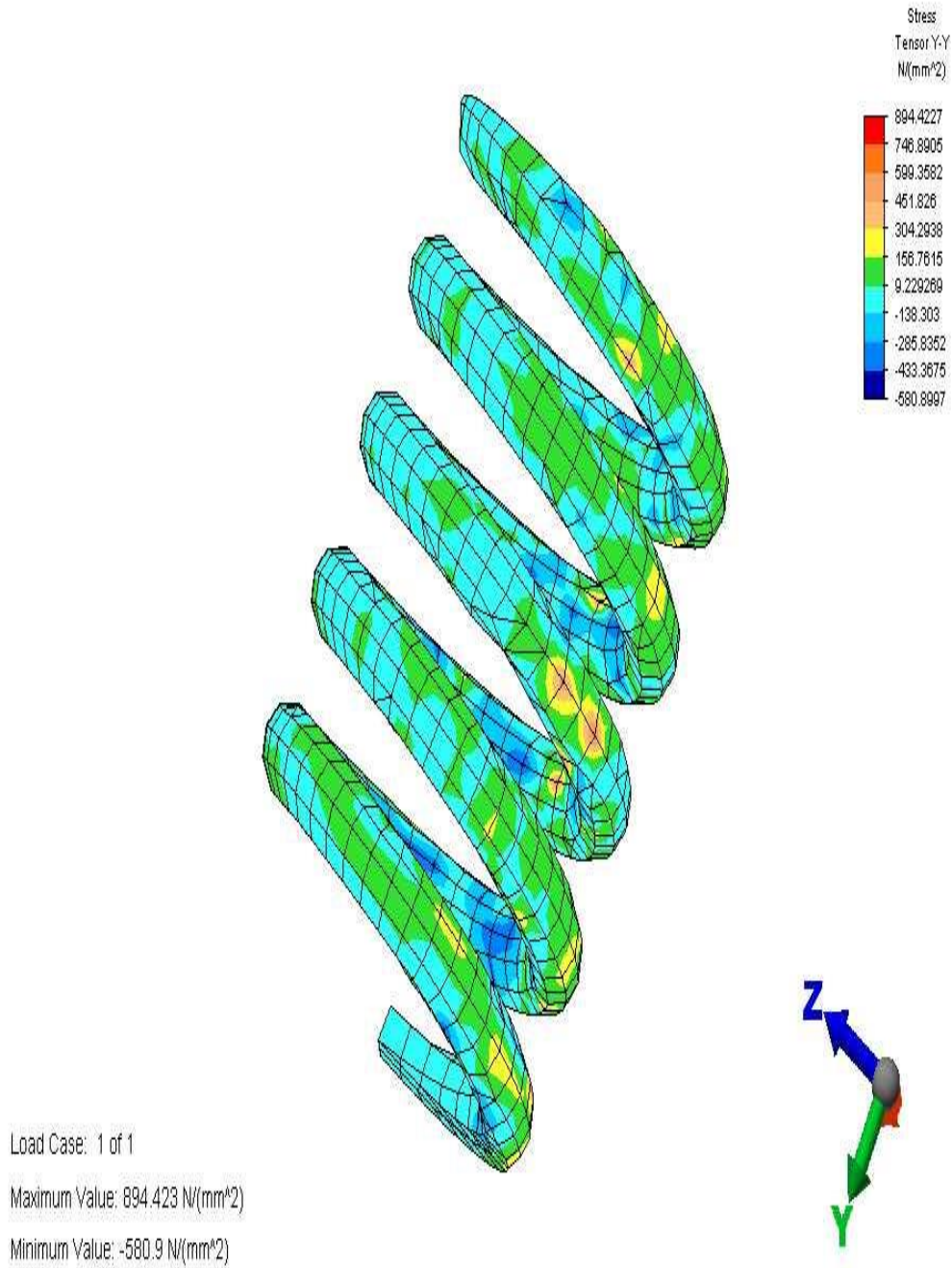


Figura 1.89. Arc  $\Phi 31$ .

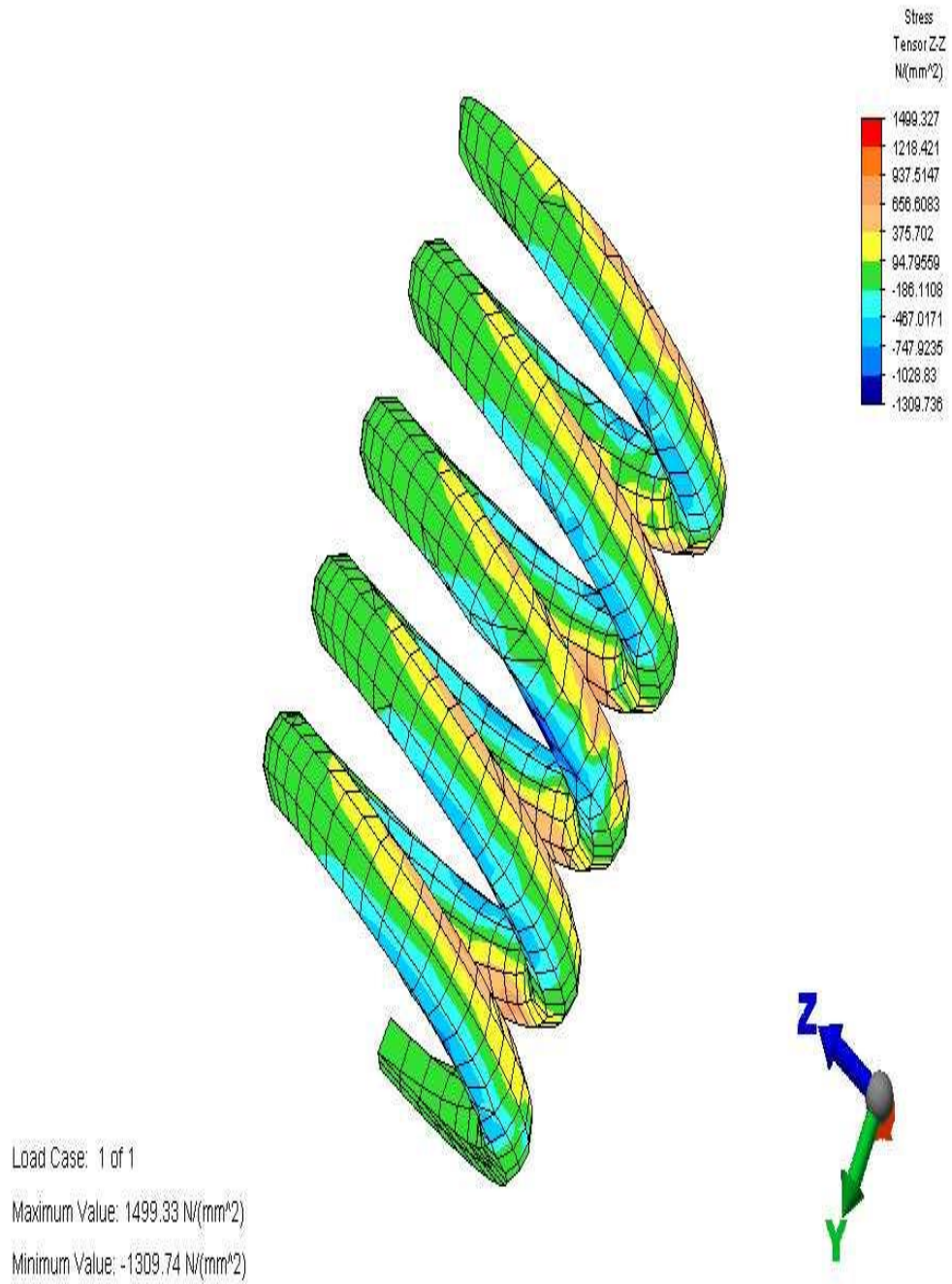


Figura 1.90. Arc  $\Phi 31$

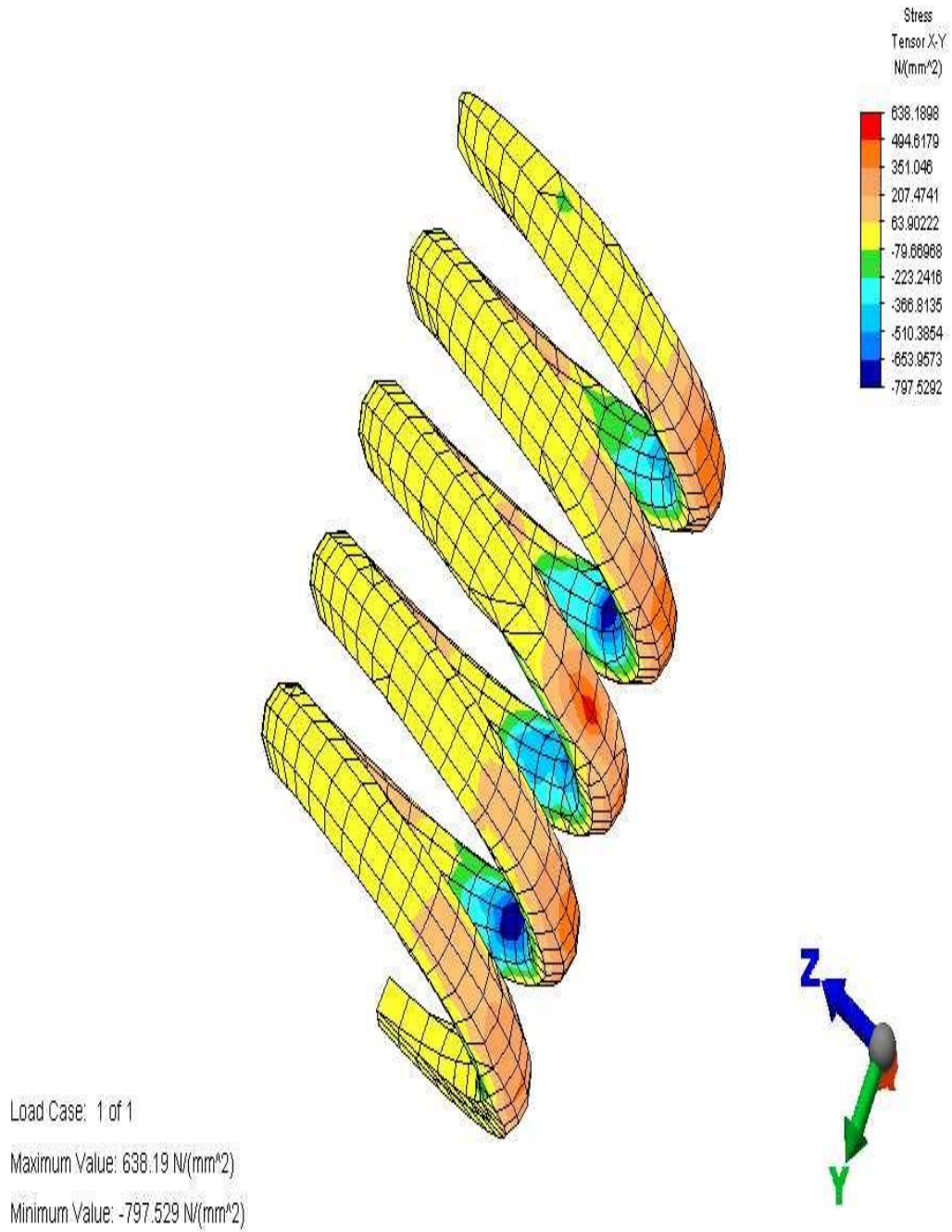


Figura 1.91. Arc  $\Phi 31$ .



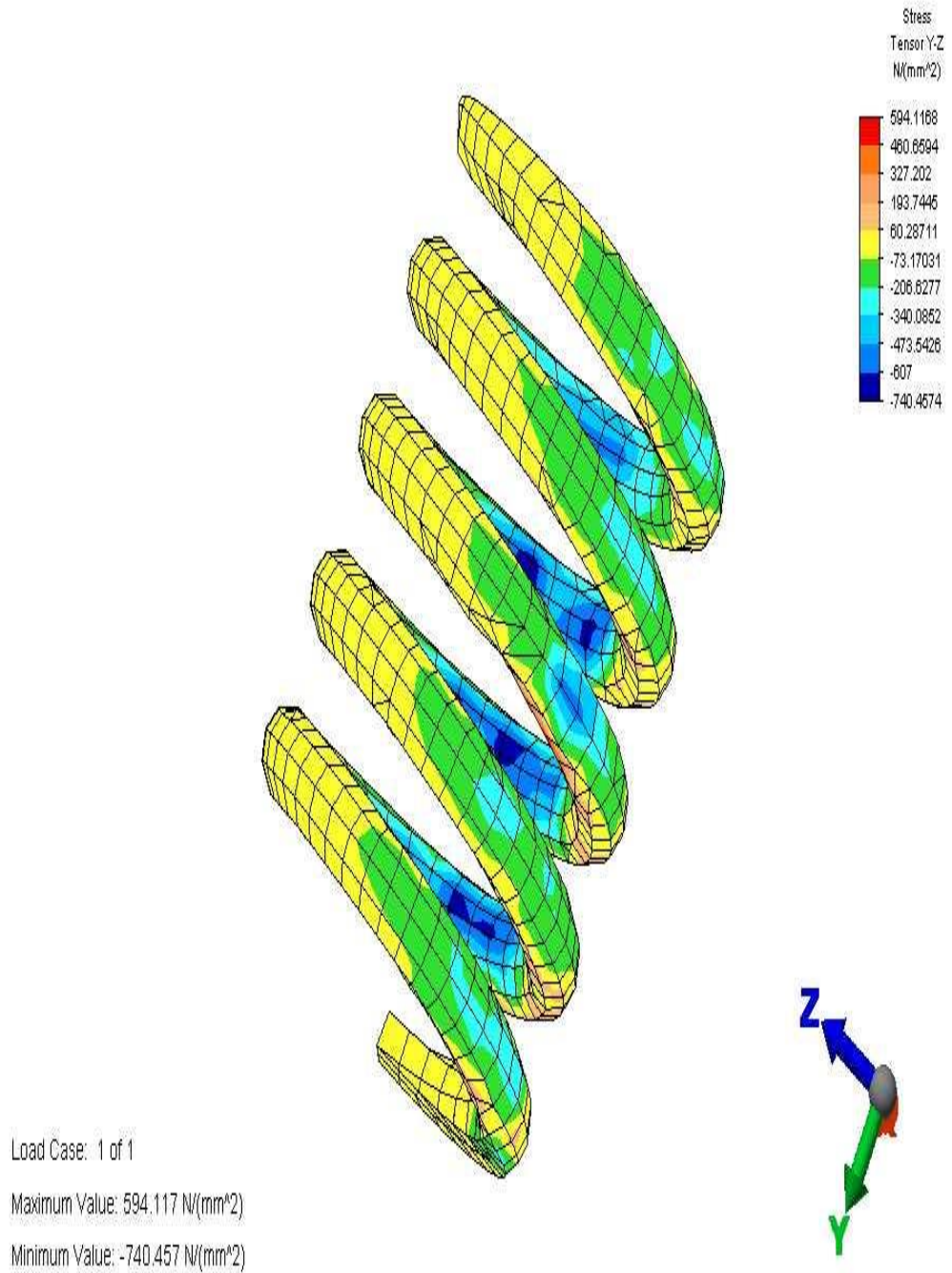


Figura 1.92. Arc  $\Phi 31$ .

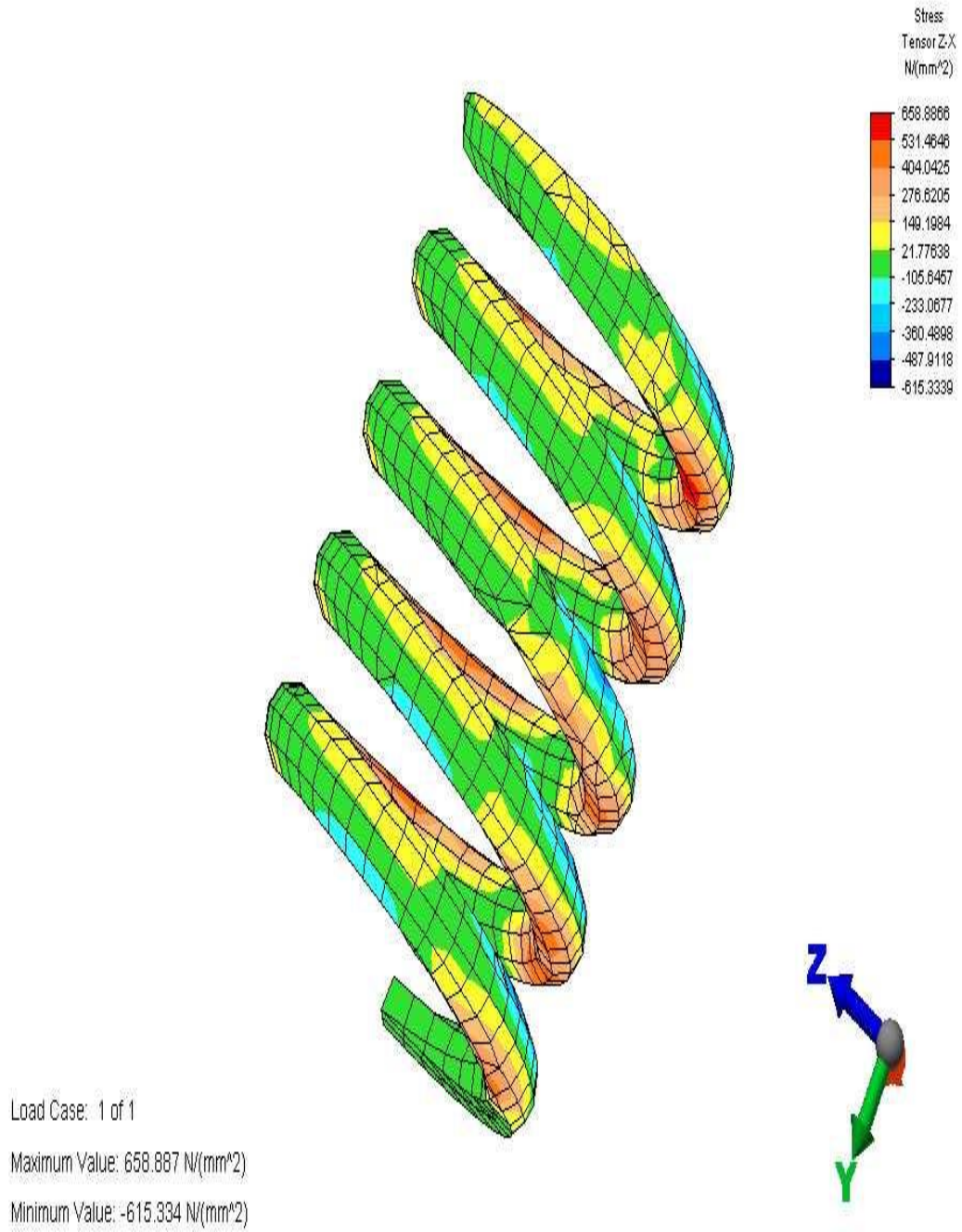


Figura 1.93. Arc  $\Phi 31$ .

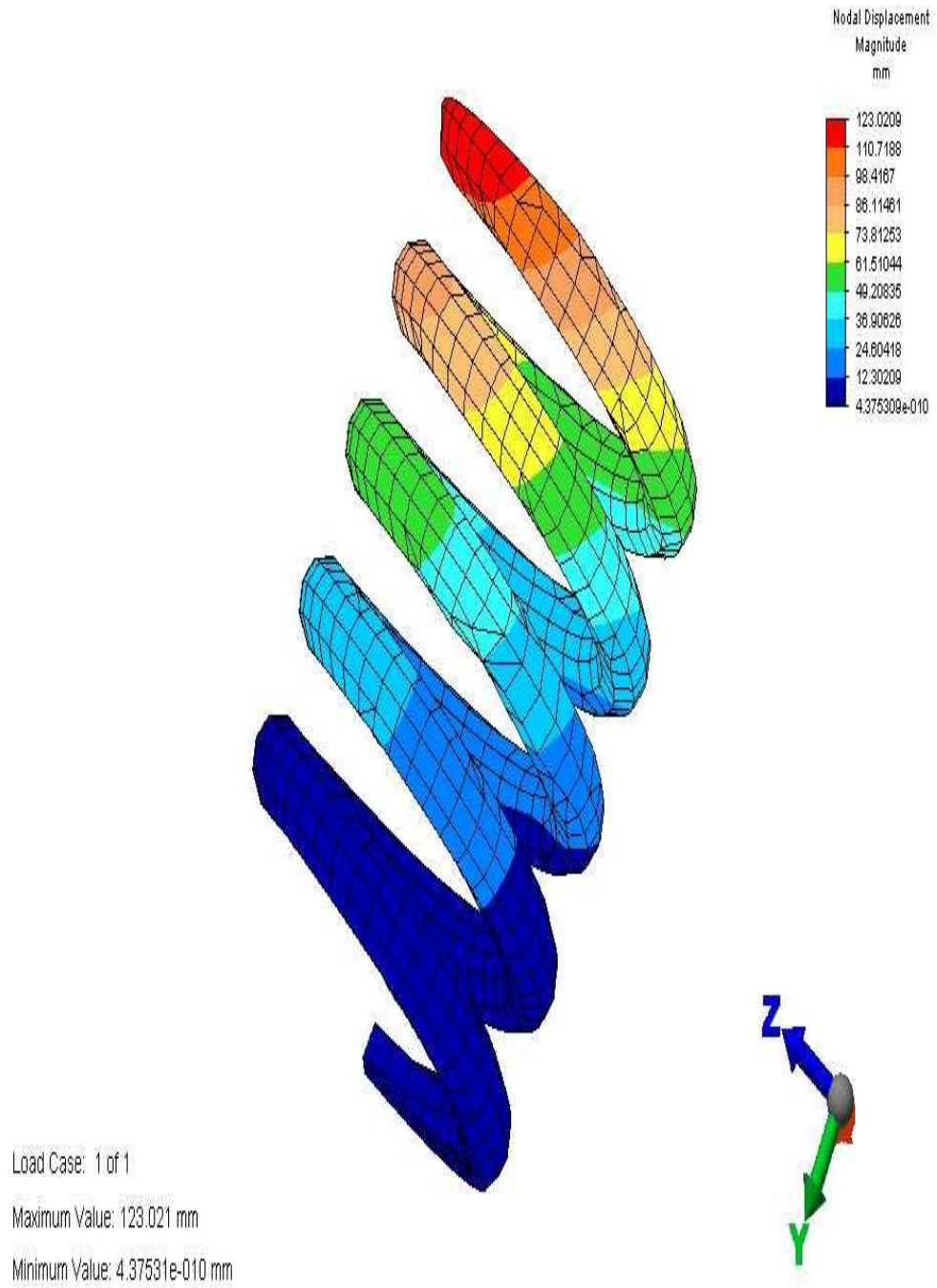


Figura 1.94. Arc  $\Phi 31$ .

## CAPITOLUL 2

# MATERIALE UTILIZATE LA CONFEȚIONAREA ARCURILOR METALICE CA ELEMENTE ELASTICE CE ECHIPEAZĂ VEHICULELE FERROVIARE

### 2.1 Generalități

Particularitățile funcționale ale arcurilor impun următoarele proprietăți principale pentru materialele din care se confecționează: stabilitate în timp a comportamentului elastic (relaxare redusă), limite ridicate de rezistență statică și la oboseală, reziliență mare.

În anumite situații pot să apară specificații complementare privind proprietățile anticorozive, refractare, de conductibilitate termică și dilatare liniară, magnetice și de conductanță electrică [81], [82].

La alegerea calității de material trebuie corelate tipul, destinația și importanța arcului cu eventuale restricții referitoare la gabarit, tehnologia de fabricație și costul.

Oțelurile elaborate special pentru arcuri sunt materiale care, prin natura lor și proporțiile elementelor de aliere, satisfac selectiv majoritatea cerințelor formulate.

O atenție deosebită trebuie acordată tratamentelor termice administrate, limitându-se la minim decarburările și defectele superficiale.

Tratamentele mecanice ca sablarea, ecruisarea cu jet de alică, respectiv procedeul de curățire electrochimică, îndepărtează straturile superficiale de oxizi și ameliorează substanțial comportarea la oboseală [36].

Emailarea în câmp electrostatic asigură proprietăți anticorozive superioare oțelurilor carbon de calitate și slab aliate la un cost relativ redus.

Nivelul tensiunilor admise este condiționat de tipul și dimensiunile arcului, natura materialului, de variația în timp a solicitărilor și mediul de lucru.

Barele de oțel folosite pentru confecționarea arcurilor de vagoane trebuie să aibă caracteristicile chimice, fizice, mecanice și geometrice indicate în normele internaționale [72], [73], [79].

### 2.2. Arcuri pentru vagoane de cale ferată

Arcurile elicoidale de compresiune, formate la cald, destinate în particular a fi folosite ca organe de suspensie, de șoc sau de tracțiune a materialului rulant de cale ferată motor și remorcat trebuie să satisfacă anumite caracteristici fizice, geometrice și mecanice [66].

#### 2.2.1. Caracteristici fizice

**Aspect.** Suprafața arcurilor nu trebuie să prezinte nici o urmă de calamină, nici lipsuri de material sau orice defect care poate influența întrebuințarea lor.

Nici o urmă de crater rezultat din trecerea curentului la examinarea magnetoscopică, nu trebuie să apară pe arcuri.

Partea progresiv micșorată a spirelor de la extremități trebuie să fie riguros debavurată, să nu prezinte praguri și să se termine cu o rotunjire având o rază suficientă pentru a evita accidentarea în cursul manevrărilor.

Operația de debavurare trebuie făcută de așa manieră încât să nu se lovească spirele adiacente.

**Aspectul sănătos.** Arcurile trebuie să fie sănătoase în toate părțile lor constitutive. Spectrul obținut în cursul examenului magnetoscopic (sau a încercării de umezire), făcut după o eventuală alicare, nu trebuie să prezinte nici o linie dreaptă sau sinuoasă formată prin acumularea de pudră sau umezirea cu lichid de detecție.

**Protecția contra coroziunii.** Învelișul de protecție contra coroziunii, este important și trebuie să fie conform prescripțiilor.

### 2.2.2 Caracteristici geometrice.

Forma, dimensiunile și sensul de înfășurare a arcului trebuie să fie conform cu indicațiile desenului. Când nu este precizat sensul de înfășurare este spre dreapta.

Extremitatea firului fiecărei spire finale nu trebuie să aibă o grosime superioară valorii de 0,25 ori diametrul nominal al firului, aceasta după îndreptarea bazelor arcului.

La comprimarea, sub sarcina de încercare de flexibilitate contactul între partea subțiată a fiecărei spire finale, cu o spiră vecină trebuie să se facă pe o lungime egală cu cel puțin 0,33 ori diametrul mediu de înfășurare a arcului, aceasta pentru a evita un contact prea localizat susceptibil de a altera suprafețele.

Bazele arcurilor trebuie să fie perpendiculare pe axa cilindrului fictiv, tangent la conturul exterior al spirelor, sub toleranțele indicate în desen.

### 2.2.3. Caracteristici mecanice

Caracteristicile mecanice trebuie să fie obținute pe arcuri în stare de livrare, eventual după alicare sau tratamentul superficial de protecție la coroziune și după ce fiecare arc a fost supus la încercarea de elasticitate de scurtă durată, înainte de aplicarea învelișului de protecție contra oxidării.

Tensiunile superficiale de compresiune, introduse prin alicare, trebuie să corespundă condițiilor precizate. Arcurile trebuie să suporte, fără a se fisura, două compresiuni succesive, fără ca să se constate o diferență între înălțimea arcului luată sub sarcina  $0,1 P$  după prima compresiune și cea luată sub aceeași sarcină după a doua compresiune,  $P$  fiind sarcina de flexibilitate dată în desen. Arcurile trebuie să poată suporta, fără a se fisura, o serie de flexiuni a căror amplitudine, număr și cadență sunt indicate în desen (anduranța), apoi să satisfacă încercarea de elasticitate de scurtă și lungă durată și încercarea de flexibilitate.

O altă cerință este marcarea: fiecare arc a cărui dimensiune nominală a spirei este de minim 10 mm se va marca prin batere, pe una din spirele finale, cu mijloace de poansonare cu muchii neascuțite și pe cât posibil la cald. Marcarea conține: marca furnizorului și ultimele două cifre ale anului de fabricație.

#### 2.2.4. Parametrii funcționali ai arcurilor

Comportamentul arcurilor, derivat din analiza dependenței sarcină-deformație, se evaluează prin intermediul unor parametri fizici calitativi identici, independent de soluția constructivă.

Caracteristica arcului este constituită de dependența dintre sarcină și deformație, dacă se acceptă pentru sarcină semnificația de forță generalizată, iar pentru deformație cea de deplasare generalizată.

Rigiditatea sau constanta elastică a arcului reprezintă sarcina corespunzătoare deformației unitare (valoarea inversă a rigidității se numește elasticitatea arcului).

#### 2.3. Oțeluri pentru arcuri formate la cald și tratate termic

Caracteristicile impuse arcului determină atât alegerea unei anumite compoziții chimice, cât și alegerea unei anumite stări de livrare a oțelului respectiv. Un oțel laminat la cald nu poate fi folosit, de exemplu, pentru arcuri de mare precizie, deoarece cu toleranțele relativ mari cu care se livrează un asemenea oțel, nu se poate asigura obținerea unei săgeți (deformații) corespunzătoare [6].

Săgeata are o mare importanță în modul de lucru și comportarea unui arc. Ea depinde de dimensiunile și forma geometrică a barelor din care se execută arcul respectiv, astfel dacă se urmărește obținerea unei săgeți cât mai apropiată de cea teoretică, trebuie ca toleranțele admise la dimensiunile barelor să fie cât mai mici. Operația de tragere sau laminare la rece care asigură astfel de toleranțe ridică însă prețul de cost al materialului.

La alegerea materialului, proiectantul trebuie să îmbine considerațiile de ordin tehnic cu cele de ordin economic, să utilizeze la maxim calitățile oțelurilor de la cele mai ieftine, utilizabile în condițiile date și să aibă în vedere toți factorii care concură la obținerea unor arcuri corespunzătoare destinației; îndeosebi să țină seama de proprietățile tehnologice ale materialului în ceea ce privește posibilitatea de execuție a arcului, de importanța secțiunilor și parametrilor lor dimensionali, de posibilitatea de ridicare a indicilor calitativi ai materialului prin tratament termic sau mecanic.

Alegerea judicioasă a unui oțel de arc care să țină seama de toți factorii indicați mai înainte impune, în primul rând, cunoașterea compoziției chimice a oțelului și a influenței elementelor de aliere.

Calitățile oțelurilor aliate și nealiate, pentru arcurile formate la cald, destinate a fi folosite în stare călită și revenită sunt standardizate.

##### 2.3.1. Caracteristici cerute

**Procedee de elaborare.** Dacă nu se specifică altfel în comandă, procedeele folosite pentru elaborarea oțelului și fabricarea produselor sunt lăsate la inițiativa fabricantului, dar oțelul trebuie să fie calmat. Atunci când se cere, cel care îl va folosi trebuie să fie informat despre procedeul de elaborare a oțelului folosit.

**Tipuri și condiții de livrare.** Oțelurile trebuie să fie comandate și livrate conform tabelului 2.1. Tipul condiției de livrare conform tabelului 2.1 trebuie să fie fixat în momentul cererii de ofertă și în comandă.

**Compoziție chimică.** Compoziția chimică exprimată prin analiza topiturii trebuie să fie conform tabelului 2.2.



Energia acumulată de arc într-un interval de deformație dat este proporțională cu aria mărginită de caracteristica sarcină-deformație și axa absciselor.

Dacă comanda este făcută conform condițiilor de livrare de tip 1 sau 1(c) (vezi tabelul 2.1) trebuie să se respecte abaterile date în tabelul 2.3, între valorile limită specificate și analiza pe produs.

Dacă comanda este făcută conform condițiilor de livrare de tip 2, 2(c), 4 și 4(c), proprietățile mecanice sau de călire specificate trebuie să constituie criteriile de recepție. În astfel de cazuri, analiza pe produs poate fi ușor diferită la cifrele indicate în tabelul 2.2.

Tabelul 2. 1. Tipuri de condiții de livrare

Caracteristici cerute	Tipuri de condiții de livrare 1)					
	1	1(c)	2	2(c)	4	4(c)
Compoziție chimică	x	x	x	x	x	x
Capacitatea de călire	-	-	x	x	-	-
Duritate în stare revenită subcritică	-	x	-	x	-	x
Caracteristici mecanice asupra secțiunii de referință cu diametru de 10 mm )	-	-	-	-	x	x

### 2.3.2 Caracteristici mecanice.

În privința caracteristicilor mecanice în legătură cu conținutul în martensită din miez, folosirea oțelurilor trebuie să se restrângă la bare de grosime date în tabelul 2.4.

Dacă acest lucru este specificat (tipurile de condiții de livrare 4 și 4(c) – vezi tabelul 2.1), caracteristicile mecanice obținute pe epruvetele prelevate în lung, cu diametrul de 10 mm și fiind supuse unui tratament termic de referință conform indicațiilor din tabelul 2.8 (vezi nota 2 din tabelul 2.5), trebuie să fie conform cu specificațiile din tabelul 2.5.

Când comanda se face conform tipurilor de condiții de livrare 1(c), 2(c) și 4(c) (vezi tabelul 2.1) convin valorile de duritate maximă în stare revenit subcritic conform tabelului 2.6, în plus față de alte specificații, duritatea este măsurată după o pregătire convențională a suprafeței.

Când capacitatea de călire este criteriu de comandă (tipurile de condiții de livrare 2 și 2(c) – vezi tabelul 2.1), se aplică pentru duritatea Rockwell C, cifrele indicate în tabelul 2.7 și benzile de dispersie figura 2.1.

Analizând benzile de călibilitate se constată o creștere a călibilității de la oțelul 3 spre oțelul 14, fapt care se corelează direct cu compoziția chimică a acestor oțeluri.

**Tabel 2.2. Tipuri de oțel și compoziția chimică garantată (aplicabilă analizei pe topitură)**

Tip de oțel	C %	Si %	Mn %	P % max.	S % max.	S % min.	Cr %	Mo %	V %
1	0.72 până la 0.85	0.15 până la 0.40	0.50 până la 0.80	0.050	0.050				
2	0.72 până la 0.85	0.15 până la 0.40	0.50 până la 0.80	0.035	0.035				
3	0.43 până la 0.50	1.50 până la 2.00	0.50 până la 0.80	0.040	0.040				
4	0.47 până la 0.55	1.50 până la 2.00	0.50 până la 0.80	0.040	0.040				
5	0.52 până la 0.60	1.50 până la 2.00	0.60 până la 0.90	0.040	0.040				
6	0.57 până la 0.64	1,70 până la 2.20	0.70 până la 1.00	0.040	0.040				
7	0.57 până la 0.64	1.70 până la 2.20	0.70 până la 1.00	0.040	0.040		0.25 până la 0.40		
8	0.52 până la 0.59	0.15 până la 0.40	0.70 până la 1.00	0.035	0.035		0.60 până la 0.90		
9	0.56 până la 0.64	0.15 până la 0.40	0.70 până la 1.00	0.035	0.035		0.60 până la 0.90		
10	0.56 până la 0.64	0.15 până la 0.40	0.70 până la 1.00	0.035	0.035	0.0005	0.60 până la 0.90		
11	0.42 până la 0.50	0.30 până la 1.70	0.50 până la 0.80	0.035	0.035		0.50 până la 0.75	0.15 până la 0.30	
12	0.56 până la 0.54	0.15 până la 0.40	0.70 până la 1.00	0.035	0.035		0.70 până la 0.90	0.25 până la 0.35	
13	0.48 până la 0.55	0.15 până la 0.40	0.70 până la 1.00	0.035	0.035		0.90 până la 1.20		0.10 până la 0.20
14	0.48 până la 0.56	0.15 până la 0.40	0.70 până la 1.00	0.035	0.035		0.90 până la 1.20	0.15 până la 0.25	0.07 până la 0.12

1)Elementele nementionate în tabel nu trebuie să fie adăugate intenționat fără acordul cumpărătorului, decât dacă se urmărește obținerea unui produs finit mai bun. Trebuie să se ia toate precauțiunile necesare pt. evitarea adăugării de elemente provenind de la materiale feroase sau alte materiale folosite în fabricație susceptibile să afecteze capacitatea de călire, proprietățile mecanice și aptitudinea la folosire.



**Tabel 2.3. Abaterile admisibile între analizele specifice și analiza pe produs**

Tip de oțel	Abateri admise							
	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Cr %	Mo %	V %
1 și 2	±0.04	±0.03	±0.04	+0.005	+0.005			
3 până la 5	±0.02	±0.05	±0.04	+0.005	+0.005			
6	±0.02	±0.05	±0.04	+0.005	+0.005			
7	±0.02	±0.05	±0.04	+0.005	+0.005	±0.04		
8.9 și 10	±0.02	±0.03	±0.04	+0.005	+0.005	±0.05		
11	±0.02	±0.05	±0.04	+0.005	+0.005	±0.05	±0.03	
12	±0.02	±0.03	±0.04	+0.005	+0.005	±0.05	±0.03	
13	±0.02	±0.03	±0.04	+0.005	+0.005	±0.05		±0.02
14	±0.02	±0.03	±0.04	+0.005	+0.005	±0.05	±0.03	±0.02

**1)** ± înseamnă ca, într-o singură topitură și în mai mult de o analiză pe produs, abaterea se poate produce fie sub valoarea maximă, fie peste valoarea minimă, dar niciodată două deodată.

**Tabel 2.4. Dimensiuni maxime recomandate pentru table și bare**

Tipul de oțel	Dimensiunile maxime 1)	
	Grosimea tablelor	Diametrul barelor
1	8	12
2	8	12
3	14	20
4	16	24
5	8	12
6	14	20
7	16	24
8	18	28
9	22	33
10	24	35
11	30	45
12	47	70
13	27	40
14	40	60

1) Dimensiunile maxime indicate mai sus sunt bazate pe un conținut în martensită de aproximativ 80% în miezul secțiunii călite.

## 2. 4. Probe

### 2.4.1. Numărul de eșantioane din produse.

**Compoziția chimică.** Analiza pe topitură trebuie să fie furnizată de către fabricant. Dacă cumpărătorul pretinde o analiză pe produs, se va preleva cel puțin un eșantion din produs pe topitură.

**Caracteristici mecanice și de călire.**

**1.** Pentru materialul furnizat conform tipurilor de condiții de livrare 1(c), 2(c) și 4(c) ale tabelului 2.1 cu duritatea maximală garantată în stare revenită subcritică, trebuie să se preleveze un eșantion din produse pe topitură și pe lot de tratament termic pentru a fi supus probelor conform specificațiilor din tabelul 2.6. Dacă produsul este tratat termic într-un mod continuu, prelevarea unui eșantion din produs pentru proba de lot de 25 t sau fracțiune, pentru oțelurile nealiate cu carbon 1 și 2 și pe lot de 15 t sau fracțiune, pentru oțelurile aliate 3 până la 14, cel puțin un eșantion din produse trebuie să fie prelevat pe topitură.

Tabelul 2.5. Caracteristici mecanice 1) pentru epruvetele prelevate în lung cu un diametru de 10 mm în stare de referință (vezi Tab. 2.8)

Tipul de oțel	Re min.		Rm min.		A min.
	N/mm <sup>2</sup>	Tonf/in <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	Tonf/in <sup>2</sup>	%
1	880	57.1	1180	78.2	6
2	880	57.1	1180	78.2	6
3	1080	69.9	1270	82.6	6
4	1130	73.0	1320	85.7	6
5	1130	73.0	1320	85.7	6
6	1180	76.2	1320	88.9	5
7	1180	76.2	1370	88.9	5
8	1180	76.2	1370	88.9	6
9	1180	76.2	1370	88.9	5
10	1180	76.2	1370	88.9	6
11	1180	76.2	1370	88.9	6
12	1180	76.2	1370	88.9	6
13	1180	76.2	1370	88.9	6
14	1180	76.2	1370	88.9	6

1) Re = Limita aparentă de elasticitate (limita convențională de elasticitate la 0.2 %); Rm = rezistența la tracțiune; A = Alungirea % după rupură (Lo=5do)

2) Dacă este imposibil să se obțină o epruveta cu diametrul de 10 mm, epruveta trebuie să aibă diametrul maximal care poate fi obținut plecând de la produs.

Tabelul 2.6 – Duritatea maximală pentru produsele livrate în stare revenită subcritică

Tipul de oțel	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
HB maxim în stare revenită subcritică	241	241	241	248	248	255	255	255	255	255	255	241	241	255

**2.** Pentru materialul furnizat conform tipurilor de condiții de livrare 4 și 4c din tabelul 2.1 cu caracteristici mecanice garantate pentru secțiunea de referință tratată termic (10 mm diametrul), trebuie să se preleveze un eșantion pe topitură pentru a face proba conform tabelului 2.5.

**3.** Pentru materialul furnizat conform tipurilor de condiții de livrare 2 și 2(c) ale tabelului 2.1 cu garantarea asupra călibilității prin călire frontală, trebuie să se

preleveze un eșantion pe topitură pentru probă, conform specificărilor din tabelul 2.7.

**Tabel 2.7 – Limitele de duritate provizorie (experimentală) pentru călirea specificată**

Distanța de la extremitatea călită a epruvetei [mm]	Duritatea HRC																							
	Otel 3		Otel 4		Otel 5		Otel 6		Otel 7		Otel 8		Otel 9		Otel 10		Otel 11		Otel 12		Otel 13		Otel 14	
	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
1,5	55	63	56	64	57	65	59	66	59	66	57	65	59	66	60	65	55	63	60	65	57	65	57	65
3	50	60	52	61	55	62	58	66	58	66	56	65	59	66	60	65	54	63	60	65	56	65	56	65
5	40	53	42	56	49	60	56	65	57	65	55	64	57	65	60	65	53	62	60	65	66	64	56	64
7	33	46	36	52	43	57	50	64	51	64	54	63	56	65	59	65	52	62	60	65	55	64	55	64
9	29	42	32	47	37	54	43	62	45	63	52	63	53	64	59	65	50	61	60	65	53	63	53	63
11	26	39	29	43	34	50	38	60	40	61	48	62	50	63	57	65	49	61	60	65	50	62	52	63
13	23	36	27	41	32	46	36	58	38	59	43	61	45	62	54	65	47	60	60	65	46	61	51	63
15	21	34	26	38	31	42	34	55	37	57	39	60	41	61	49	65	45	59	59	65	43	60	50	62
20	-	31	22	35	28	39	31	48	33	50	33	57	35	58	39	65	42	57	58	64	37	57	48	62
25	-	29	21	33	27	37	28	43	30	45	30	52	32	54	37	63	40	55	56	64	35	53	47	62
30	-	27	-	32	26	36	27	41	29	43	28	48	30	50	34	60	37	52	54	63	33	50	46	62
35	-	25	-	31	26	35	26	39	28	41	27	45	29	47	32	57	36	51	50	63	32	48	46	61
40	-	24	-	29	25	34	25	38	27	40	26	42	28	44	30	54	34	49	46	63	30	45	45	61
45	-	24	-	28	24	33	24	37	26	39	25	40	27	42	28	50	33	49	43	63	29	44	44	61
50	-	23	-	27	24	33	23	36	25	38	24	39	26	41	25	47	33	48	41	63	28	43	44	60

Observații: Valorile durității sunt experimentale și pot fi revizuite atunci când se dispune de date suplimentare. Aceste valori sunt bazate în primul rând pe ciclurile care au o grosime a granulelor de 5 sau mai puțin, după cum se definește în ISO/R 3.

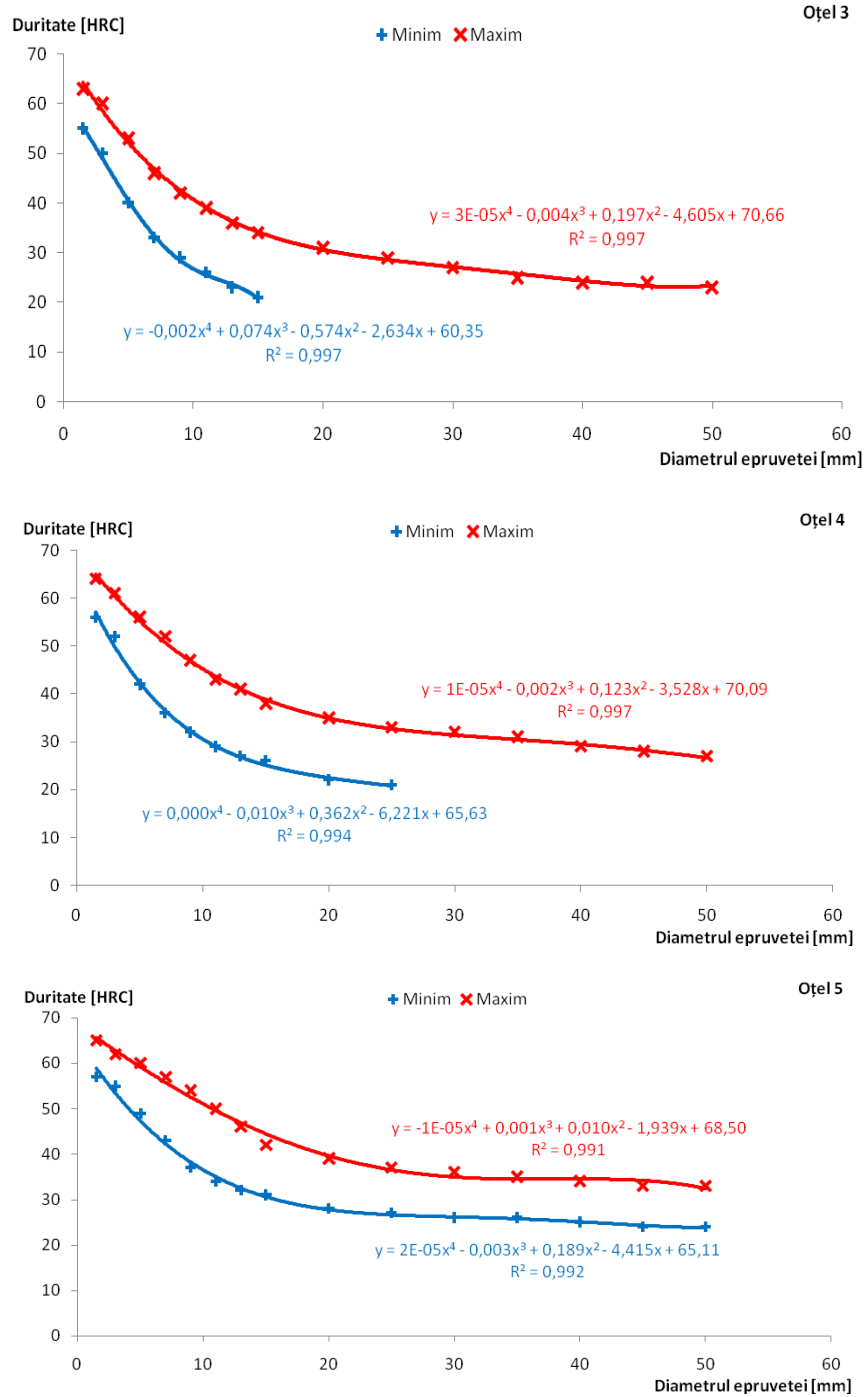


Figura 2.1 Banda de dispersie a capacității de călire

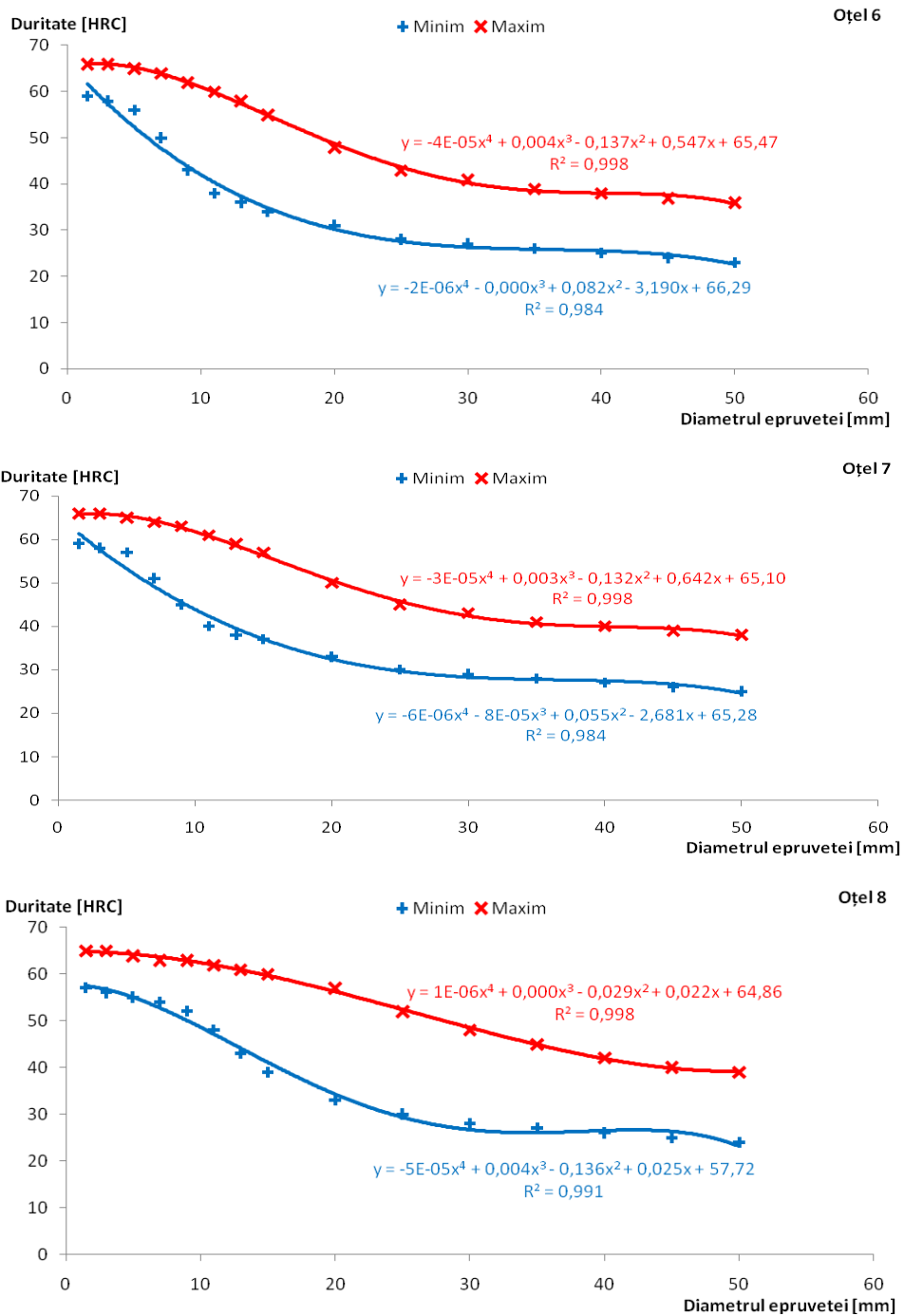


Figura 2.1. continuare- banda de dispersie a capacității de călire

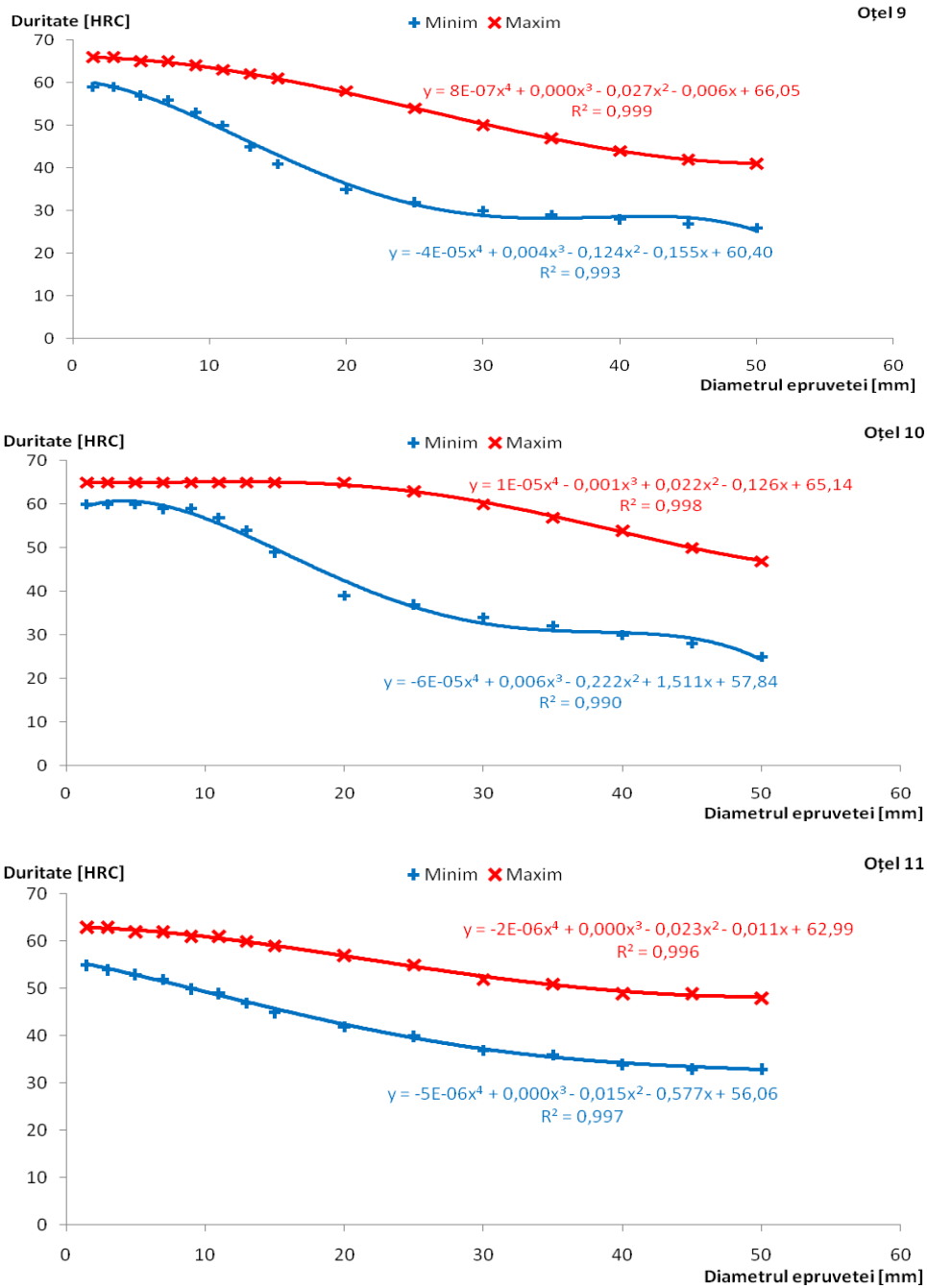


Figura 2.1. continuare- banda de dispersie a capacității de călire

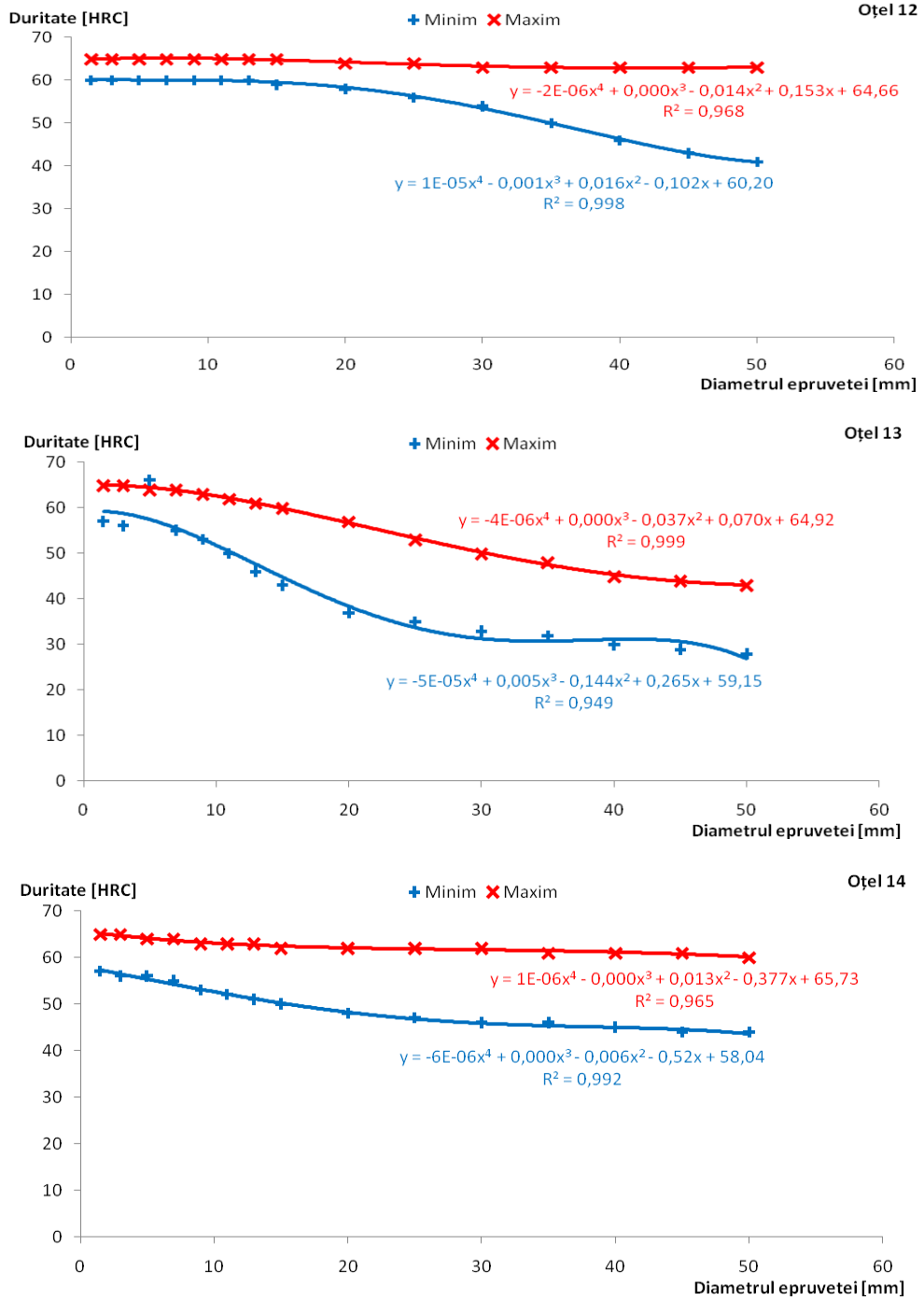


Figura 2.1. continuare- banda de dispersie a capacității de călire

### 2.4.2. Eșantioane și epruvete.

**1.** Epruvetele pentru proba de tracțiune trebuie să fie prelevate în lungime (paralel cu direcția de corelaj) până în centrul produsului figura 2.2.

**2.** Bara din care s-a uzinat eșantionul pentru proba de călire frontală, trebuie să fie o bară forjată sau laminată cu diametrul de 32 sau 30 mm, reprezentând secțiunea întreagă a produsului, secțiunile mai mari trebuie aduse la aceste dimensiuni prin laminare sau forjare. Prin convenție particulară, un eșantion topit separat poate fi folosit în locul unui eșantion laminat sau forjat. Celelalte condiții care trebuie respectate în pregătirea eșantioanelor trebuie să fie conform lui ISO/R 642.

**3.** Pentru analiza pe produs, alegerea eșantioanelor trebuie efectuată conform explicațiilor lui ISO/R 377.

**4.** Condițiile generale pentru alegerea și pregătirea eșantioanelor și a epruvetelor pentru oțel trebuie să fie conform cu ISO/R 377 [67].

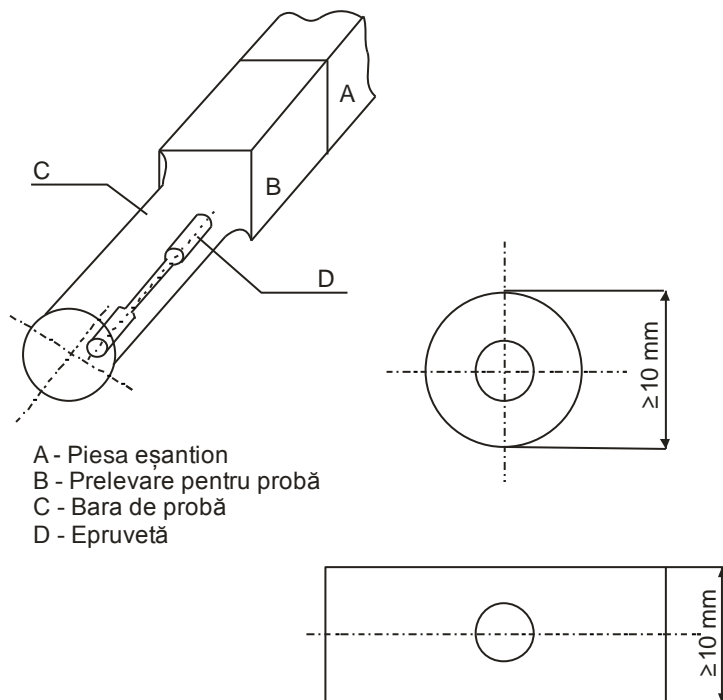


Figura 2.2. Amplasarea epruvetei în produs

### 2.4.3. Metode de probă

**1.** Proba de tracțiune trebuie să fie executată conform cu ISO/R

**2.** Proba capacității de călibilitate prin călire frontală trebuie să fie efectuată conform cu ISO/R 642 [69]. Temperaturile de călire trebuie să fie conform cu tabelul 2.8.



**CONDIȚII DE TRATAMENTE TERMICE****TABEL 2.8**

TIP OȚEL	LAMINAREA SAU FORJAREA PRODUSULUI (°C)	TRATAMENTUL TERMIC NECESAR PT.OBTINEREA STĂRII DE REFERINȚĂ			PROBA DE CALIRE FRONTALĂ +/- 5 °C	FORMARE LA CALD A ARCURILOR (grade °C)	STARE DE REVENI RE SUB- CRITICĂ	TRATAMENT TERMIC A ARCURILOR		
		1) TEMP DE CALIRE +/- 10°C	AGENT DE CALIRE	2) REVE NIRE +/- 20 °C				1) CĂLIRE (grade °C)	AGENT DE CĂLIRE	2) REVENIRE
1	1050 la 850	835	ulei	460	-	900 la 840	640 la 700	820 la 850	ulei	400 la 550
2	1050 la 850	835	ulei	460	-	900 la 840	640 la 700	820 la 850	ulei	400 la 550
3	1050 la 850	865	apa	480	860	900 la 840	640 la 700	850 la 880	apa	400 la 550
4	1050 la 850	860	apa	480	860	900 la 820	640 la 700	845 la 875	apa	400 la 550
5	1050 la 850	855	ulei	480	850	900 la 830	640 la 700	840 la 870	ulei	400 la 550
6	1050 la 850	845	ulei	480	850	920 la 830	640 la 700	830 la 860	ulei	400 la 550
7	1050 la 850	845	ulei	480	850	920 la 830	640 la 700	830 la 860	ulei	400 la 550
8	1100 la 850	845	ulei	480	850	920 la 830	640 la 700	830 la 860	ulei	400 la 550
9	1100 la 850	845	ulei	480	850	920 la 830	640 la 700	830 la 860	ulei	400 la 550
10	1100 la 850	845	ulei	480	850	920 la 830	640 la 700	830 la 860	ulei	400 la 550
11	1100 la 850	865	ulei	480	850	920 la 830	640 la 700	830 la 860	ulei	400 la 550
12	1100 la 850	865	ulei	480	850	920 la 830	640 la 700	830 la 860	ulei	400 la 550
13	1100 la 850	865	ulei	480	850	920 la 830	640 la 700	830 la 860	ulei	400 la 550
14	1100 la 850	865	ulei	480	850	920 la 830	640 la 700	830 la 860	ulei	400 la 550

**1) durata de austenizare 0,5h****2) durata de revenire 1h**

**3.** Proba durității Brinell trebuie să fie efectuată conform cu ISO/R 79 [70].

Proba de duritate Rockwell trebuie să fie efectuată conform cu ISO/R 80 [71].

**4.** În caz de litigiu, metoda pentru analiza chimică trebuie să fie aceea prescrisă în Norma Internațională corespunzătoare. Dacă nici o normă internațională nu este disponibilă, metoda poate fi convenită și specificată în momentul cererii-ofertei și în comandă.

#### **2.4.4. Contra - Probe**

**1.** În cazul unor contra-probe asupra caracteristicilor mecanice se aplică paragraful 6.5. din ISO/R 404[68].

**2.** Pentru contra-probele din cazul analizelor pe produs se aplică paragraful 7.6. din ISO/R 404.

#### **2.4.5. Certificarea probelor.**

Pentru certificarea probelor se aplică prevederile din capitolul 4 din ISO/R 404 principalele elemente valabile sunt:

- atestatul de conformitate cu comanda;
- procesul verbal de control a calității;
- certificatul de control al produselor de către uzină;
- certificatul de probe;
- procesul verbal de recepție.

Conform paragrafului 7.4. din ISO/R 642, distanțele de la extremitatea călită a epruvetei, până la acelea la care trebuie certificată duritatea, trebuie fixate în momentul cererii de oferta și comandă.

Toleranțele admisibile la dimensiuni și la masă trebuie să fie fixate în comandă dacă nu există nici o Normă Internațională asupra acestui subiect.

### **2.5. Defecte și toleranțe dimensionale**

Condițiile date în capitolul 8 al ISO/R 404 sunt aplicabile pentru:

- defecte de suprafață;
- rectificări;
- defecte interne;
- toleranțe dimensionale;
- reclamații.

### **2.6. Concluzii asupra materialelor utilizate la fabricarea arcurilor**

Imprimarea proprietăților corespunzătoare unui oțel de arcuri se face fie prin tratament termic de călire-revenire, fie prin deformări plastice la rece (ecruisare).

Arcurile executate din semifabricatele durificate prin ecruisare se supun și ele unui tratament termic, și anume unei recoaceri de detensionare, care constă din încălzirea la 230 până la 400°C, urmată de răcire în aer. Acest tratament termic are drept scop eliminarea tensiunilor remanente, apărute cu ocazia operațiilor executate la rece: deformarea plastică a semifabricatului și înfășurarea arcului.

Capacitatea de arcuire a oțelurilor este determinată de modulul de elasticitate. Ca valori orientative se indică  $E = 0,21 \times 10^6 \text{ N/mm}^2$ .

Oțelurile pentru arcuri trebuie să aibă următoarele proprietăți:

- domeniu larg de deformare elastică;

- proprietăți foarte bune de plasticitate;
- rezistență la oboseală mare.

Caracteristicile cerute oțelurilor de arcuri se obțin prin două metode și anume:

- printr-o compoziție chimică adecvată – conținutul de C, Si, Mn mărite și alierea cu Cr și V, precum și alte elemente de aliere;
- printr-un tratament termic obligatoriu de călire și revenire medie sau în unele cazuri se poate face o călire izotermă obținându-se o bainită inferioară.

Pentru a obține un modul de elasticitate mare și o rezistență mare la oboseală arcurile trebuie să conțină un procent mare de Si (în acest caz 1,7%).

Arcurile elicoidale formate la cald (figura 2.3) sunt supuse unui tratament termic care cuprinde obligatoriu o călire, în apă sau ulei după categoria de oțel folosit, și o revenire urmată de o răcire lentă în aer liniștit.

Tratamentul termic nu se efectuează decât după completa răcire - eliminarea căldurii de formare înfășurate.

În vederea asigurării unei mai bune calități a tratamentului termic, se recomandă a se determina în prealabil, temperaturile de călire și revenire în funcție de compoziția chimică reală a oțelului folosit și de a respecta aceasta cu +/- 10°C în cursul operațiilor de tratament termic.

Acestea din urmă trebuie să fie conduse de așa manieră încât să evite toate deformațiile și toate formările de calamină ce ar putea influența buna comportare a arcurilor în exploatare și a asigura omogenitatea caracteristicilor arcurilor din aceeași fabricație.

Temperaturile de tratament termic trebuie să fie controlate cu ajutorul pirometrelor înregistratoare corect etalonate.

Durabilitatea și comportarea în exploatare a arcurilor depind și de alți factori decât valorile caracteristicilor mecanice: starea suprafeței, gradul de decarburare (din timpul operației de tratament termic); lipsa incluziunilor nemetalice, călibilitatea, regimul tratamentului termic aplicat, omogenitatea structurii, protecția împotriva coroziunii.

Caracteristicile de exploatare sunt date de către structurile obținute în urma tratamentului termic de călire și revenire medie (cel mai utilizat în cazul arcurilor foi sau elicoidale).

Conform EN 10089 - oțelul 60 Si 17 A (Arc 3) după operația de călire și revenire trebuie să posede următoarele caracteristici mecanice.

R<sub>m</sub> 160 kgf/mm<sup>2</sup>; R<sub>p0,2</sub>=140 kgf/mm<sup>2</sup>; A%; Z=25%; HCR 40-45.

Structura de revenire medie care conferă aceste proprietăți mecanice este alcătuită din trostită și sorbită. Pentru a putea obține aceste proprietăți mecanice finale după revenirea medie, condițiile impuse oțelurilor după călire este următoarea:

- martensită de călire min 90% în centrul piesei;
- HRC min 50-52.

Pentru obținerea unei cantități mari de martensită, precum și o duritate mare a acesteia, oțelul trebuie să conțină o cantitate mare de C 0,5÷0,65; Mn0,8÷1% și Cr 0,3% și V 0,1÷0,2%.

Aceste elemente C, Mn, Cr, V influențează călibilitatea oțelului acționând asupra vitezei critice de călire. Aceste elemente măresc cantitatea de martensită din oțeluri, se pot căli la martensită (martensita ajungând până în centrul piesei) piese cu grosimi mari, iar duritatea oțelului crește.

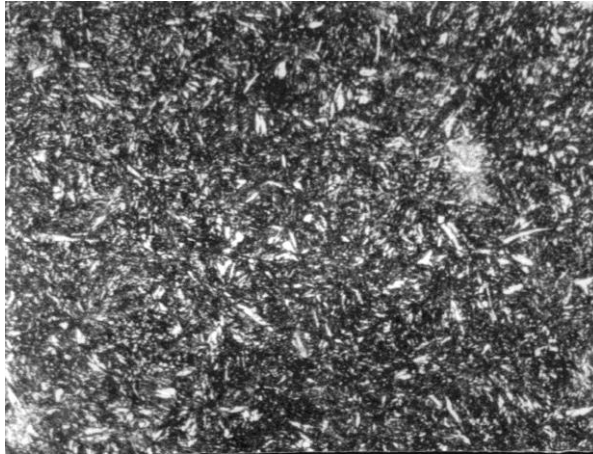


Fig. 2.3. Structură oțel arc 60 Si 15 A netratat termic

Viteza critică de călire este viteza minimă de răcire a unui oțel în timpul operației de călire pentru a se putea obține în structură o cantitate de martensită de călire (în caz contrar se pot obține constituenți cum ar fi: trostită, sorbită, perlită, baintă) vezi diagramele de transformare TTT sau CCT.

În vederea determinării diametrului optim pentru oțelurile specificate în tabelul 2.7 am reprezentat în figura 2.1 pentru toate oțelurile banda de dispersie a capacității de călire.

Pentru fiecare compoziție chimică se recomandă o duritate semimartensitică în funcție de care se determină diametrul barelor sau grosimea tablelor.

Diagramele benzilor de dispersie a capacității de călire permit pentru fiecare oțel obținerea după călire a unei structuri optime de revenire.

## **CAPITOLUL 3**

# **CONTRIBUȚII LA TEHNOLOGIA DE FABRICAȚIE A ARCURILOR**

### **3.1. Materiale**

#### **3.1.1. Generalități**

Pentru execuția arcurilor care echipează boghiurile vagoanelor înmatriculate în Germania, societatea constructoare de arcuri trebuie omologată de DB (Autoritatea Națională a Căilor Ferate din Germania). Suplimentar față de condițiile din UIC 822.O [66], DB cere proba de oboseală de 4.000.000 de cicluri.

Pentru studiu s-au folosit 3 tipuri de arcuri elicoidale și anume arcurile pentru suspensia boghiului Y25 (22,5 to / osie) :

- arcul exterior Ø31 mm;
- arcul interior Ø24,4 mm ;
- arcul Ø15 mm de la glisiera elastică.

Având în vedere că arcul interior Ø24,4 mm a fost preluat de la boghiul Y25 de 200kN/osie (păstrându-se diametrul de înfășurare Ø90 mm) la aceste dimensiuni arcul nu se încadrează în ce privește rezistența la oboseală în diagramele de oboseală de tip Goodman.

Diagramele Goodman din EN sunt pentru arcuri la care, tehnologic, se ia măsura specială de îmbunătățire a comportării la oboseală (tratament termic și ecruisarea cu bile din oțel).

Măsurile de îmbunătățire tehnologică se vor încadra în tehnologia actuală și vor fi în concordanță cu dotarea tehnică actuală [37].

#### **3.1.2. Condiții tehnice**

Sunt necesare următoarele condiții tehnice:

- desenele de execuție ;
- planele de operații (tab.3.16; tab.3.17; tab.3.18) ;
- normele referitoare la material și la arcuri [61], [66] ;
- programul pentru realizarea și testarea la oboseală (tab.3.1; tab.3.2; tab.3.3) ;
- cartificatele de calitate emise de producător, pentru materialele utilizate ;
- buletine de analiză și încercări mecanice, efectuate (tab.3.4; tab.3.5; tab.3.6);
- microstructuri ale probelor martor.

Tabel 3.1

Arcuri de compresiune interioară Ø24,4mm					
Treaptă de sarcină	Lungimea sub sarcina $F_1(L_1)$	Cursa sup. ( $L_0$ ) [mm]	Cursa inf. ( $L_u$ ) [mm]	Cursa [mm]	Nr. cicluri
1	203	217,8	188,2	±14,8	$2,0 \times 10^6$
2	203	218,4	187,6	±15,4	$1,0 \times 10^6$
3	203	219,5	186,5	±16,4	$1,0 \times 10^6$

Tabel 3.2

Arcuri de compresiune exterioară Ø31mm					
Treaptă de sarcină	Lungimea sub sarcina $F_1(L_1)$	Cursa sup. ( $L_0$ ) [mm]	Cursa inf. ( $L_u$ ) [mm]	Cursa [mm]	Nr. cicluri
1	200	210,5	189,5	±10,5	$2,0 \times 10^6$
2	200	212,6	187,4	±12,6	$1,0 \times 10^6$
3	200	216,7	183,3	±16,7	$1,0 \times 10^6$

Tabel 3.3

Arcuri de compresiune pentru glisieră Ø15mm					
Treaptă de sarcină	Lungimea sub sarcina $F_1(L_1)$	Cursa sup. ( $L_0$ ) [mm]	Cursa inf. ( $L_u$ ) [mm]	Cursa [mm]	Nr. cicluri
1	91	96	86	±5,0	$2,0 \times 10^6$
2	91	100	82	±9,0	$1,0 \times 10^6$
3	91	103	79	±12,0	$1,0 \times 10^6$

Tabel 3.4

Arc Ø15mm	Caracteristici mecanice					Analiza chimică %						
	Limita de curgere [N/mm <sup>2</sup> ]	Rezistența la rupere [N/mm <sup>2</sup> ]	Alungirea [%]	HB		C	Mn	Si	S	P	Cr	V
				ext	nucleu							
Prescris	min	1370	min			0,47	0,70	0,15	max	max	0,90	0,10
	1180	1670	6			0,55	1,10	0,40	0,035	0,035	1,20	0,20
	1418	1520	14,8	214	228	0,51	0,79	0,34	0,025	0,021	0,96	0,13
	1408	1510	13,6									
	Duritate HRC după tratament			45	47	Călire: 850°C - ulei Revenire: 430°C - aer						

Tabel 3.5

Arc Ø24,4mm	Caracteristici mecanice					Analiza chimică %						
	Limita de curgere [N/mm <sup>2</sup> ]	Rezistența la rupere [N/mm <sup>2</sup> ]	Alungirea [%]	HB		C	Mn	Si	S	P	Cr	V
				ext	nucleu							
Prescris	min	1370	min			0,47	0,70	0,15	max	max	0,90	0,10
	1180	1670	6			0,55	1,10	0,40	0,035	0,035	1,20	0,20
	1346	1438	128	204	204	0,52	0,76	0,34	0,027	0,018	0,98	0,11
	1336	1438	12									
	Duritate HRC după tratament			45	47	Călire: 850°C - ulei Revenire: 430°C - aer						

Tabel 3.6

Arc Ø31mm	Caracteristici mecanice					Analiza chimică %						
	Limita de curgere [N/mm <sup>2</sup> ]	Rezistența la rupere [N/mm <sup>2</sup> ]	Alungirea [%]	HB		C	Mn	Si	S	P	Cr	V
				Stare crudă								
Prescris	min	1370	min			0,47	0,70	0,15	max	max	0,90	0,10
	1180	1670	6			0,55	1,10	0,40	0,035	0,035	1,20	0,20
	1357	1448	10	204	204	0,52	0,80	0,35	0,028	0,024	0,97	0,13
	1336	1448	92									
	Duritate HRC după tratament			48	47	Călire: 850°C - ulei Revenire: 430°C - aer						

Pentru analiză s-au luat 3 loturi formate din 10 arcuri de fiecare tip, executate din aceeași șarjă de material și supuse aceluiași tratament termic.

Arcurile au fost executate conform tehnologiei.

### 3.2. Tehnologia de execuție a arcurilor elicoidale cilindrice de compresiune

Tehnologia de execuție și verificare a arcurilor pentru materialul rulant de cale ferată trebuie să fie în concordanță cu fișa UIC 822,[9],10].

Arcurile sunt clasificate în trei categorii (1, 2 și 3), în funcție de severitatea solicitărilor la care ele sunt supuse în exploatare.

Conform acestei norme UIC, natura și proporția verificărilor sunt cele din tabelul 3.7, cu următoarele precizări :

- suprafața arcurilor nu trebuie să prezinte nici o urmă de calamină, nici lipsuri de material sau orice defect care poate influența utilizarea lor;
- nici o urmă de crater, rezultat din trecerea curentului la examinarea magnetoscopică, nu trebuie să apară pe arcuri;
- partea progresiv micșorată a spirelor de capăt trebuie să fie riguros debavurată, să nu prezinte praguri și să se termine cu o rotunjire având o rază suficientă pentru a evita riscurile de accidentare în timpul manipulărilor;
- forma, dimensiunile și sensul de înfășurare ale arcului trebuie să fie conform cu indicațiile desenului. Când nu este precizat, sensul de înfășurare este dreapta;
- în afara unor indicații contrare în desen, extremitatea fiecărei spire de capăt nu trebuie să aibă o grosime mai mare de 0,25 d (d = diametrul barei);
- la comprimare, sub sarcina de încercare de flexibilitate, contactul între partea subțiată a fiecărei spire finale cu o spiră vecină, trebuie să se facă pe o lungime egală cu cel puțin 0,33 din diametrul mediu de înfășurare al arcului, aceasta pentru a evita un contact prea localizat, susceptibil de a altera suprafețele;
- bazele arcurilor trebuie să fie perpendiculare pe axa cilindrului fictiv, tangent la conturul exterior al spirelor, sub toleranțele indicate în desen ;
- înfășurarea arcurilor trebuie să fie făcută la cald. În principiu, după înfășurare, arcurile trebuie să fie lăsate să se răcească în aer liniștit, cu răcire controlată ;
- pentru arcurile de categoria 1, precum și pentru cele de alte categorii dacă documentația prevede, tratamentul termic nu se efectuează decât după completa răcire după înfășurare ;

- toate defectele de aspect sau de dimensiuni antrenează rebutul arcurilor respective ;
- toate caracteristicile fizice sau mecanice neconforme cu condițiile prescrise, antrenează rebutul lotului respectiv ;
- noi încercări sau noi verificări la cererea fabricantului, cu sau fără tratament termic, nu pot fi făcute decât cu acordul administrației client.

Tabelul 3.7 Natura și proporția verificării arcurilor elicoidale

Denumirea verificărilor	Categorია arcului			Numărul de arcuri de verificat pentru loturi de							
	1	2	3	10-50	51-150	151-300	301-500	501-800	801-1300	1301-2000	2001-3000
Verificarea eficienței ecruisării	x			De determinat de administrația clientă, în acord cu furnizorul, în funcție de condițiile de execuție a ecruisării							
Duritate	x	x		5	6% sau mai multe, după dorința reprezentantului administrației client						
Elasticitate de scurtă durată	x	x	x	5	8	12	17	23	30	38	47
Elasticitate de lungă durată	x	x		3	4	6	9	12	15	19	24
Flexibilitate	x	x	x	3	4	5	7	9	11	14	17
Anduranța	x										
Selecție	x			toate							
Control magnetoscopic	x	x		3	4	5	7	9	11	14	17
Aspect și dimensiuni	x	x	x	La dorința reprezentantului administrației client							

Tehnologia de fabricație a arcurilor elicoidale cilindrice de compresiune, supuse spre analiză, cuprinde următoarele operații :

- *debitarea materialului*
  - utilaj : ferăstrău cu bandă
  - lungimea de debitare :

$$L = \pi \times D_m \times n_t : \cos \alpha_0 \quad (3.1)$$



- *rotunjit capete*
  - utilaj : strung
  - operația se execută pentru ca, după prelucrarea suprafețelor de așezare, capetele arcurilor să nu aibă muchii ascuțite, evitându-se astfel riscurile de accidentare în timpul manipulărilor.
  
- *înfășurare la cald*
  - utilaj : cuptor cu inducție tip SODALGO (figura 3.5)
  - mașină de înfășurat (figura 3.5)
  - SDV : dorn de înfășurare (figura 3.5)

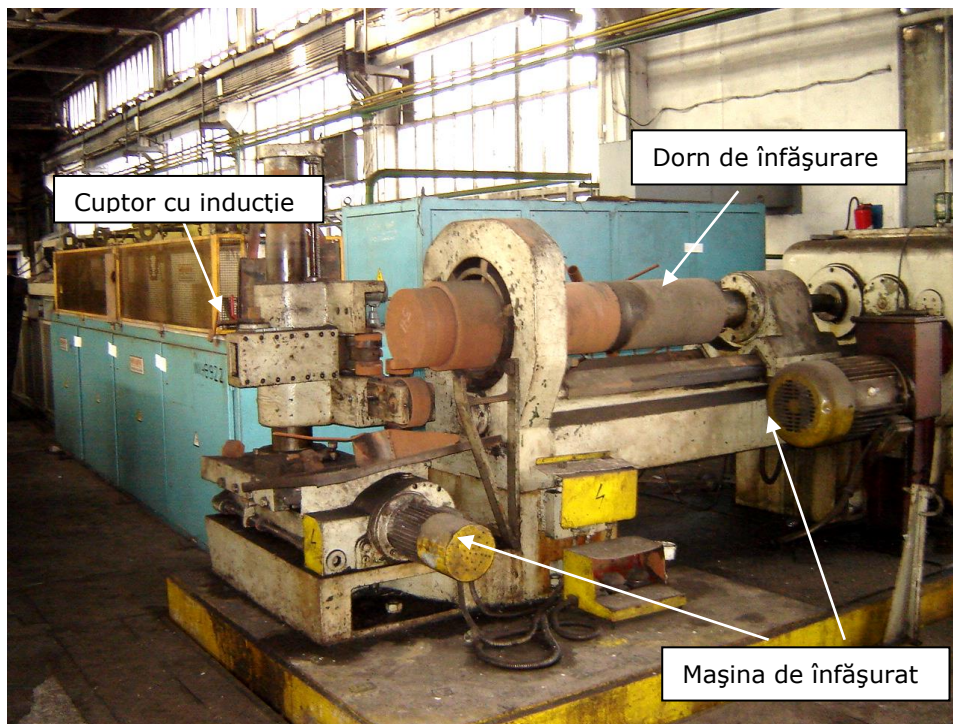


Fig. 3.5 Cuptorul cu inducție și mașina de înfășurat arcuri elicoidale

- *ajustat la cald*, spira de capăt și pasul arcului
  - operația se execută manual. Scopul acestei operații este de a închide capetele spirelor terminale prin lovire cu ciocanul, pe dorn.
  - SDV : dorn de ajustat
  
- *strunjit eboș* suprafețele de așezare a arcurilor.
  - utilaj : strung
  - SDV : dorn de strunjit
  
- *tratament termic de îmbunătățire (călit + revenit)*

- utilaj : linia de tratament termic, discontinuă, în atmosferă controlată (figura 3.6)
- călire cu răcire în ulei
- revenire cu răcire în aer liniștit

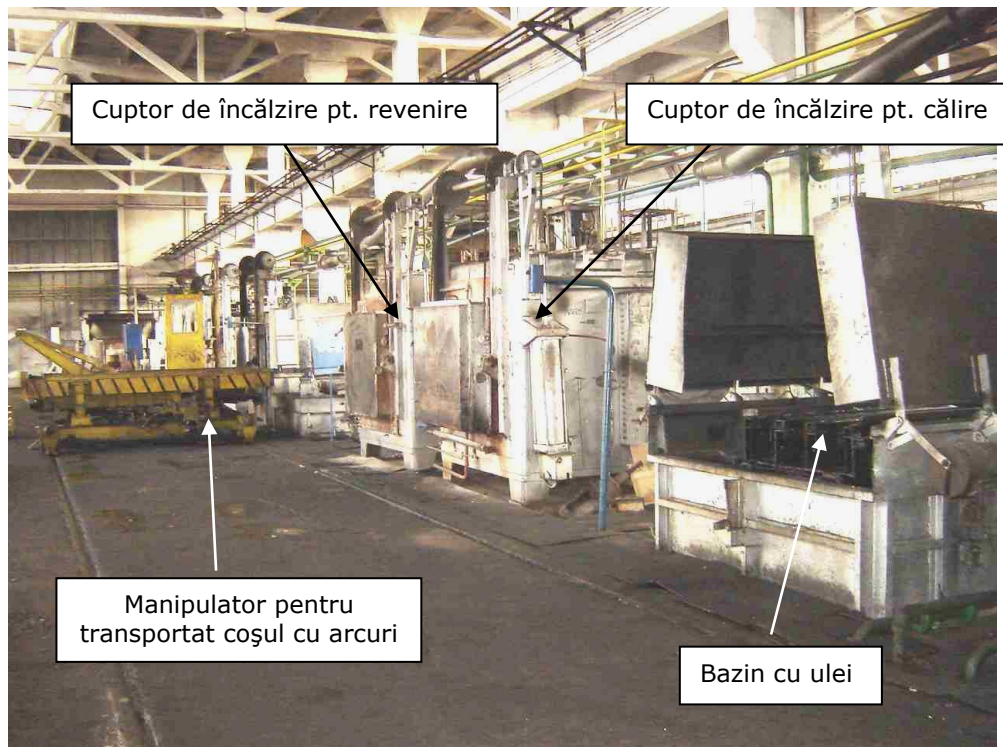


Fig. 3.6 Instalația de tratament termic discontinuă în atmosferă controlată

- *verificat duritatea*. Durițiile măsurate pe arcuri trebuie să fie conforme cu cele indicate în desen. Încercarea de duritate trebuie obligatoriu să fie făcută pe una din spirele de capăt.

- *proba 1*

- utilaj : mașina de diagramat ANDILOG (figura 3.11)
- se execută pentru stabilizarea arcului și determinarea adaosului pentru operația de strunjit finisat, prin verificarea înălțimii arcului sub sarcina prescrisă.

- *strunjit finisat* suprafețele de așezare a arcurilor

- utilaj : strung
- SDV : dorn de strunjit

- *proba 2*

- utilaj : mașina de diagramat ANDILOG (figura 3.11)

- se verifică înălțimea arcului sub sarcina prescrisă

-*ecruisat*

- utilaj : instalație de ecruiat SIESSON - LEHMANN (figura 3.7)
- cu alice din oțel

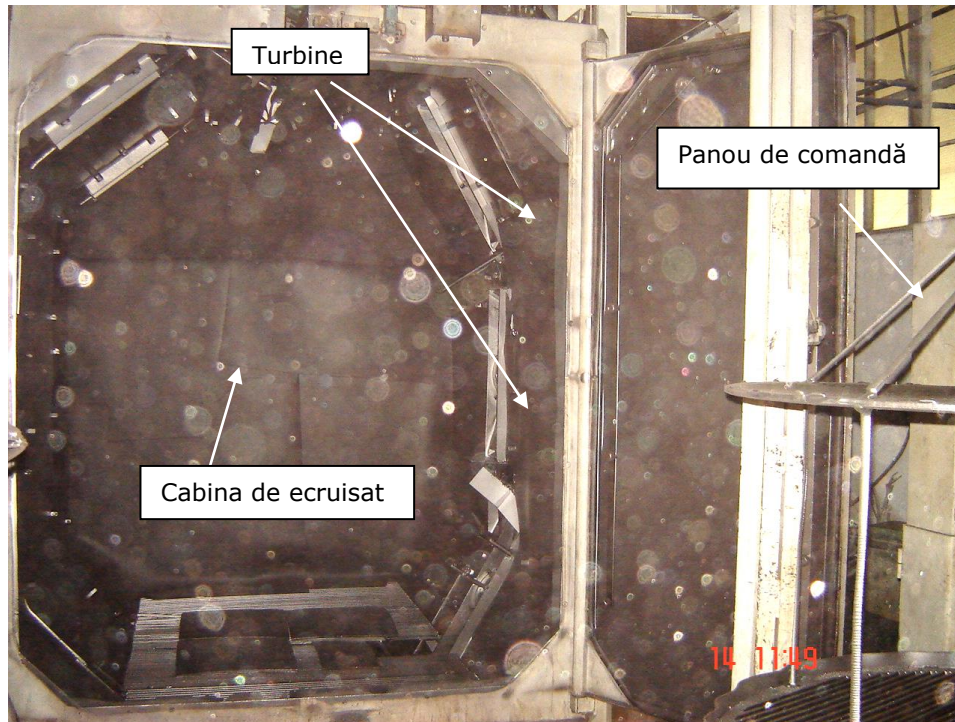


Fig. 3.7 Instalația de ecruiat cu alice din oțel SESSON-LEHMANN

-*diagramat și proba de elasticitate și flexibilitate*

- utilaj : mașina de diagramat ANDILOG (figura 3.11)

Operația de *diagramat* constă în verificarea înălțimii arcului sub sarcina prescrisă în desen :

- pentru arcul  $\varnothing 31$  : înălțimea  $242^{+1}_{-3}$  mm sub sarcina 880 daN ;
- pentru arcul  $\varnothing 15$  : înălțimea  $91^{\pm 2}$  mm sub sarcina 800 daN ;
- pentru arcul  $\varnothing 24,4$  nu este prevăzută verificarea unei înălțimi sub sarcină, doar verificarea înălțimii libere a arcului :  $H_0 = 234^{\pm 2}$  mm.

De menționat că înălțimile arcurilor sub aceste forțe corespund pentru vagon gol. Arcurile se selecționează în funcție de înălțimea sub sarcină. La montarea pe boghiu arcurile se împerechează astfel încât înălțimea la tampoane să rezulte în limitele prescrise.

Rezultatele acestor testări sunt în tabelele 3.8, 3.9, 3.10 și sub formă de diagramă în figurile 3.8, 3.9. și 3.10:

Tabel 3.8 Înălțimea sub sarcina statică obținută pentru lotul de 10 arcuri Ø31mm

NR. ARC	FORȚA	ÎNĂLȚIMEA PRESCRISĂ	ÎNĂLȚIMEA MĂSURATĂ
1	880 daN	242 <sup>+1</sup> <sub>-3</sub>	242,48
2			241,37
3			242,30
4			242,08
5			241,55
6			241,91
7			242,72
8			242,63
9			241,55
10			241,28

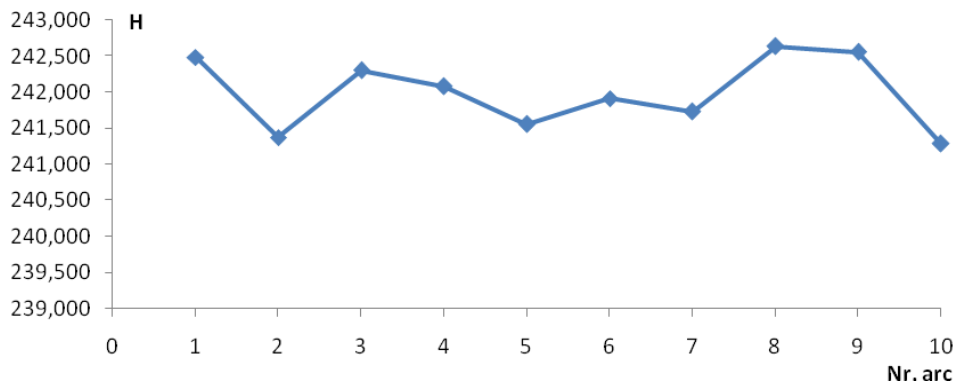


Fig. 3.8 Înălțimea sub sarcina statică obținută pentru arcurile Ø31 mm

Tabel 3.9 Flexibilitatea obținută pentru lotul de 10 arcuri Ø31 mm

NR. ARC	FORȚA	FLEXIBILITATEA PRESCRISĂ	FLEXIBILITATEA MĂSURATĂ
1	F <sub>1</sub> = 1000 daN F <sub>1</sub> = 2500 daN	Nominal = 50,120 daN/mm Maxim = 54,130 daN/mm Minim = 46,110 daN/mm	48,848
2			48,125
3			48,188
4			48,400
5			48,681
6			48,368
7			48,150
8			48,902
9			48,683
10			48,282

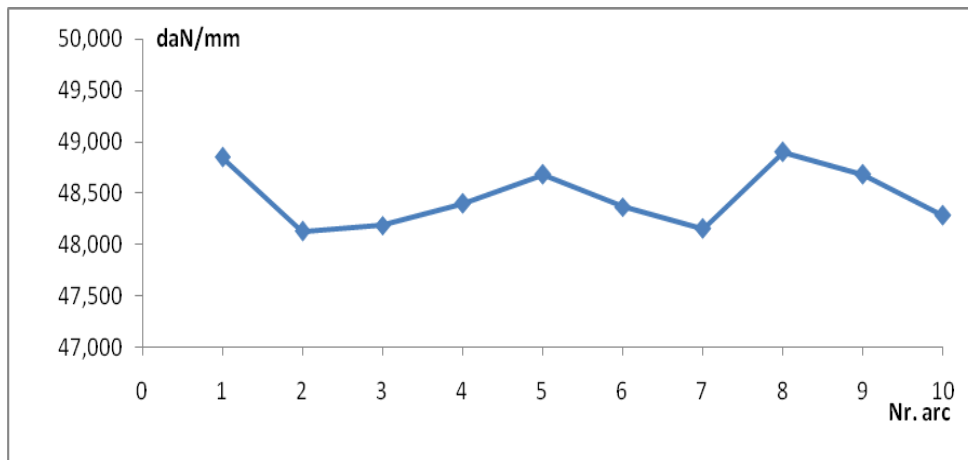


Fig. 3.9 Flexibilitatea obținută pentru lotul de 10 arcuri Ø31 mm

Tabel 3.10 Flexibilitatea obținută pentru lotul de 10 arcuri Ø24,4 mm

NR. ARC	FORȚA	FLEXIBILITATEA PRESCRISĂ	FLEXIBILITATEA MĂSURATĂ
1	F <sub>1</sub> = 500 daN F <sub>1</sub> = 2500 daN	Nominal = 81,290 daN/mm Maxim = 87,800 daN/mm Minim = 74,780 daN/mm	78,314
2			78,025
3			76,846
4			79,561
5			80,457
6			78,502
7			78,872
8			78,361
9			78,222
10			79,087



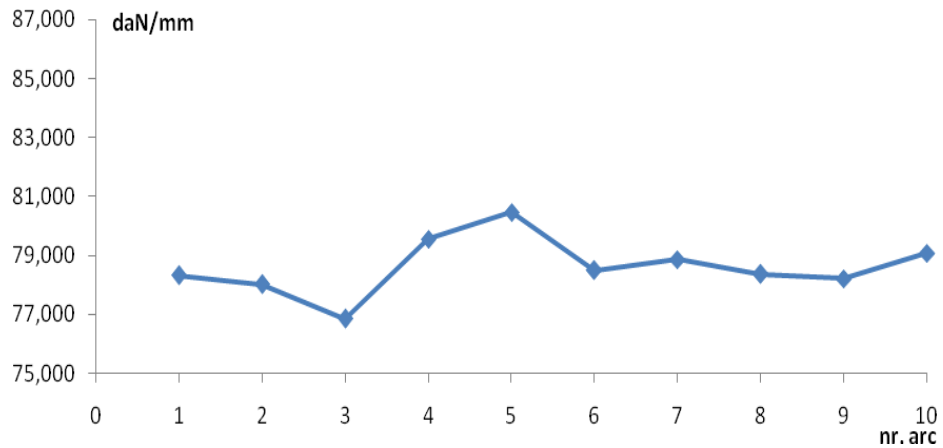


Fig. 3.10 Flexibilitatea obținută pentru lotul de 10 arcuri Ø24,4 mm

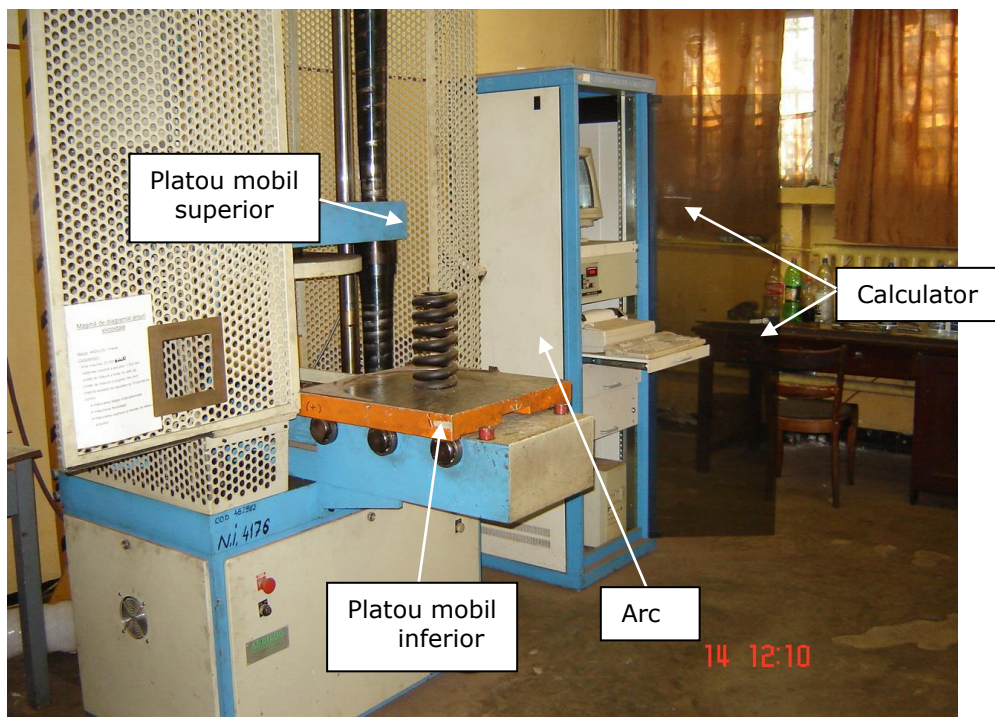


Fig. 3.11 Mașina de diagramat arcuri elicoidale tip ANDILOG

*Proba de elasticitate :*

1. *Elasticitatea de scurtă durată* : se aplică arcului o sarcină egală cu  $0,1 P$  ( $P$  fiind sarcina de flexibilitate indicată în desen) sub care se măsoară înălțimea sa. Arcul este apoi supus la două comprimări succesive, cuprinzând fiecare din operațiile următoare :

- aplicarea progresivă urmată de o menținere pe o durată de 2 minute a sarcinii P ;
- eliberarea arcului ;
- măsurarea înălțimii sub sarcina 0,1 P ;

Nici o diferență mai mare decât cea prescrisă nu trebuie să se constate între înălțimea arcului sub sarcina 0,1 P după prima comprimare și cea luată sub aceeași sarcină după a doua comprimare.

2. *Elasticitatea de lungă durată*, nu diferă de cea de scurtă durată decât prin durata celei de a doua comprimări, care este de 48 ore.

*Proba de flexibilitate* : flexibilitatea teoretică se calculează cu formula (3.2)

:

$$\text{Flex.} = \frac{L_1 - L_2}{F_2 - F_1} \quad [\text{mm/daN}] \quad (3.2)$$

unde  $L_1$  și  $L_2$  sunt înălțimile arcului luate sub sarcinile de flexibilitate prevăzute în desen.

Valorile măsurate ale flexibilității trebuie să se încadreze în valorile și toleranțele din documentație.

Rezultatele acestor verificări se găsesc în "Fișa de măsurători" (Tabelul 3.19).

- *verificare magnetoscopică*
  - conform anexa B, UIC 822.O
  - utilaj: instalație de verificare magnetoscopică (figura 3.14)

Principiul metodei : verificarea magnetoscopică are rolul detectării defectelor sensibil paralele cu axa barei arcului, denumite „defecte longitudinale” și defectele sensibil perpendiculare pe axa barei arcului, denumite „defecte transversale”.

Controlul se efectuează prin procesul de magnetizare adaptat la orientarea defectelor căutate a fi :

- defecte longitudinale : magnetizarea prin trecerea curentului după axa barei arcului (figura 3.12) :

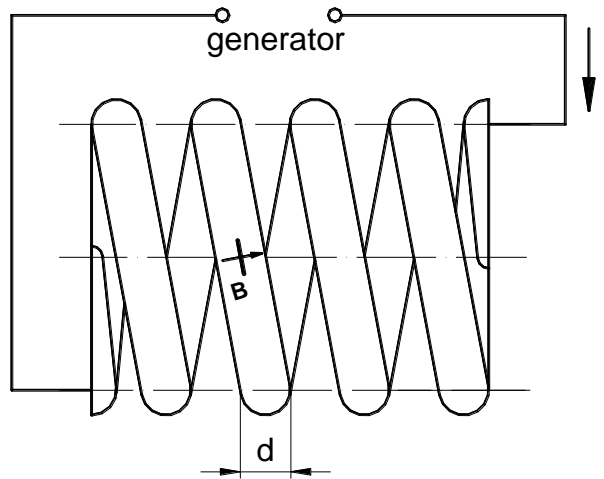


Fig. 3.12 Detectarea defectelor longitudinale ale arcurilor

- defecte transversale: magnetizarea prin trecerea curentului printr-un conductor auxiliar plasat în axa selenoidului format de arc (figura 3.13)

Intensitatea curenților magnetici se reglează în funcție de dimensiunile arcului.

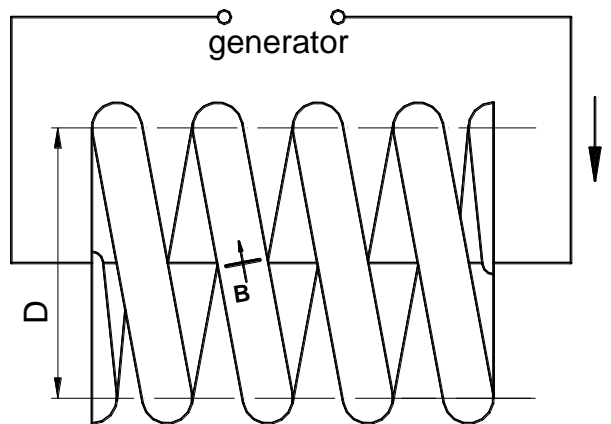


Fig. 3.13 Detectarea defectelor transversale ale arcurilor

Detectia se face udând abundant toate suprafețele barei arcului cu lichid magnetic.

După operația de magnetizare, o inducție reziduală importantă poate să existe la capetele arcului. Magnetoscopia trebuie, deci, să fie obligatoriu urmată de o operație de demagnetizare, care poate fi făcută prin trecerea unui curent alternativ în bara arcului și făcând o descreștere regulată a curentului de la valoarea maximă utilizată la valoarea zero. Absența magnetismului permanent este verificată, asigurându-se că arcurile nu exercită nici o atracție asupra unei



pieșe magnetizate din oțel feromagnetic sau cu ajutorul unei dovezii de magnetizare.

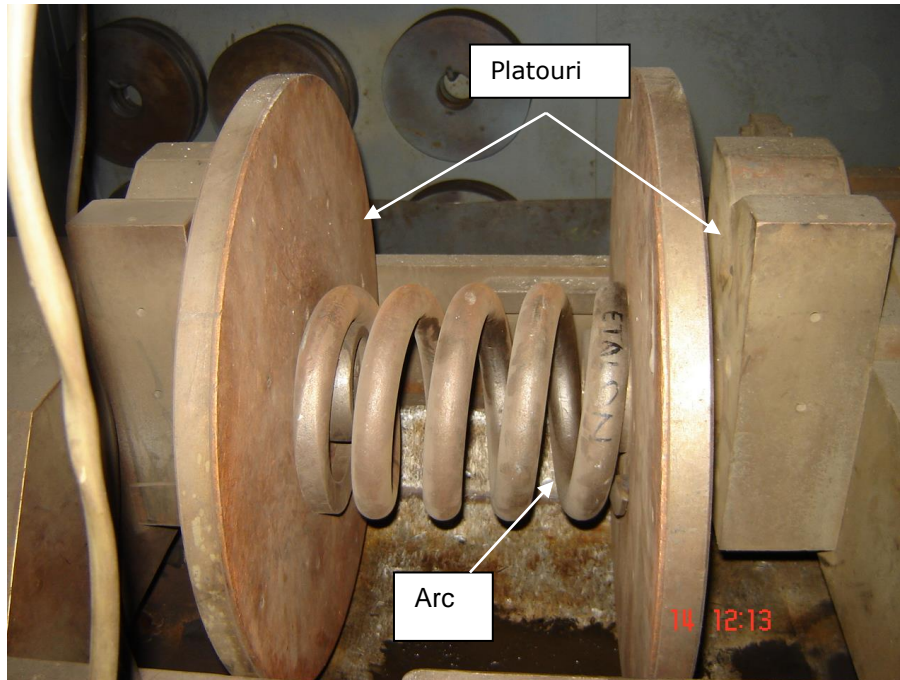


Fig. 3.14 Instalație de verificare magnetoscopică

### 3.3. Analiza tehnologiei și măsuri de îmbunătățire

#### 3.3.1. Materialul și starea barelor

Arcurile supuse analizei sunt executate din oțel 50CrV4 [61] pentru care sunt prezentate câteva mărci corespondente în tabelul 3.11:

Tabel 3.11 Mărci echivalente pentru oțelul 50CrV4

GERMANIA		ROMÂNIA	ANGLIA	RUSIA
DIN 17221	Werkstoff	EN 10089	B.S 970	GOST 14959
50CrV4	1.8159	51VCr11A	735A51	50HGFA

Compoziția chimică a oțelului conform DIN 17221 și cea obținută pentru șarja din care s-au executat arcurile analizate, conform certificatului emis de producător sunt indicate în tabelul 3.12 :

Tabel 3.12 Compoziția chimică pentru oțelul 50CrV [%]

<b>50CrV4</b>	<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>Cr</b>	<b>S</b>	<b>P</b>	<b>V</b>	<b>Ni</b>
<b>DIN</b>	0,47- 0,55	0,15- 0,40	0,70- 1,10	0,90- 1,20	max. 0,035	max. 0,035	0,10- 0,20	-
<b>Ø31</b>	0,49	0,34	0,93	1,01	0,006	0,008	0,11	0,10
<b>Ø24,4</b>	0,49	0,34	0,93	1,01	0,006	0,008	0,11	0,10
<b>Ø15</b>	0,49	0,31	0,76	0,91	0,009	0,006	0,11	0,07

Regimurile de tratament termic și de deformare plastică la cald, sunt conform tabelului 3.13 :

Tabel 3.13 Regimuri recomandare de DIN 17221

Temperatura de călire	830 - 860 °C
Mediul de răcire după călire	apă
Temperatura de revenire	350 - 550 °C
Mediul de răcire după revenire	aer
Temperatura de deformare plastică	920 - 830 °C
Limita de elasticitate	$\geq 1175 \text{ N/mm}^2$
Rezistența la tracțiune	1370 - 1620 $\text{N/mm}^2$
Alungirea	$\geq 6\%$
Reziliența	$\geq 21 \text{ J}$
Duritatea pe proba Jominy	57 - 65 HRC

Ca măsură pentru îmbunătățirea operației de control a barelor este verificarea riguroasă a calității suprafețelor barelor, deoarece orice riz sau imperfecțiune poate constitui o amorsă de fisură.

### 3.3.2. Tehnologia de înfășurare

După încălzirea în cuptorul cu inducție SODALGO și înfășurarea pe dorn, este prevăzută operația de „ajustare la cald” pentru care, în planele de operații, se prevede „ajustarea capetelor pe dorn și corectarea eventualelor neconformități ale pasului”.

Pentru a se determina neuniformitatea pasului au fost efectuate măsurători ale distanței dintre spire pe un arc  $\varnothing 24,4$  (figura 3.15)

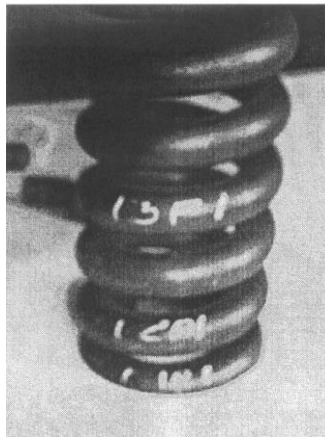


Fig. 3.15. Arc probă

Valorile distanțelor dintre spire, pe 4 generatoare situate la distanțe egale, sunt cuprinse în tabelul 3.14 :

Tabel 3.14. Distanța dintre spirele active ale arcului

Direcția	Distanța dintre spire [ mm ]				
1	11,6	11,5	11,6	12,5	12,3
2	12,8	11,2	11,0	12,1	12,2
3	12,9	11,3	11,5	12,2	12,6
4	12,1	11,9	11,3	12,0	12,8

Există posibilitatea apariției în procesul tehnologic de urme de lovire pe suprafața exterioară, provenite de la loviturile de ciocan aplicate pentru formarea

spirei de capăt. Aceste amprente pot constitui amorse de rupere la oboseală, mai ales atunci când sunt situate pe spirele active.

De asemenea arcurile pot avea imprimate pe fibra interioară a sârmei o urmă provenită de la dornul de rulare (figura 3.16).

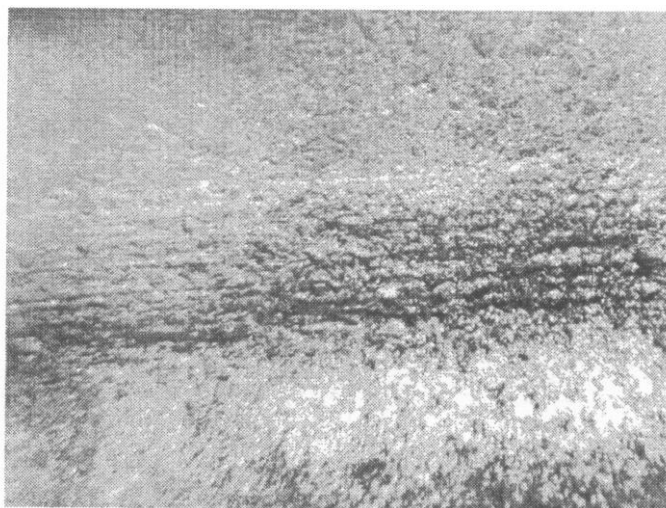


Fig. 3.16. Rizuri provocate de dornul de rulare

Suprafața pe care aceste urme acționează ca și concentratori este zona cea mai solicitată la comprimarea arcului.

Temperatura de început de deformare este stabilită la 920 °C prin reglarea instalației de încălzire prin inducție, dar în tehnologie nu se prevede în mod explicit temperatura de sfârșit de deformare pentru operația de înfășurat și, mai ales, pentru cea de ajustare și corectare manuală [9].

Urmărindu-se modul de realizare a operației de înfășurat și ajustat la cald și corelând aceste observații cu măsurătorile efectuate, pentru tehnologia actuală, se desprind următoarele observații :

- tehnologia de înfășurare nu asigură un pas constant și mașina utilizată nu asigură închiderea completă a spirelor de capăt, ulterior fiind necesară o ajustare manuală prin lovire cu ciocanul, pe dorn de ajustat ;
- temperatura de sfârșit de deformare nu este controlabilă ;
- operația de formare și ajustare manuală trebuie optimizată pentru a nu produce amprentări periculoase, iar durata ei trebuie redusă pentru a evita scăderea temperaturii sub limita admisă ;
- prin operația de ajustare a spirelor de capăt trebuie să se obțină un pas care să permită, în timpul exploatarei, un contact suficient între spira de capăt și prima spirală activă.

Pe baza analizelor și încercărilor se poate concluziona că procesul de deformare la cald (înfășurare) în varianta actuală, are încă rezerve de îmbunătățire și poate contribui la creșterea calității arcurilor analizate (în special la creșterea rezistenței la oboseală), prin următoarele căi :

- creșterea preciziei de înfășurare, care poate conduce la eforturi mai uniforme în spirele arcului și la evitarea contactului punctiform care poate genera amorse la rupere;

- respectarea temperaturii minime de sfârșit de deformare (830 °C) pentru a se evita neuniformitățile structurale și apariția de fisuri;
- utilizarea unor scule și dispozitive (dorn de înfășurat, dorn de ajustat, masă de ajustat) fără defecte care ar putea să se imprime pe suprafața spirelor.
- controlul structurii și proprietăților nu numai pe probe martor ci și pe arcuri, pentru a se evidenția influența procesului de deformare asupra modificărilor structurale.

Modul în care structura oțelului poate fi afectată în urma încălzirii pentru deformare plastică reiese din figura 3.17 , în care se prezintă microstructurile obținute după încălzirea oțelului prin inducție, în condiții de laborator.

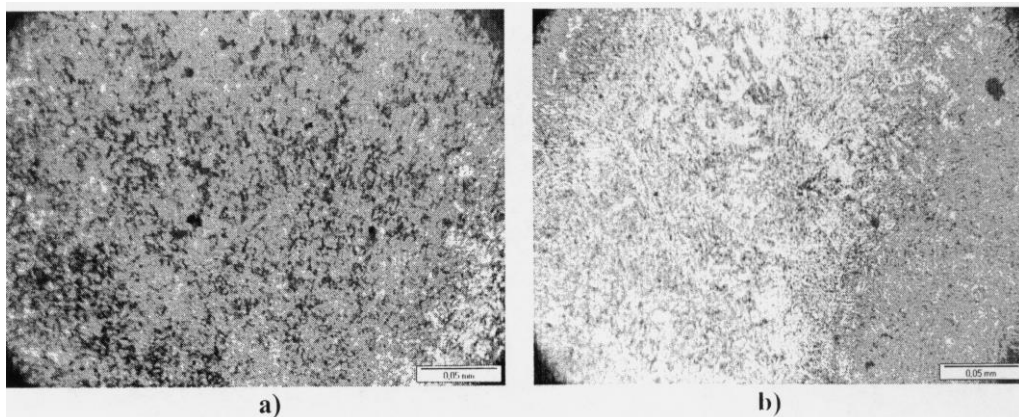


Fig. 3.17 Microstructuri realizate după încălzirea prin inducție a oțelului 50CrV4  
 a)  $T_{inc} = 900 \text{ }^{\circ}\text{C}$   
 b)  $T_{inc} = 1200 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Pe măsura creșterii temperaturii de încălzire pentru deformarea plastică, structura devine mai grosolană, apărând ferita aciculară, care reduce mult proprietățile mecanice ale oțelului.

Refacerea structurii se poate realiza prin aplicarea unui tratament termic de normalizare (figura 3.18) în urma căruia se obține o structură apropiată de cea inițială (figura 3.19).

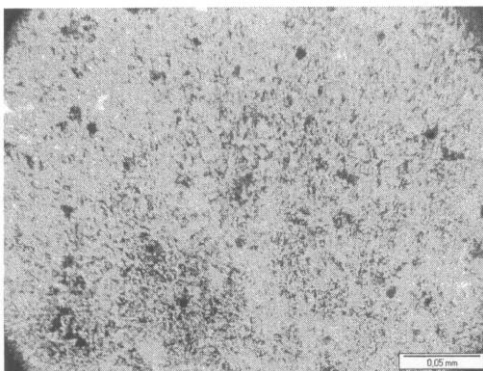


Fig. 3.18 Microstructură de normalizare

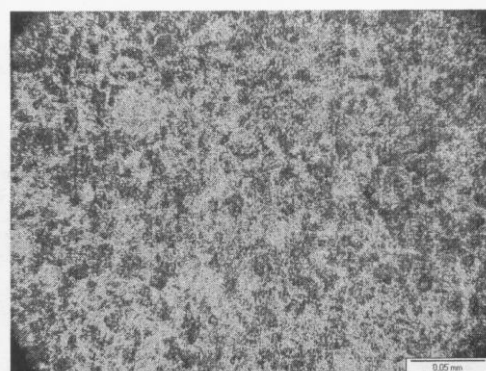


fig. 3.19 Microstructura în stare de livrare



### 3.3.3. Prelucrarea mecanică a suprafețelor de așezare

Suprafețele de așezare ale arcurilor, conform tehnologiei, se obțin prin strunjire în două etape :

- strunjire de degroșare ( eboș ) după înfășurarea arcului ;
- strunjire de finisare, după tratamentul termic ;

Din punct de vedere al rezistenței la oboseală a arcului consider ca fiind importante următoarele aspecte legate de prelucrarea mecanică :

- modul de prindere a arcului (în universal) contribuie la obținerea unor abateri mari de la paralelism și de la perpendicularitate, abateri care provoacă tensiuni de valori mari în anumite porțiuni ale arcului ;
- ca urmare a deformării spirei sub acțiunea forței de așchiere, suprafața rezultată are o rugozitate mare și abateri mari de la planeitate ;
- grosimea spirei în zona de capăt poate rezulta la valori mai mici decât cea impusă ;
- deformarea spirei în timpul strunjirii produce tensiuni mari în spirală, existând riscul de amorsare a unor fisuri.

Ca măsură de îmbunătățire a prelucrării mecanice a suprafețelor de așezare și pentru evitarea dezavantajelor tehnologiei actuale, s-a proiectat un dispozitiv care permite păstrarea invariantă în spațiu a axei de simetrie AS a arcului, precum și a planului frontal PF (figura 3.20). Aceste elemente geometrice pot fi menținute invariante în spațiu, indiferent de abaterile geometrice ale arcului obținut în urma înfășurării prin utilizarea unui dorn de centrare cu elementele deplasabile. Din multitudinea de variante posibile a fost selectată varianta dornului cu pene deplasabile axial. Această variantă este prezentată în figura 3.21.

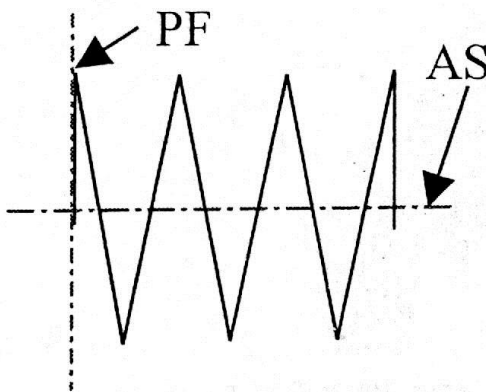


Figura 3.20 Dispozitiv fixare arc

În corpul CD al dornului sunt practicate 4 canale de pană dispuse echidistant pe circumferința dornului. În aceste canale pot fi deplasate axial penelile P (figura 3.18) prin intermediul șurubului S. Datorită deplasării axiale a penelilor acestea vor face să crească diametrul dornului, astfel se va ajunge în contact cu diametrul interior al arcului de prelucrat. Prin strângerea în continuare a șurubului se vor crea forțe normale de strângere  $S_1$  generatoare a unui moment de frecare  $M_f$ , care trebuie să învingă momentul  $M_a$  datorat forțelor de așchiere (figura 3.22).

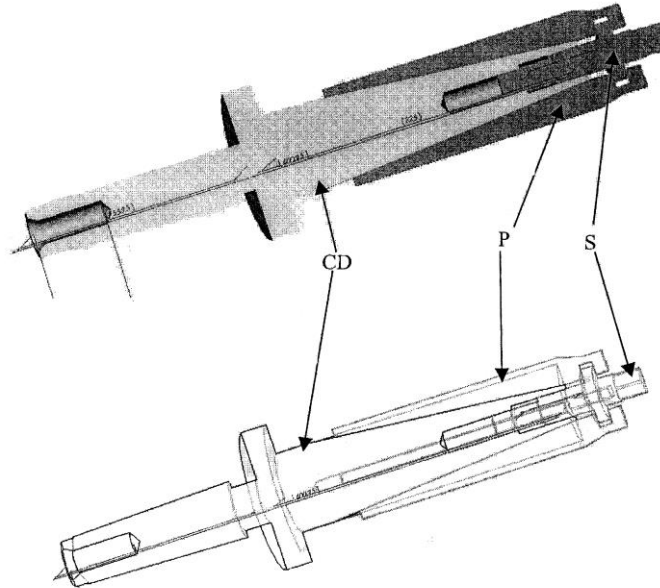


Fig. 3.21 Dorn cu pene deplasabile axial

Forța de așchiere principală se poate estima cu relația:

$$F_y = C_4 t^{x_1} \cdot s^{y_1} \cdot HB^{n_1} \quad [\text{daN}] \quad (3.3)$$

Considerând parametri regimului de așchiere:  $t = 3 \text{ mm}$ ,  $s = 0,2 \text{ mm/rot}$  și  $v = 200 \text{ m/min}$ , precum și duritatea materialului de prelucrat  $HB = 200$ , se determină :

$$F_y = 3,57 \cdot 3 \cdot 0,2^{0,75} \cdot 200^{0,75} = 170,34 \text{ [daN]} \cong 171 \text{ [daN]}$$

Această forță de așchiere va genera un moment de așchiere:

$$M_a = F_y \cdot r = 171 \cdot 33 = 5643 \text{ [daN}\cdot\text{mm]} \quad (3.4)$$

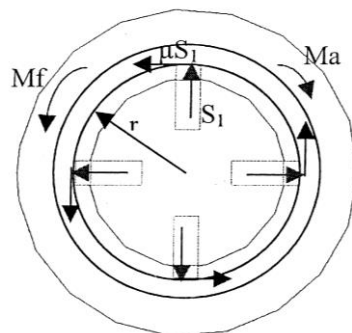


Fig. 3.22 Momentele de așchiere

Momentul de frecare necesar pentru a învinge momentul activ trebuie să fie:

$$M_f = 2 \cdot M_a = 11286 \text{ [daN}\cdot\text{mm]} \quad (3.5)$$

Acest moment de frecare este creat de cele patru pene ale dornului care dezvoltă forțele radiale  $S_1$  pe fiecare pană. Această forță radială de strângere trebuie să fie:

$$S_1 = \frac{M_f}{4\mu r} = \frac{11286}{4 \cdot 0.1 \cdot 33} = 8555 \text{ [daN]} \quad (3.6)$$

Pentru a crea această forță radială pana trebuie să fie împinsă axial cu forța  $F_1$  (figura 3.23).

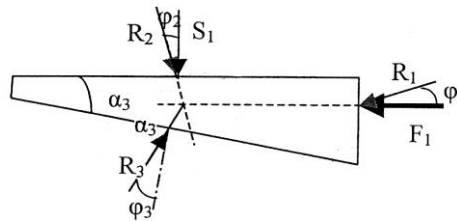


Fig. 3.23 Pana dispozitivului

Raportul de transmitere al forțelor la pană este:

$$i_s = \frac{R_2}{R_1} \approx \frac{S_1}{F_1} = \frac{\cos \varphi_1}{\sin(\varphi_2 + \alpha_3 + \varphi_3)} = \frac{\cos 6}{\sin(6 + 5 + 6)} = 3.4 \quad (3.7)$$

$$F_1 = \frac{S_1}{i_s} = \frac{855}{3.4} = 251.5 \text{ [daN]} \quad (3.8)$$

Șurubul S va fi solicitat la patru asemenea forțe axiale  $F_1$ , deci la o forță totală:

$$F = 4 \cdot F_1 = 4 \cdot 252,5 = 1006 \text{ [daN]} \quad (3.9)$$

Această forță este pe deplin realizată de șurubul M18 care a fost prevăzut.

Operatorul care deservește acest dorn de centrare trebuie să strângă puternic șurubul S pentru ca momentul de așchiere să nu învingă momentul de frecare creat de dorn. În cazul când se observă o tendință de rotire a arcului pe dorn, se va micșora regimul de așchiere utilizat. În prima fază se va căuta micșorarea avansului  $s$  de lucru, iar dacă încă se observă tendința de rotire a arcului, se va prelucra cu o adâncime de așchiere  $t$  mai mică.

O măsură de îmbunătățire a prelucrării mecanice a suprafețelor de așezare este schimbarea tehnologiei, aceasta să se realizeze printr-o operație de polizare,



respectiv utilarea cu un polizor specializat, cu răcire cu apă. Astfel prelucrarea capetelor se poate realiza dintr-o singură operație (fără finisarea actuală) și o productivitate ridicată.

### 3.3.4. Tratamentul termic volumic

Tehnologia actuală indică un tratament termic final al arcurilor constând dintr-o călire în ulei urmată de o revenire medie.

Parametrii tehnologici pentru cele două operații de tratament termic sunt în concordanță cu natura materialului și cu dimensiunile arcurilor.

După cum se observă din diagramele înregistrate ale tratamentului termic de călire și revenire, efectuat pe linia discontinuă de tratament termic în atmosferă controlată (figurile 3.24; 3.25 și 3.26), s-au respectat parametrii tehnologiei actuale.

Conform planului de operații, temperaturile exacte de încălzire atât la călire cât și la revenire „se stabilesc la începutul fabricației și pentru fiecare șarjă”. În aceste condiții nu se pot face aprecieri asupra nivelului real al temperaturilor de încălzire.

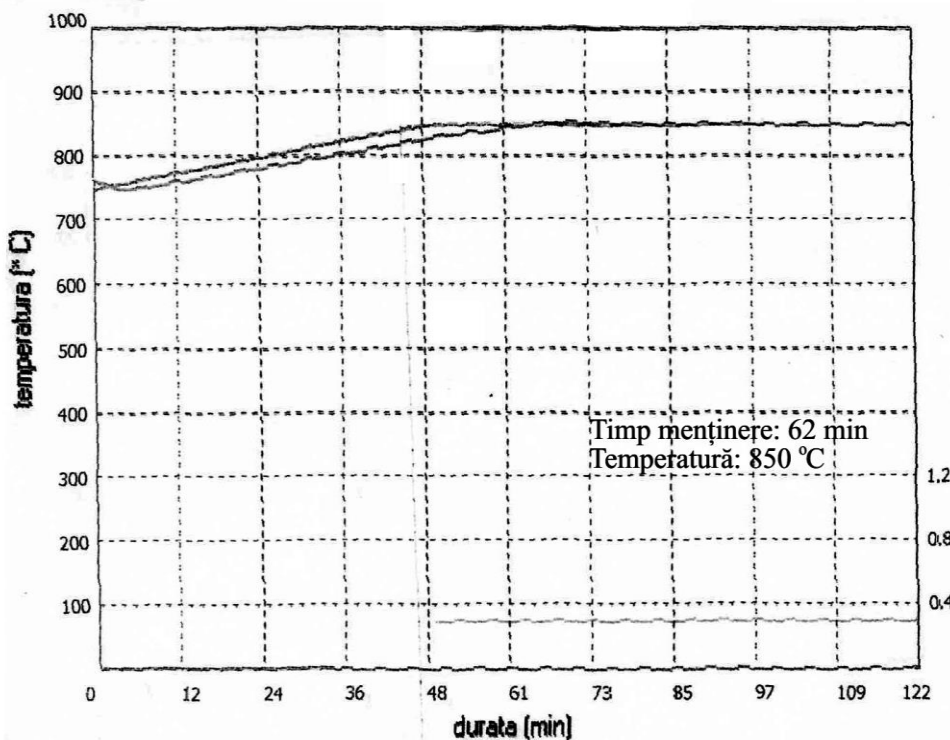


Diagrama de călire - arc φ31

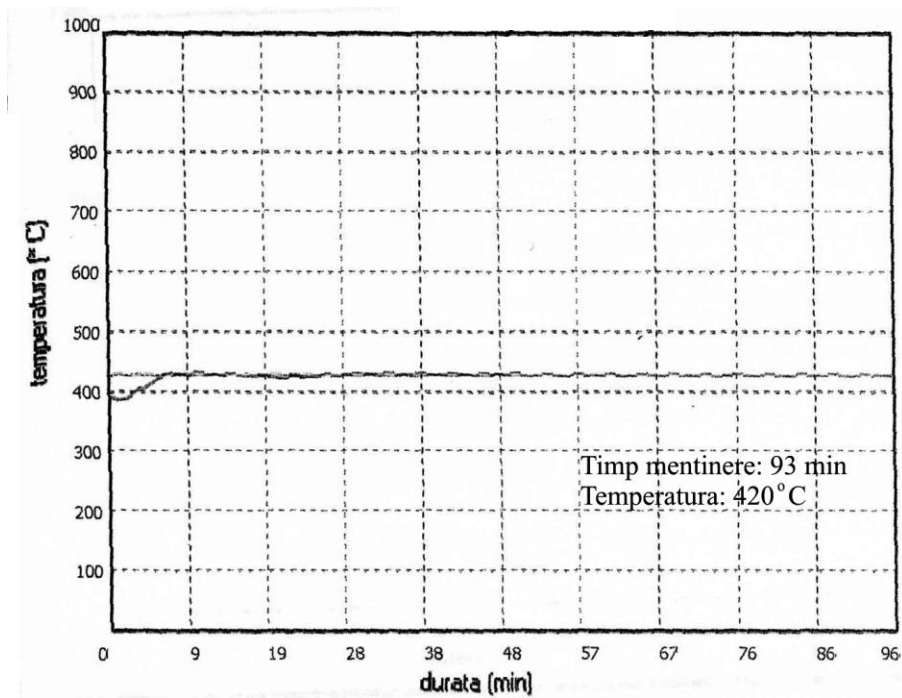


Diagrama de revenire – arc  $\phi 31$   
 Fig 3.24.

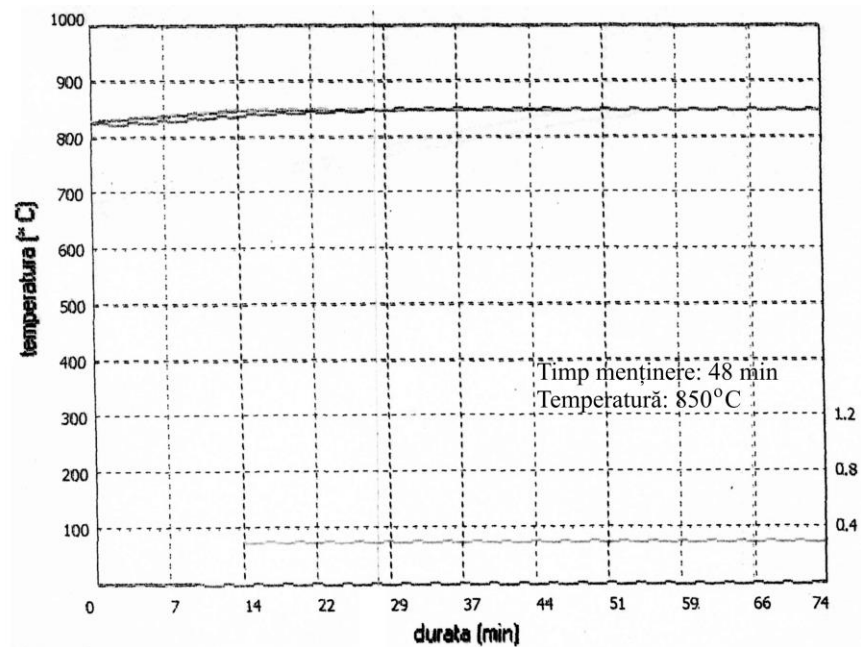


Diagrama de călire – arc  $\phi 24,4$

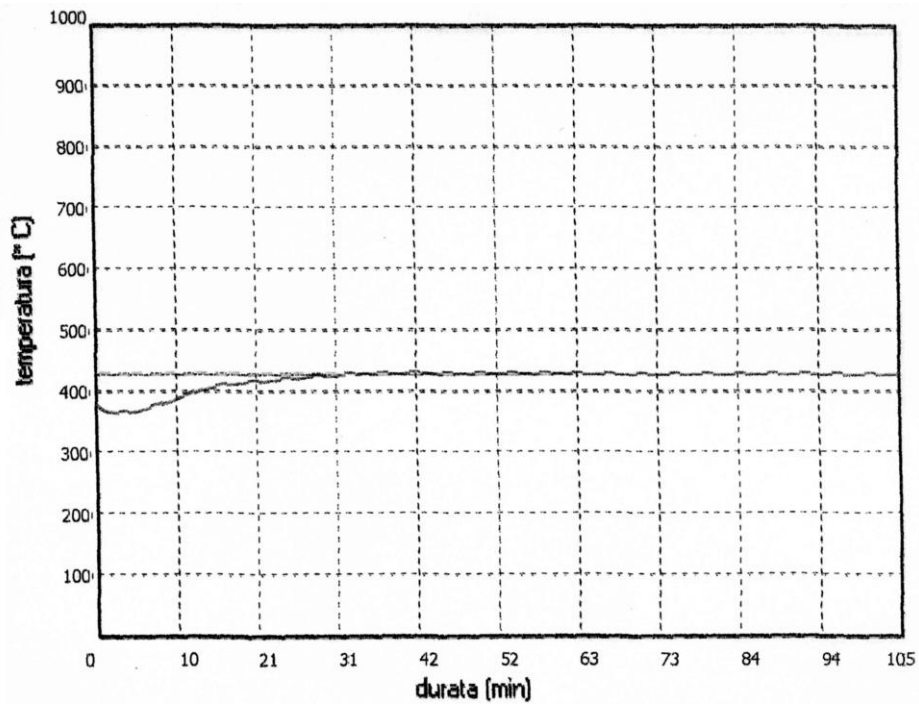


Diagrama de revenire - arc  $\phi 24,4$   
Fig. 3.25.

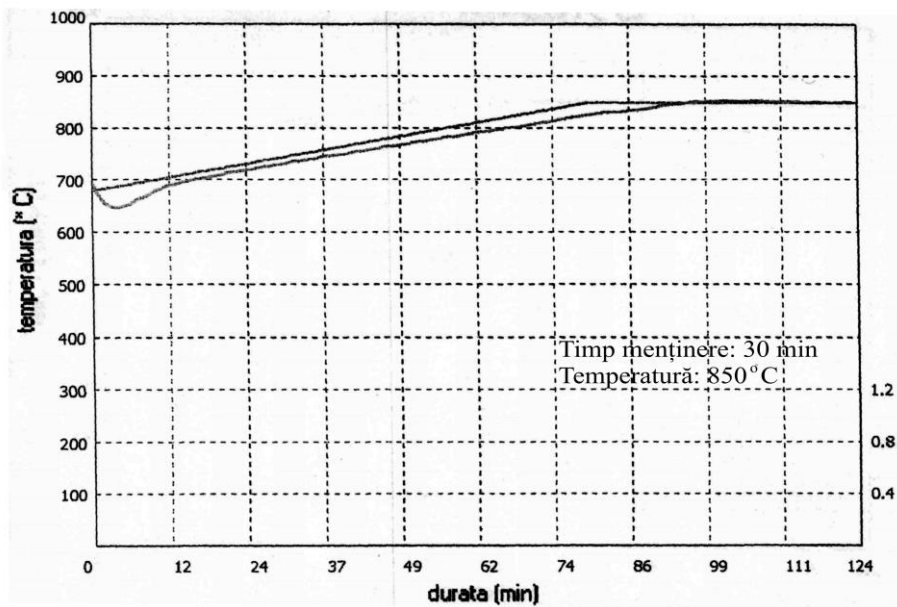


Diagrama de călire - arc  $\phi 15$

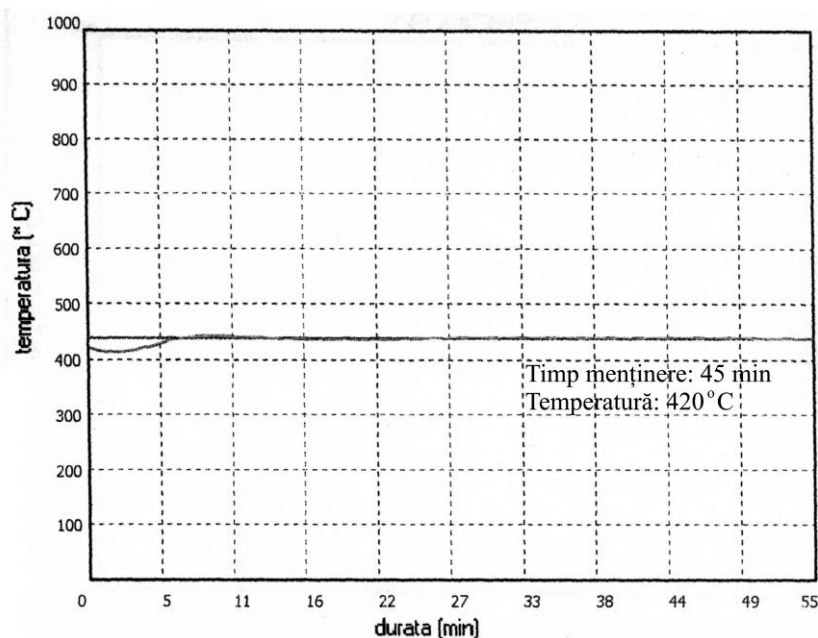


Diagrama de revenire – arc  $\phi 15$   
Fig.3.26.

### 3.3.5. Ecruisarea

Tehnologia de fabricație a arcurilor prevede aplicarea unei operații de ecruisare cu bile din oțel, într-o instalație „SIESSON-LEHMANN”(figura 3.7). Controlul procesului se recomandă să fie făcut vizual și cu epruveta ALMEN, în conformitate cu norma UIC 822.O.

Analiza efectuată a relevat următoarele aspecte :

- proba ALMEN nu poate indica eficacitatea procesului de ecruisare decât dacă este utilizată în condiții riguros determinate;
- în timpul operației nu sunt urmăriți toți factorii tehnologici care pot influența calitatea ecruisării : dimensiunea bilelor, starea acestora, viteza de aruncare.
- dispozitivul de susținere și de deplasare a arcurilor nu poate permite o ecruisare uniformă a tuturor spirelor.

## 3.4. Verificări ale arcurilor executate conform tehnologiei actuale

### 3.4.1. Materiale

Rezultatele determinărilor de compoziție chimică și de caracteristici mecanice efectuate pe probele din barele utilizate la execuția loturilor de 10 arcuri, indică încadrarea în limitele impuse, pentru toate elementele analizate (tabelele 3.4, 3.5 și 3.6).

De asemenea analiza metalografică a constatat că materialul în stare de livrare corespunde cerințelor (figura 3.27).

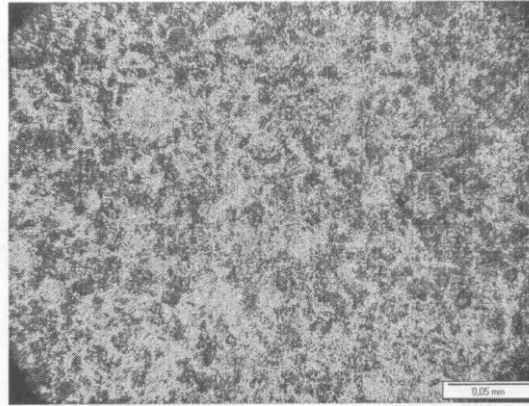


Fig. 3.27 Structura în starea de livrare

Diametrul inițial al barelor s-a încadrat în toleranțele prescrise.

Pentru starea suprafeței barei nu au fost efectuate măsurători ale rugozității, dar se poate aprecia că rugozitatea existentă nu provoacă scăderea rezistenței la oboseală din moment ce toate barele au corespuns la încercările cu ultrasunete și cu raze x.

Pe baza acestor măsurători se poate aprecia că materialul utilizat la execuția arcurilor corespunde din punct de vedere dimensional, al compoziției chimice și al proprietăților mecanice.

### 3.4.2. Studiu asupra tratamentului termic al arcurilor

Arcurile (4 bucăți din fiecare tip) s-au verificat dimensional. Rezultatele verificărilor sunt în „Fișa de măsurători” (tabelul 3.19).

De asemenea arcurile au fost verificate în regim static (înălțimea sub sarcină și flexibilitate).

Din diagramele înregistrate la mașina ANDILOG, se observă că ele corespund documentației de execuție și fișei UIC 822.

#### - Analiza tratamentului termic al arcurilor

Tehnologia actuală indică un tratament termic final al arcurilor constând din călire urmată de revenire medie.

Parametrii tehnologici pentru cele două operații de tratament termic i-am stabilit în concordanță cu natura materialului și cu dimensiunile arcului :

- arcul Ø31 mm
  - călire 830-860 °C / 62 minute / ulei
  - revenire 350-550 °C / 93 minute / aer



- arcul Ø24,4 mm
  - călire 830-860 °C / 48 minute / ulei
  - revenire 350-550 °C / 73 minute / aer
  
- arcul Ø15 mm
  - călire 830-860 °C / 30 minute / ulei
  - revenire 350-550 °C / 45 minute / aer

Analiza condițiilor concrete de tratament termic a evidențiat următoarele aspecte :

- temperatura cuptorului de călire este reglată la 850 °C, ceea ce conduce la o temperatură a pieselor situată în intervalul de încălzire recomandat;
- temperatura de revenire este stabilită la 420 °C;
- modul în care dispozitivul de încălzire (coșul cu arcuri) este transportat până la bazinul de răcire, necesită un timp relativ ridicat, care conduce la scăderea temperaturii arcurilor până sub limita admisă. Această scădere a temperaturii a putut fi constatată pe analizele metalografice efectuate în laborator unde, pe probele analizate, apare o structură tipică în benzi, care este un indiciu sigur pentru o temperatură de călire situată sub  $Ac_3$  (călire incompletă), vezi figura 3.28.

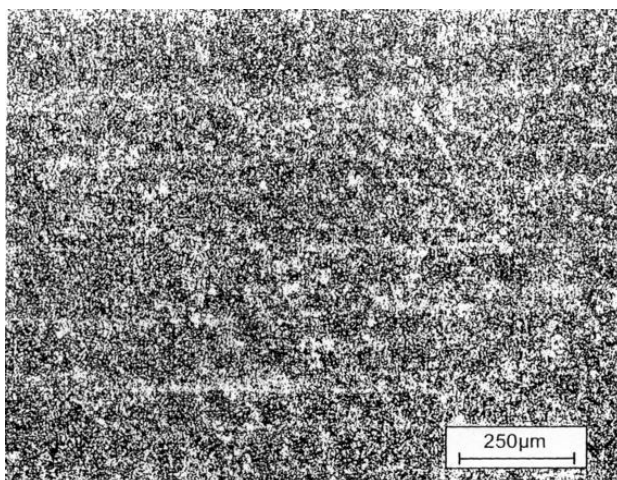


Fig. 3.28. Structură în benzi

- *Testarea durității arcurilor*

Din zona spirelor active ale arcurilor s-au extras, de la fiecare arc elicoidal, o macroprobă metalografică transversală, lustruită, înaltă de 10...12 mm. Din aceste macroprobe s-a determinat, într-o serie de măsurători cu câte trei amprente de duritate (poziția 1-3), distribuția durității Brinell peste secțiunea transversală, conform DIN EN ISO 6506-1 [78]. Amprenta Rockwell s-a aflat în poziția 1 cu cca. 2 mm sub suprafața arcului. Amprenta din poziția 3 s-a aflat de fiecare dată în mijlocul secțiunii transversale, iar amprenta 2 central între amprentele de duritate 1 și 3. La testarea durității s-au determinat valorile din tabelul 3.15.

Tabel 3.15 Valori ale durtății măsurată pe arcurile de probă

Poziția	Durtatea HRC		
	arc Ø 31 mm	arc Ø 24,4 mm	arc Ø 15 mm
1	46,4	47,9	46,9
2	47,2	47,3	48,8
3	45,6	46,1	46,2
valoarea medie	46,4	46,8	47,3
valori prescrise	45 - 50	45 - 50	47 - 50

Concluziile testării durtății pe arcuri: valorile de duritate corespund valorilor impuse, însă bara arcului nu este îmbunătățită până în miez. Se observă că duritatea din poziția 3 (în miezul arcului) este mai mică față de cea din poziția 1 și 2, dar corespunde valorii minime prescrise.

- Verificări metalografice

Din poziția de extragere a probelor pentru testarea durtății s-au extras, pentru fiecare tip de arc, o probă care s-a verificat metalografic.

- arcul Ø31 mm:

În figura 3.29, macroprobă necorodată, se poate recunoaște o microcrestătură (microfisură) aflată la suprafață. Structura de margine este decarburată nesemnificativ, după cum se poate observa în figura 3.30. Se pot vedea deasemenea și deformările produse de ecruisarea cu bile din oțel.

Figurile 3.31 și 3.32 prezintă o microstructură de îmbunătățire cu granulație fină, a arcului, la diferite mărimi.

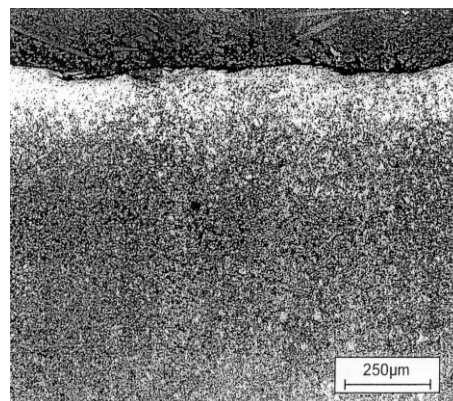
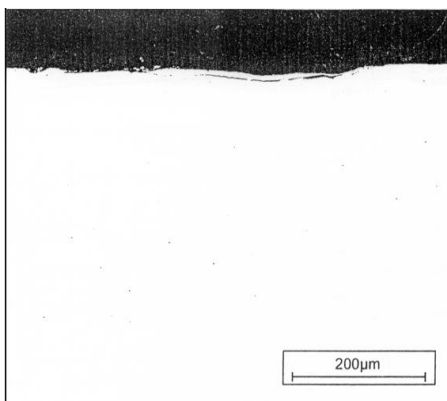


Fig. 3.29.

Fig. 3.30.

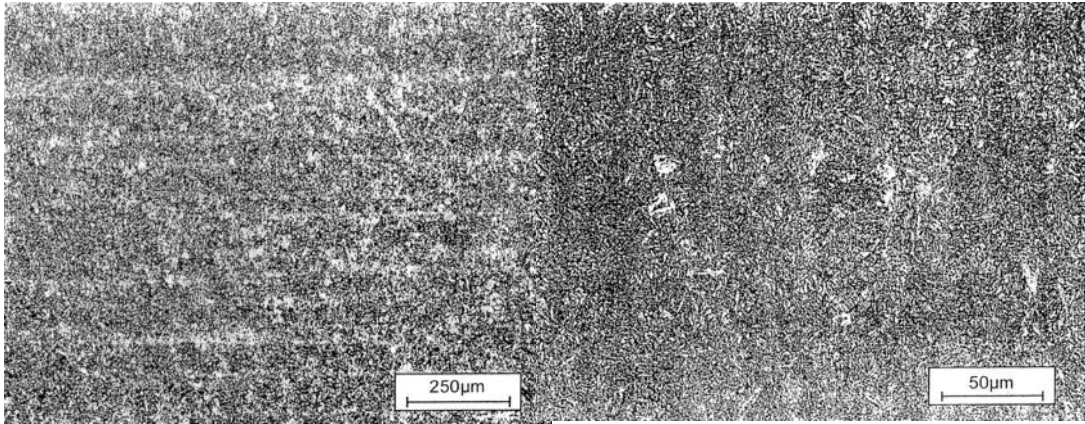


Fig. 3.31.

Fig. 3.32.

- arcul Ø24,4 mm

Suprafața arcului este deasemenea decarburată la margine. Deformarea puternică de la suprafață, datorată ecruisării, a condus în unele locuri la formarea creștăturilor (microfisurilor). Paralel, la suprafață se pot recunoaște separări de material în formă de microcreștături (fig. 3.33 și 3.34).

Din nou există structură de îmbunătățire cu o granulație fină.

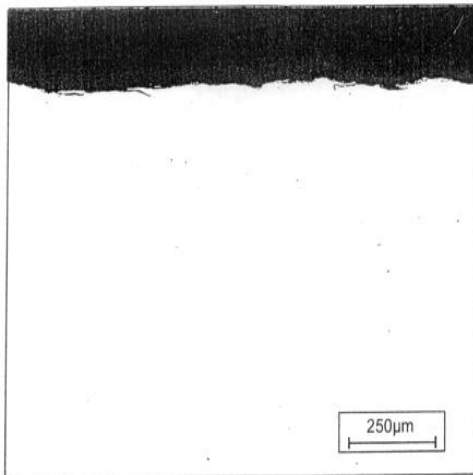


Fig. 3.33.

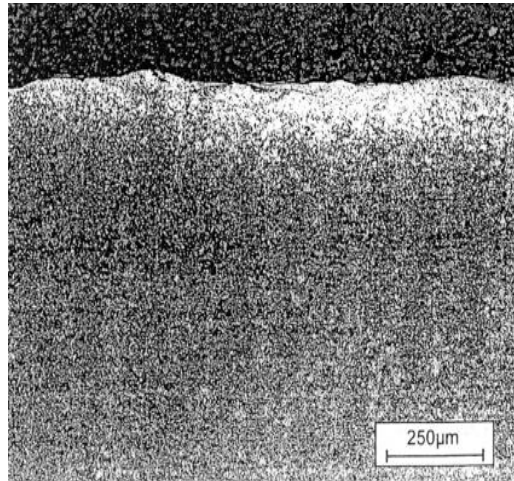


Fig. 3.34.

- arcul Ø15 mm

Figura 3.35 pune în evidență o microstructură de îmbunătățire cu granulație fină care este decarburată la margine și prezintă deformări.



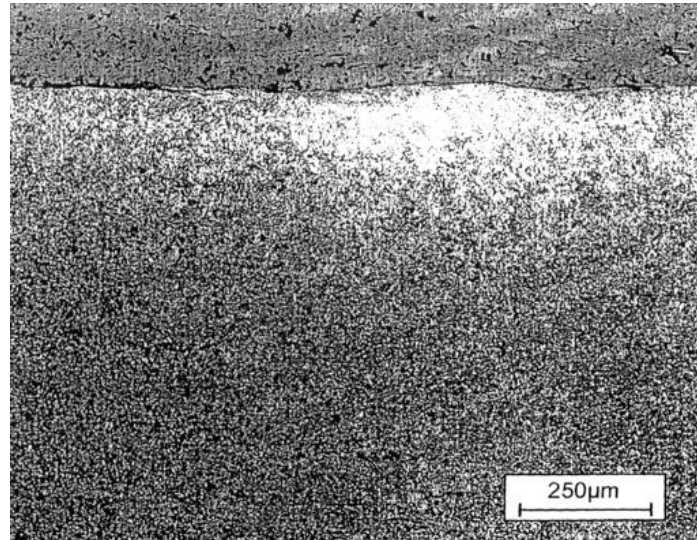


Fig. 3.35.

Adâncimea decarburării la margine, existentă la toate arcurile, se află sub valorile maxim admise de DIN 17221.

Aceste valori sunt determinate conform formulei :

$$\text{adâncimea de decarburare admisă} = 0,015 \times d \quad (3.11)$$

unde:  $d$  = diametrul barei arcului.

- pentru arcul  $\varnothing 31$  mm  $\rightarrow$  0,465 mm
- pentru arcul  $\varnothing 24,4$  mm  $\rightarrow$  0,360 mm
- pentru arcul  $\varnothing 15$  mm  $\rightarrow$  0,255 mm

### 3.5.Concluzii

Tehnologia actuală de înfășurare nu asigură un pas constant al arcului, ulterior fiind necesară o operație manuală de închidere pe dorn de ajustat a spirelor de capăt și o ajustare a pasului .

Operația de înfășurare, în varianta actuală, are încă rezerve de îmbunătățire, fiind necesară o mașină de înfășurat care să închidă automat spirele de capăt, excluzând o ulterioară corecție manuală.

De asemenea, transportul coșului cu arcuri cu „manipulatorul” de la cuptorul de încălzire pentru călire până în bazinul cu ulei pentru răcire, necesită un timp relativ mare, care conduce la scăderea temperaturii arcurilor până sub limita admisă.

Pentru evitarea acestor neconformități, tratamentul termic de călire al arcurilor este recomandat să se facă în cuptoare cu bazine de răcire integrate, evitându-se astfel scăderea temperaturii prin transportarea lor și un control mai precis al temperaturii de călire.

Verificarea ecruisării se face cu o singură probă Almen. Proba ALMEN nu poate indica eficacitatea procesului de ecruisare decât dacă este utilizată în condiții riguros determinate.

Prelucrarea mecanică a suprafețelor de așezare, conform tehnologiei actuale, prin modul de prindere a arcului (în „universal”), contribuie la obținerea unor abateri mari de la paralelism și perpendicularitate, abateri care provoacă tensiuni mari în anumite zone ale arcului.

O măsură de îmbunătățire a prelucrării mecanice a suprafețelor de așezare este schimbarea tehnologiei, aceasta să se realizeze printr-o operație de polizare, respectiv utilizarea cu un polizor specializat, cu răcire cu apă. Astfel prelucrarea capetelor se poate realiza dintr-o singură operație (fără finisarea actuală) și o productivitate ridicată.

Din punct de vedere al rezistenței la oboseală a arcului consider ca fiind importante următoarele aspecte legate de prelucrarea mecanică :

- modul de prindere a arcului (în universal) contribuie la obținerea unor abateri mari de la paralelism și de la perpendicularitate, abateri care provoacă tensiuni de valori mari în anumite porțiuni ale arcului ;
- ca urmare a deformării spirei sub acțiunea forței de așchiere, suprafața rezultată are o rugozitate mare și abateri mari de la planeitate ;
- grosimea spirei în zona de capăt poate rezulta la valori mai mici decât cea impusă ;
- deformarea spirei în timpul strunjirii produce tensiuni mari în spirală, existând riscul de amorsare a unor fisuri.

Pentru îmbunătățirea acestei operații am calculat și proiectat un dispozitiv (dorn) nou care permite păstrarea invariantă în spațiu a axei de simetrie AS a arcului, precum și planul frontal PF (figura 3.20 și 3.21).

Pe baza analizelor și încercărilor se poate concluziona că procesul de deformare la cald (înfășurare) în varianta actuală, are încă rezerve de îmbunătățire și poate contribui la creșterea calității arcurilor analizate (în special la creșterea rezistenței la oboseală), prin următoarele căi :

- creșterea preciziei de înfășurare, care poate conduce la eforturi mai uniforme în spirele arcului și la evitarea contactului punctiform care poate genera amorse la rupere;
- respectarea temperaturii minime de sfârșit de deformare (830 °C) pentru a se evita neuniformitățile structurale și apariția de fisuri;
- utilizarea unor scule și dispozitive (dorn de înfășurat, dorn de ajustat, masă de ajustat) fără defecte care ar putea să se imprime pe suprafața spirelor.
- controlul structurii și proprietăților nu numai pe probe martor ci și pe arcuri, pentru a se evidenția influența procesului de deformare asupra modificărilor structurale.

Pe măsura creșterii temperaturii de încălzire pentru deformarea plastică, structura devine mai grosolană, apărând ferita aciculară, care reduce mult proprietățile mecanice ale oțelului.

Refacerea structurii se poate realiza prin aplicarea unui tratament termic de normalizare în urma căruia se obține o structură apropiată de cea inițială.

Tabel 3.16		SECȚIA		PLAN DE OPERAȚII ȘI CONTROL PENTRU ARCURI ELICOIDALE		Denumire reper <b>ARC EXTERIOR Ø31</b>		Rev. 1 2 3 4 <b>DESEN</b>				Pag. 1/4
Concept	Data	Nume	Semn.	Valabil și pentru:		Nr. total spire	( 5,7 )					
Verificat				Reper	Desen	Sens înfășurare	stânga					
Aprobat						Rigiditatea R	50,12 <sup>+0,01</sup> daN/mm					
Data						Flexibilitatea F <sub>flex</sub>	20,08 <sup>+1,61</sup> mm/10 <sup>3</sup> daN					
Modificări						Cond. tehnice de execuție	UIC 822.0 cat. 2					
<b>MATERIAL</b>												
Diam	Lung. de aprov.	Calitate	Starea suprafeței	Greutatea netă	Consum tehnologic	Consum de aproviz.	Abateri conform DIN 2096					
Ø31	2950 <sup>+20</sup>	50C-V4 DIN 17221	Cojit - șlefuită	16,17 kg.	17,48 kg.	17,60 kg.						
Nr. op.	Denumirea operației	Cod secție	Cod utilaj	S.D.V.	Prescripții tehnologice							Observații
1	2	3	4	5	6	7						
5	Control material				Verifică calitatea materialului pe lot și șarjă, să corespundă conform DIN 17221 și UIC 822.O.							
10	Debitat				Lungimea de debitare L <sub>d</sub> = 2950 <sup>+5</sup> mm.							
15	Rotunjit capete				Capetele se rotunjesc prin strunjire cu o rază R ≈ 15 mm; Lungimea barei după strunjire L <sub>s</sub> = 2935 <sup>+2</sup> mm.							
20	Control , 10%				Verifică lungimea de strunjire L <sub>s</sub> = 2935 <sup>+2</sup> mm, cu metrul.		Dacă o singură bară nu coresp. la lungime, lotul se verifică 100 %.					
25	Infășurat la cald				<ul style="list-style-type: none"> <li>- dom de înfășurare : Ø 132 mm;</li> <li>- sens înfășurare : stânga;</li> <li>- înălțimea de înfășurare : H = ( 315 ) mm;</li> <li>- numărul total de spire : ( 5,7 )</li> <li>- temperatura de încălzire pt. înfășurare: 920-830 °C.</li> </ul>		Înălțimea de înfășurare se stabilește la execuția primelor 5 arcuri.					

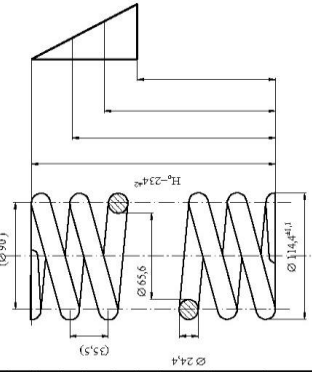
1	2	3	4	5	6	7
30	Ajustat la cald				Se ajustează capetele arcurilor pe dom și se corectează eventualele neuniformități ale pasului. Caracteristicile geometrice ale arcului trebuie să fie cele de la operația 25.	
35	Strunjit eboș				- înălțimea liberă după eboșare $H_0 = (275) \text{ mm}$ ; - grosimea capătului de spiră $\approx 10 \text{ mm}$ .	
40	Tratament termic (călit + revenit)				<p>- viteza de încălzire : max. <math>150 \text{ }^\circ\text{C}/\text{h}</math>; - numărul de arcuri în containerul de T. T. = 21 bucăți.</p>	<p>Temperaturile de călire și revenire se stabilesc la începutul fabricației și pt. fiecare șarjă.</p> <p>Tratamentul termic se poate repeta o singură dată.</p> <p>În cazul în care verificarea durtății se face pe proba marlor, aceasta se tratează odată cu arcurile.</p>
45	Control, prin sondaj				Se verifică parametrii tratamentului termic și certifică prin semnătură pe diagrama înregistrată.	Diagramele înregistrate se păstrează la dosar.
50	Polizat				Arcurile se polizează pentru verificarea durtății pe spira inactivă.	
55	Control duritate Proporția venf. cf. pct. 4.222 din UIC 822.O				Se verifică duritatea $\text{HRC} = 45^{+5}$ Se poate verifica și $\text{HB} = 424 - 488$	Verificarea durtății se poate face și pe probă marlor.
60	Proba 1; 100%				- se comprimă arcul de 3 ori cu $P = 4900 \text{ daN}$ ; - se verifică $H_1 = 242 \text{ mm}$ la $P_1 = 880 \text{ daN}$ ; - se determină $H_f$ pentru operația de finisat; - înălțimea după probă = $(265) \text{ mm}$ .	
65	Strunjit finisat				- înălțimea liberă după finisare $H_f = (260) \text{ mm}$ ; - abaterea maximă la paralelism = $4,85 \text{ mm}$ ; - abaterea maximă la perpendicularitate = $7,8 \text{ mm}$ ; - grosimea capătului de spiră $\approx 7,5 \text{ mm}$ .	
70	Proba 2; 100%				- se verifică $H_1 = 242^{+1/3} \text{ mm}$ la $P_1 = 880 \text{ daN}$ ; - dacă înălțimea $H_1$ este prea mare arcul se retrimite la operația 65; - înălțimea liberă $H_0 = (260) \text{ mm}$ .	

1	2	3	4	5	6	7
75	Rotunjii muchii				Muchii ascuțite ale spirelor de reazem se rotunjesc prin polizare.	
80	Ecrusat				- se folosesc alice perfect sferice, cu granulația 100; - condiții tehnice de execuție conform fișei UIC 822.0, anexa A.	
85	Control				Se verifică eficacitatea ecrusării vizual și cu proba Almen. Acest control se efectuează la debutul ciclului de fabricație al arcurilor, cât și cu ocazia modificării unuia din parametrii ecrusării (ex. schimbarea alicelor)	Deformația epruvetei Almen 0,4 – 0,5 mm
90	Diagramat 100%				Înălțimea liberă: $H_0 = (260) \text{ mm}$ Arcul se verifică la: $P_1 = 880 \text{ daN}$ $\rightarrow$ $H_1 = 239 \pm 243 \text{ mm}$	
95	Marcat cu acid				Pe suprafața arcurilor se marchează ASTRA, ultimele 2 cifre ale anului de fabricație și nr. de ordine din registrul de probe. Marcajul se acoperă cu un strat de vaseilină.	
100	Verificare magnetoscopică				Se execută conform fișei UIC 822.0, anexa B. Arcurile cu defecte se rebutează.	100 %
105	Elasticitate de scurtă durată; Proporția verif. cf. pct.4.222 din UIC 822.0				Se aplică arcului o sarcină $0,1P = 490 \text{ daN}$ sub care se măsoară înălțimea sa. Arcul este apoi supus la 2 comprimări succesive, cuprinzând fiecare din operațiile următoare: - aplicarea progresivă urmată de menținerea pe o durată de 2 minute a sarcinii $P = 4900 \text{ daN}$ ; - elibertarea arcului; - măsurarea înălțimii sub sarcina $0,1P = 490 \text{ daN}$ ; Nu trebuie să se constate o diferență mai mare de $\pm 2,5\%$ între înălțimea arcului luat sub sarcina $0,1P = 490 \text{ daN}$ la prima comprimare și cea luată sub aceeași sarcină după a doua comprimare.	
110	Elasticitate de lungă durată; Proporția verif. cf. pct.4.222 din UIC 822.0				Elasticitatea de lungă durată se face la fel ca elasticitatea de scurtă durată, menținându-se a doua comprimare timp de 48 ore.	
115	Flexibilitate; Proporția verif. cf. pct. 4.222 din UIC 822.0				Flexibilitatea $F_{\text{lex}} = \frac{L_1 - L_2}{F_2 - F_1} = \dots\dots\dots = 20,08 \pm 1,61 \text{ mm}/10^3 \text{ daN}$ $\rightarrow$ unde $L_1$ și $L_2$ sunt înălțimile arcului luate sub sarcinile de flexibilitate: $F_1 = 1000 \text{ daN}$ și $F_2 = 2500 \text{ daN}$	Se poate determina și rigiditatea $R = 1/F_{\text{lex}} = 50,12 \pm 4,01 \text{ daN/mm}$
120	Montat inel de marcare				Arcurile se vor selecționa și marca în 2 grupe după înălțimea sub sarcina 880 daN: -grupa I: $239 \pm 241 \text{ mm}$ $\rightarrow$ fără inel de marcare; -grupa II: $241,1 \pm 243 \text{ mm}$ $\rightarrow$ cu un inel de marcare.	

1	2	3	4	5	6	7
125	Control final; 100%				<p>Se verifică:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>⇨ <math>H_0 = (260) \text{ mm}</math></li> <li>⇨ <math>D_f = 132^{+1,3} \text{ mm}</math></li> <li>⇨ Abaterile la <math>\perp = \text{max. } 7,8 \text{ mm}</math></li> <li>⇨ Abaterile la <math>// = \text{max. } 4,85 \text{ mm}</math></li> <li>⇨ Nr. total de spire = 5,7</li> <li>⇨ Sensul înfășurării: stânga</li> <li>⇨ Montarea inelului de marcare</li> </ul>	Toate defectele de aspect, caracteristici sau dimensiuni antrenează refuzul arcului respectiv.
130	Predat la recepționar				<p>Arcurile sunt prezentate grupate pe loturi. Fiecare lot nu cuprinde decât arcuri de același tip, confecționate din bare provenite din același șarjă și supuse la același tratament termic ( același parametrii de tratament termic).</p>	
135	Vopsire			Conform planului de operații și control pentru vopsire		



Tabel 3.17		SECTIA		PLAN DE OPERAȚII ȘI CONTROL PENTRU ARCURI ELICOIDALE				Denumire reper <b>ARC EXTERIOR Ø24,4</b>				Rev. 1 2 3 4 DESEN				Pag. 1/4	
Data		Nume		Semn.		Valabili și pentru :				Nr. total spire ( 7,4 )							
Concept						Reper		Desen		Semn.		Sens înfășurare dreapta					
Verificat												Rigiditatea R 81,29 <sup>+6,51</sup> daN/mm					
Aprobat												Flexibilitatea F <sub>flex</sub> 12,38 <sup>+0,99</sup> mm/10 <sup>3</sup> daN					
Data		Ce s-a modificat		Semn.								Cond tehnice de execuție UIC 822.0 categ. 2					
Modificări												Abateri conform DIN 2096					
<b>MATERIAL</b>																	
Diam	Lung.de aprov.	Calitate	Starea suprafeței	Greutatea netă	Consum tehnologic	Consum de aproviz.											
Ø24,4	2120 <sup>+20</sup>	50CrV4 DIN 17221	Cojit - șlefuită	7,33 kg.	7,78 kg.	7,86 kg.											
<b>Nr. op.</b>	<b>Denumirea operației</b>	<b>Cod secție</b>	<b>Cod utilaj</b>	<b>S.D.V.</b>	<b>Prescripții tehnologice</b>											<b>Observații</b>	
1	2	3	4	5	6											7	
5	Control material				Verifică calitatea materialului pe lot și șarjă, să corespundă conform DIN 17221 și UIC 822 O.												
10	Debitat				Lungimea de debitare L <sub>d</sub> = 2120 <sup>+5</sup> mm.												
15	Rotunjit capete				Capetele se rotunjesc prin strunjire cu o rază R ≈ 10 mm; Lungimea barei după strunjire L <sub>s</sub> = 2110 <sup>+2</sup> mm.												
20	Control , 10%				Verifică lungimea de strunjire L <sub>s</sub> = 2110 <sup>+2</sup> mm, cu metrul.											Dacă o singură bară nu coresp. la lungime, lotul se verifică 100 %.	
25	Înfășurat la cald				<ul style="list-style-type: none"> <li>- diam de înfășurare : Ø 65,5 mm;</li> <li>- sens înfășurare : dreapta;</li> <li>- înălțimea de înfășurare : H = ( 275 ) mm;</li> <li>- numărul total de spire : ( 7,4 )</li> <li>- temperatura de încălzire pt. înfășurare: 920-830 °C.</li> </ul>											Înălțimea de înfășurare se stabilește la execuția primelor 5 arcuri.	





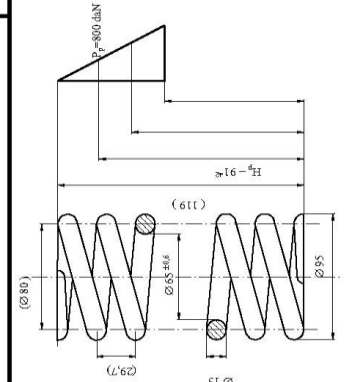
1	2	3	4	5	6	7
30	Ajustat la cald				Se ajustează capetele arcurilor pe dom și se corectează eventualele neuniformități ale pasului. Caracteristicile geometrice ale arcului trebuie să fie cele de la operația 25.	
35	Strunjit eboș				- înălțimea liberă după eboșare $H_0 = (243 \pm 0,1)$ mm; - grosimea capătului de spiră $\approx 8,5$ mm.	Temperaturile de călire și revenire se stabilesc la începutul fabricației și pt. fiecare șarjă.
40	Tratament termic (călit + revenit)				<p>- viteza de încălzire : max. 150 °C/h; - numărul de arcuri în containerul de T.T = 36 bucăți.</p>	Tratamentul termic se poate repeta o singură dată. În cazul în care verificarea duriții se face pe proba mațor, aceasta se tratează odată cu arcurile.
45	Control, prin sondaj				Se verifică parametrii tratamentului termic și certifică prin semnătură pe diagrama înregistrată.	Diagramele înregistrate se păstrează la dosar.
50	Polizat				Arcurile se polizează pentru verificarea duriții pe spira inactivă.	
55	Control duritate Proporția verif. cf. pct.4.222 din UIC 822.0				Se verifică duritatea HRC = 45 <sup>±5</sup> Se poate verifica și HB = 424 - 488	Verificarea duriții se poate face și pe probă mațor.
60	Proba 1; 100%				- se comprimă arcul de 3 ori cu P = 4300 daN; - se verifică $H_1 = 203,2$ mm la $P_0 = 2500$ daN; - se determină $H_1$ pentru operația de finisat; - înălțimea după probă = ( 238 ) mm.	
65	Strunjit finisat				- înălțimea liberă după finisare $H_1 = 234^{±2}$ mm; - abaterea maximă la paralelism = 2,86 mm; - abaterea maximă la perpendicularitate = 7,02 mm; - grosimea capătului de spiră $\approx 6$ mm.	
70	Proba 2; 100%				- se verifică $H_1 = 203,2$ mm la $P_0 = 2500$ daN; - dacă înălțimea $H_1$ este prea mare arcul se retrimit la operația 65; - înălțimea liberă $H_0 = 234^{±2}$ mm.	

1	2	3	4	5	6	7
75	Rotunjit muchii				Muchiile ascuțite ale spiralelor de reazem se rotunjesc prin polizare.	
80	Ecrusat				- se folosesc alice perfect sferice, cu granulația 100; - condiții tehnice de execuție conform fișei UIC 822.0, anexa A.	
85	Control				Se verifică eficacitatea ecrusării vizual și cu proba Almen. Acest control se efectuează la debutul ciclului de fabricație al arcurilor, cât și cu ocazia modificării unuia din parametrii ecrusării (ex. schimbarea alitelor)	Deformația epruvetei Almen 0,4 – 0,5 mm
90	Marcat cu acid				Pe suprafața arcurilor se marchează ASTRA, ultimele 2 cifre ale anului de fabricație și nr. de ordine din registrul de probe. Marcajul se acoperă cu un strat de vaselină.	
95	Verificare magnetoscopică 100%				Se execută conform fișei UIC 822.0, anexa B. Arcurile cu defecte se rebutează.	
100	Elasticitate de scurtă durată; Proporția verif. cf. pct.4.222 din UIC 822.0				Se aplică arcului o sarcină 0,1P= 430 daN sub care se măsoară înălțimea sa. Arcul este apoi supus la 2 comprimări succesive, cuprinzând fiecare din operațiile următoare: - aplicarea progresivă urmată de menținerea pe o durată de 2 minute a sarcinii P= 4300 daN. - elibertarea arcului; - măsurarea înălțimii sub sarcina 0,1P= 430 daN; Nu trebuie să se constate o diferență mai mare de ± 2,5% între înălțimea arcului luată sub sarcina 0,1P=430 daN la prima comprimare și cea luată sub aceeași sarcină după a doua comprimare.	
105	Elasticitate de lungă durată; Proporția verif. cf. pct.4.222 din UIC 822.0				Elasticitatea de lungă durată se face la fel ca elasticitatea de scurtă durată, menținându-se a doua comprimare timp de 48 ore.	
110	Flexibilitate; Proporția verif. cf. pct.4.222 din UIC 822.0				$F_{\text{flex}} = \frac{L_1 - L_2}{F_2 - F_1} = 12,38^{(0,99)} \text{ mm}/10^\circ \text{ daN}$ → unde L <sub>1</sub> și L <sub>2</sub> sunt înălțimile arcului luate sub sarcinile de flexibilitate: F <sub>1</sub> = 500 daN și F <sub>2</sub> = 2500 daN	Se poate determina și rigiditatea $R=1/F_{\text{flex}}=81,29^{+6,51}$ daN/mm
115	Montat inel de marcare				Arcurile se vor selecționa și marca în 2 grupe după înălțimea liberă: - grupa I: 232 ÷ 234 mm → fără inel de marcare; - grupa II: 234,1 ÷ 236 mm → cu un inel de marcare.	

1	2	3	4	5	6	7
120	Control final; 100%				<p>Se verifică:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>⇨ <math>H_0 = 234^{+2}</math> mm</li> <li>⇨ <math>D_0 = 114,4^{+1,1}</math> mm, cu șubler de exterior</li> <li>⇨ Abateră la <math>\perp = \max. 7,02</math> mm</li> <li>⇨ Abateră la <math>// = \max. 2,86</math> mm</li> <li>⇨ Nr. total de spire = (7,4)</li> <li>⇨ Sensul înfășurării : dreapta</li> <li>⇨ Montarea inelului de marcare</li> </ul>	Toate defectele de aspect, caracteristici sau dimensiuni antrenează refuzul arcului respectiv.
125	Predat la recepționar				<p>Arcurile sunt prezentate grupate pe loturi. Fiecare lot nu cuprinde decât arcuri de același tip, confecționate din bare provenite din același șarjă și supuse la același tratament termic ( același parametrii de tratament termic ).</p>	
130	Vopsire	Conform planului de operații și control pentru vopsire				



Tabel 3.18		SECȚIA		PLAN DE OPERAȚII ȘI CONTROL PENTRU ARCURI ELICOIDALE		Denumire reper <b>ARC GLISIERĂ Ø15</b>				Rev		Pag. 1/4					
				Valabili și pentru :						1		2		3		4	
Concept	Data	Nume	Semn.	Reper	Desen	Prodius (comanda)	Semn	Nr. total spire ( 5 )									
Verificat								Sens înfășurare dreapta									
Aprobat								Rigiditatea R 28,75 <sup>±2,30</sup> daN/mm									
Data	Ce s-a modificat		Semn.					Flexibilitatea F <sub>lex.</sub> 35 <sup>±2,8</sup> mm/10 <sup>3</sup> daN									
Modificări								Cond. tehnice de execuție UIC 822.0 categ. 2									
<b>MATERIAL</b>																	
Diam	Lung. de aprov.	Calitate	Starea suprafeței	Greutatea netă	Consum tehnologic	Consum aproviz.	Abateri conform DIN 2096										
Ø15	1275 <sup>±20</sup> DIN 17221	50CrV4	Cojit - șlefuită	1,62 kg.	1,77 kg.	1,80 kg.											
<b>Nr. op.</b>	<b>Denumirea operației</b>	<b>Cod secție</b>	<b>Cod utiliaj</b>	<b>S.D.V.</b>	<b>Prescripții tehnologice</b>												
1	2	3	4	5	6	7											
5	Control material						Verifică calitatea materialului pe lot și șarjă, să corespundă conform DIN 17221 și UIC 822.O.										
10	Debitat						Lungimea de debitare L <sub>d</sub> = 1275 <sup>±5</sup> mm.										
15	Rotunjit capete						Capetele se rotunjesc prin strunjire cu o rază R ≈ 8 mm; Lungimea barei după strunjire L <sub>s</sub> = 1265 <sup>±2</sup> mm.										
20	Control , 10%						Verifică lungimea de strunjire L <sub>s</sub> = 1265 <sup>±2</sup> mm, cu metrul.										
25	Înfășurat la cald						Dacă o singură bară nu coresp. la lungime, lotul se verifică 100 %.  Înălțimea de înfășurare : Ø 65 mm; sens înfășurare : dreapta; înălțimea de înfășurare : H = ( 145 ) mm; numărul total de spire : ( 5 ) temperatura de încălzire pt. înfășurare : 920-830 °C.										



1	2	3	4	5	6	7
30	Ajustat la cald				Se ajustează capetele arcurilor pe dom și se corectează eventualele neuniformități ale pasului. Caracteristicile geometrice ale arcului trebuie să fie cele de la operația 25.	
35	Strunjit eboș				- înălțimea liberă după eboșare $H_0 = (126) \text{ mm}$ ; - grosimea capătului de spirală $\approx 6 \text{ mm}$ .	
40	Tratament termic (călit + revenit)				<p>Diagrama procesului de călit și revenit. Călit: încălzire la 830-860°C, răcire în ulei în 30 min. Revenit: încălzire la 350-550°C, răcire în aer liniștit în 45 min.</p>	Temperaturile de călire și revenire se stabilesc la începutul fabricației și pt. fiecare șarjă. Tratamentul termic se poate repeata o singură dată. În cazul în care verificarea duriții se face pe proba marlor, aceasta se tratează odată cu arcurile.
45	Control, prin sondaj				- viteza de încălzire : max. 150 °C/h; - numărul de arcuri în containerul de T.T = 105 bucăți.	Diagramele înregistrate se păstrează la dosar.
50	Polizat				Arcurile se polizează pentru verificarea duriții pe spira inactivă.	Verificarea duriții se poate face și pe probă marlor.
55	Control duritate Proportia verif. cf. pct.4.222 din LUC 822.O				Se verifică duritatea HRC = 47 <sup>-3</sup> Se poate verifica și HB = 448 - 488	
60	Proba 1; 100%				- se comprimă arcul de 3 ori cu P = 1120 daN; - se verifică H <sub>1</sub> = 91 mm la P <sub>1</sub> = 800 daN; - se determină H <sub>f</sub> pentru operația de finisat; - înălțimea după probă = (122) mm.	
65	Strunjit finisat				- înălțimea liberă după finisare H <sub>f</sub> = (119) mm; - abaterea maximă la paralelism = 2,38 mm; - abaterea maximă la perpendicularitate = 3,57 mm; - grosimea capătului de spirală $\approx 3,8 \text{ mm}$ .	
70	Proba 2; 100%				- se verifică H <sub>1</sub> = 91 <sup>+2</sup> mm la P <sub>1</sub> = 800 daN; - dacă înălțimea H <sub>f</sub> este prea mare arcul se retrimită la operația 65; - înălțimea liberă H <sub>0</sub> = (119) mm.	

1	2	3	4	5	6	7
75	Rotunjit muchii				Muchile ascuțite ale spirelor de reazem se rotunjesc prin polizare.	
80	Ecrusat				- se folosesc alice perfect sferice, cu granulația 100; - condiții tehnice de execuție conform fișei UIC 822.0, anexa A.	
85	Control				Se verifică eficacitatea ecrușării vizual și cu proba Almen. Acest control se efectuează la debutul ciclului de fabricație al arcurilor, cât și cu ocazia modificării unuia din parametrii ecrușării (ex. schimbarea alicelor)	Deformația epruvetei Almen 0,4 – 0,5 mm
90	Diagramat 100%				Înălțimea liberă : $H_0 = (119) \text{ mm}$ Arcul se verifică la : $P_1 = 800 \text{ daN}$ $\rightarrow$ $H_1 = 89 \pm 93 \text{ mm}$	
95	Marcat cu acid				Pe suprafața arcurilor se marchează ASTRA, ultimele 2 cifre ale anului de fabricație și nr. de ordine din registrul de probe. Marcajul se acoperă cu un strat de vasealină.	
100	Verificare magnetoscopică				Se execută conform fișei UIC 822.0, anexa B. Arcurile cu defecte se rebutează.	100%
105	Elasticitate de scurtă durată; Proporția verif. cf. pct.4.222 din UIC 822.0				Se aplică arcului o sarcină 0,1P= 112 daN sub care se măsoară înălțimea sa. Arcul este apoi supus la 2 comprimări succesive, cuprinzând fiecare din operațiile următoare: - aplicarea progresivă urmată de menținerea pe o durată de 2 minute a sarcinii P= 1120 daN. - elibertarea arcului; - măsurarea înălțimii sub sarcina 0,1P= 112 daN; Nu trebuie să se constate o diferență mai mare de $\pm 2,5\%$ între înălțimea arcului luată sub sarcina 0,1P=112 daN la prima comprimare și cea luată sub aceeași sarcină după a doua comprimare.	
110	Elasticitate de lungă durată; Proporția verif. cf. pct.4.222 din UIC 822.0				Elasticitatea de lungă durată se face la fel ca elasticitatea de scurtă durată, menținându-se a doua comprimare timp de 48 ore.	
115	Flexibilitate; Proporția verif. cf. pct.4.222 din UIC 822.0				Flexibilitatea $F_{lex} = \frac{L_1 - L_2}{F_2 - F_1} = 35^{5,8} \text{ mm}/10^3 \text{ daN}$ $\rightarrow$ unde $L_1$ și $L_2$ sunt înălțimile arcului luate sub sarcinile de flexibilitate: $F_1 = 200 \text{ daN}$ și $F_2 = 1000 \text{ daN}$	Se poate determina și rigiditatea $R = 1/F_{lex} = 28,75^{2,80} \text{ daN/mm}$



1	2	3	4	5	6	7
120	Control final; 100%				<p>Se verifică:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>⇨ <math>H_0 = (-119) \text{ mm}</math></li> <li>⇨ <math>D_j = 65^{+0,7} \text{ mm}</math></li> <li>⇨ Abateră la <math>\perp = \text{max. } 3,57 \text{ mm}</math></li> <li>⇨ Abateră la <math>// = \text{max. } 2,38 \text{ mm}</math></li> <li>⇨ Nr. total de spire = ( 5 )</li> <li>⇨ Sensul înfășurării : dreapta</li> </ul>	Toate defectele de aspect, caracteristici sau dimensiuni antrenează refuzul arcului respectiv.
125	Predat la recepționar				<p>Arcurile sunt prezentate grupate pe loturi. Fiecare lot nu cuprinde decât arcuri de același tip, confecționate din bare provenite din același șarjă și supuse la același tratament termic ( același parametrii de tratament termic )</p>	
130	Vopsire	Conform planului de operații și control pentru vopsire				

## FIȘĂ DE MĂSURĂTORI

Tabel 3.19

NR CRT	CARACTERISTICA DE VERIFICAT	ARC Ø 31 mm desen de referință: 2 Fwg 696.0.02.023.002				ARC Ø 24,4 mm desen de referință: 2 Fwg 696.0.02.023.001				ARC Ø 15 mm desen de referință: 3 Fwg 106.0.04.012.002				OBS.						
		VALOARE PRESCRISĂ		VALOARE MĂSURATĂ		VALOARE PRESCRISĂ		VALOARE MĂSURATĂ		VALOARE PRESCRISĂ		VALOARE MĂSURATĂ								
		arc 1	arc 2	arc 3	arc 4	arc 1	arc 2	arc 3	arc 4	arc 1	arc 2	arc 3	arc 4							
1	Înălțimea sub sarcină	$H_1=242^{+1}_{-3}$ P=880 daN	241,9	241,7	241,6	242,6	241,9	-	-	-	-	91,7	91,0	91,5	91,9	91,5	cf. diagramă înregistrată			
2	Înălțimea liberă	$H_0=(260)$	261,0	261,5	261,5	262,5	261,6	234 <sup>+2</sup>	234	235	234,5	235	234,6	$H_0=(119)$	121,5	121,5	123,0	121,9		
3	Flexibilitatea	$50,12^{+4,01}$ daN/mm	48,90	47,71	48,21	50,04	48,72	$81,29^{+6,51}$ daN/mm	79,83	78,30	77,80	77,36	78,32	$28,75^{+2,30}$ daN/mm	29,19	28,62	27,75	28,47	cf. diagramă înregistrată	
4	Duritatea	HRC=45 <sup>-5</sup>	46,6	46,3	45,9	46,8	46,4	HRC=45 <sup>-5</sup>	46,3	47,3	46,5	46,4	46,6	HRC=47 <sup>-3</sup>	47,1	46,5	48,1	46,8	pe un arc	
5	Control magnetoscopic	cf. anexa B UIC 822.O	corespunde				cf. anexa B UIC 822.O	corespunde				cf. anexa B UIC 822.O	corespunde							
6	Elasticitate	cf. 2.233 UIC 822.O	corespunde				cf. 2.233 UIC 822.O	corespunde				cf. 2.233 UIC 822.O	corespunde							
7	Dia. exterior	-	-	-	-	-	-	$\emptyset 114,4^{+1,1}$	114,1	114,4	114,4	114,4	114,3	-	-	-	-	-	cu șubler de exterior	
	Dia. interior	$\emptyset 132^{+1,3}$	corespunde				-	-	-	-	-	-	-	-	$\emptyset 65^{+0,6}$	corespunde				cu calibre „TRECE” și „NU TRECE”
	Abaterea la I	max. 7,8 mm	< 7,8				max. 7,2 mm	< 7,2				max. 3,5 mm	< 3,5				cu verificator tip „echer”			
	Abaterea la II	max. 4,8 mm	< 4,8				max. 2,8 mm	< 2,8				max. 2,3 mm	< 2,3				cu verificator pt. paralelism			

## CAPITOLUL 4

# TRATAMENTE TERMICE APLICATE ARCURILOR METALICE

Prin tratament termic se înțelege succesiunea de operații care constau din încălzirea și răcirea în condiții determinate, aplicate unui material metalic, în scopul obținerii structurilor corespunzătoare unor anumite asociații de proprietăți [9],[12],[21].

### 4.1 Clasificarea și caracterizarea tratamentelor termice

#### 4.1.1 Tipuri de tratamente termice aplicate aliajelor feroase

Se poate face o clasificare a tratamentelor termice [55] în funcție de :

- natura constituenților structurali
- modul de încălzire
- modul de răcire

După natura constituenților structurali sunt :

- tratamente termice primare (sau preliminare), care au ca scop obținerea unor constituenți de echilibru fazic, care induc unele proprietăți tehnologice sau pregătesc structurile necesare tratamentului termic final.
- tratamente termice finale (sau secundare), care asigură obținerea unor constituenți structurali ce conferă proprietăți de exploatare materialului metalic.

După modul de încălzire sunt :

- tratamente termice cu încălzire volumică (recoaceri, căliri, reveniri, etc.), în regim izoterm sau anizoterm.
- tratamente termice cu încălziri de suprafață, prin care se realizează modificarea structurii pe o anumită adâncime prestabilită (căliri superficiale, durificări structurale, etc.).
- tratamente termochimice cu încălziri, de obicei, volumice dar și în unele cazuri și de suprafață, folosind un mediu convenabil ales pentru a modifica compoziția chimică și microstructura straturilor superficiale pe adâncimi prestabilite (carburări, nitrurări, sulfizări, borizări, cromizări, etc.).
- tratamente termice speciale – termofizice – folosind încălzirea volumică în câmpuri energetice (de obicei câmpuri magnetice, ultrasonice, etc.)
- tratamente termomecanice, care constau din suprapunerea peste ciclul termic de încălzire sau de răcire a unor cicluri de solicitări mecanice.

După modul de răcire sunt :

- tratamente termice izoterme, când răcirea de la temperatura de încălzire se face în băi de săruri sau materiale metalice topite, la o temperatură favorabilă obținerii anumitor constituenți (treapta feritică, perlitică, bainitică).

- tratamente termice anizoterme, când se aplică o răcire continuă de la temperatura de încălzire până la temperatura mediului de răcire (aer, apă, soluții apoase, uleiuri, materiale metalice, etc.).

#### 4.1.2 Caracterizarea tratamentului termic

Tratamentul termic este un proces tehnologic complex, prin care se urmărește obținerea anumitor constituenți structurali, care induc proprietățile de exploatare dorite.

Tratamentul termic este caracterizat de o ciclogramă ce poate avea forma cea mai simplă (figura 4.1) :

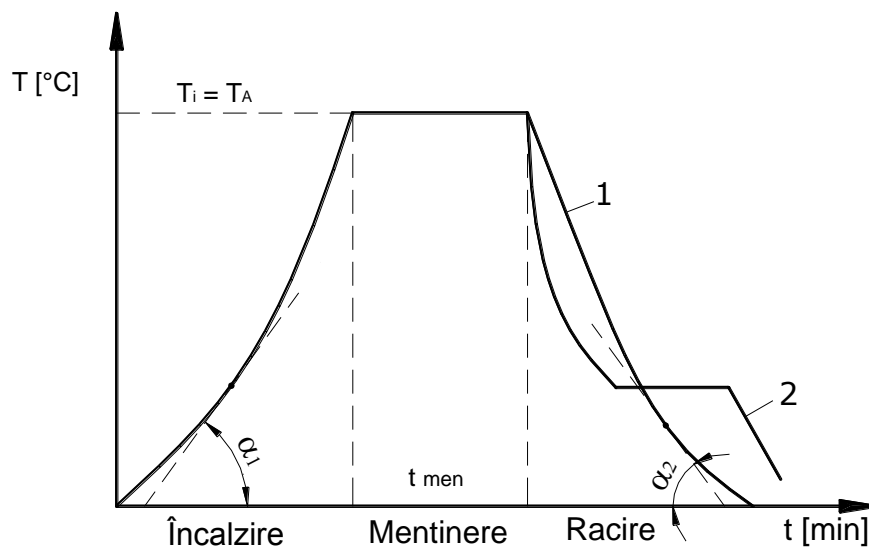


Fig. 4.1. Ciclograma generală a unui tratament termic volumic

Ciclograma tratamentului termic evidențiază parametrii tehnologici specifici:

- $V_{inc}$  [ $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ]  $\rightarrow$  determinată prin  $\text{tg}\alpha_1$  (curba 1)
- durata de menținere la  $T_i$  necesară pentru a se obține uniformizarea încălzirii și omogenizarea structurală
- $V_{rac}$  [ $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ] pentru tratamentele termice anizoterme  $\rightarrow$  calculată prin  $\text{tg}\alpha_2$  (curba 1)
- grad de subrăcire  $\Delta T_{rac}$  pentru tratamentele termice izoterme ( $\Delta T_{rac} = T_i - T_r$  [ $^{\circ}\text{C}$ ])  $\rightarrow$  curba 2
- timp de răcire izotermă  $t_{ri}$  [min] necesar realizării transformării structurale dorite.

Aspectele caracteristice ale ciclogramelor depind de natura materialului și de tipul de tratament termic aplicat. În figura 4.2 și figura 4.3 sunt prezentate câteva ciclograme specifice :

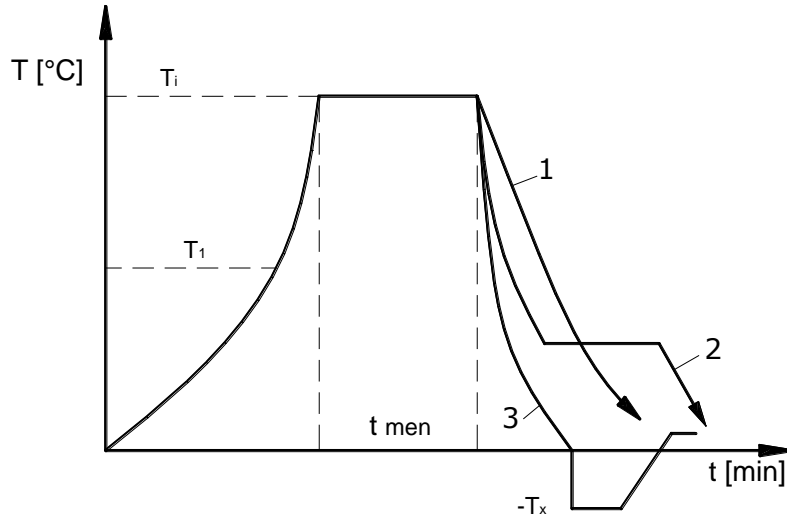


Fig. 4.2. Ciclogramă complexă specifică tratamentelor termice volumice  
 curba 1 : răcire anizotermă ; curba 2 : răcire izotermă ; curba 3 : răcire la temperaturi joase

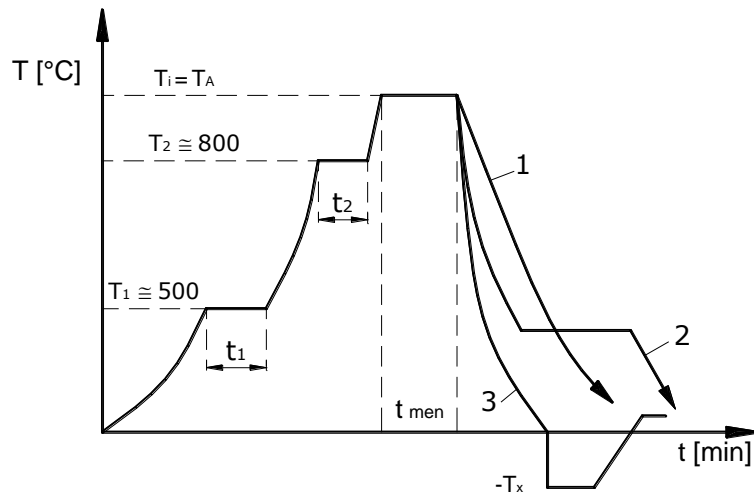


Fig. 4.3. Ciclogramă complexă specifică tratamentelor termice volumice  
 încălzire în trepte, cu timp de menținere și răcire diferite

### 4.1.3 Parametrii tratamentelor termice

**4.1.3.1 Temperatura** tratamentului termic,  $T_i$ , temperatura la care se încălzesc piesele (sau temperatura de încălzire).

Determinarea temperaturii de încălzire se poate face prin mai multe metode, astfel:

- experimental, prin metoda călirilor succesive (figura 4.4);
- utilizând diagrame de echilibru, pe baza transformărilor care au loc în urma tratamentului termic (figura 4.5).

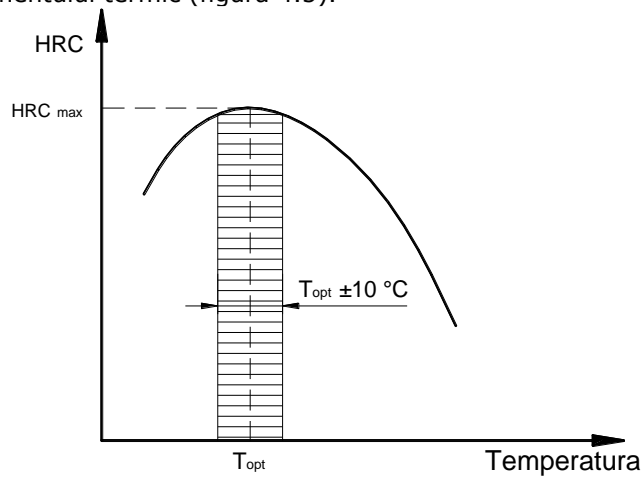


Fig. 4.4 Variația durității în funcție de temperatura de încălzire

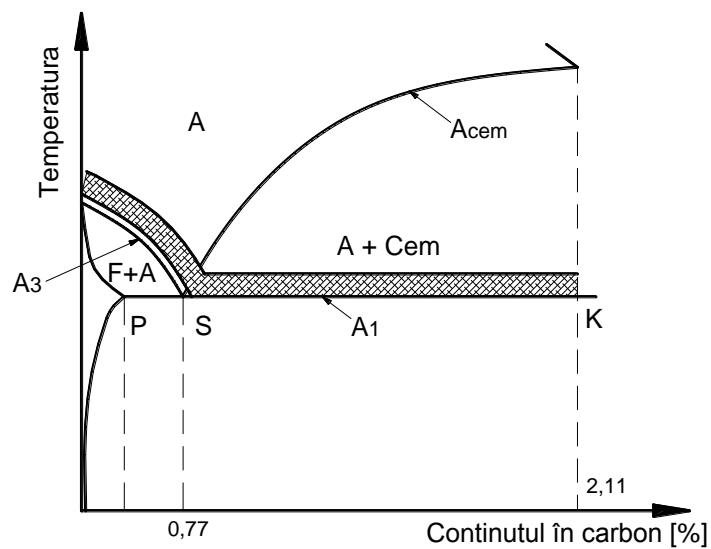


Fig. 4.5 Temperaturile de austenitizare pentru călirea oțelurilor carbon

Astfel, pentru oțelurile carbon, temperatura de încălzire necesară pentru călire se alege în felul următor :

- pentru oțelurile hipoeutectoide încălzirea se face în domeniul austenitic. Dacă s-ar face între  $A_{c1}$  și  $A_{c3}$  (unde avem Fe + A ), după călire structura ar fi constituită din martensită, ferită și austenită reziduală, iar duritatea pieselor ar scădea.

$$T_{inc} = A_{c3} + (30...50) \text{ } ^\circ \text{C} \quad (4.1)$$

- oțelurile hipereutectoide și eutectoide . Încălzirea se face între  $A_{c1}$  și  $A_{cem}$ . După călire, în structură va exista martensită , cementită secundară și austenită reziduală. Cementita secundară influențează favorabil duritatea și deci rezistența la uzură.

Temperatura nu se ridică mult peste  $A_{c1}$  deoarece încălzirea la temperaturi ridicate duce la creșterea grăuntelui austenitic , a cantității de austenită reziduală și a tensiunilor interne.

Pentru aceste oțeluri temperatura de încălzire este :

$$T_{inc} = A_{c1} + (50...70) \text{ } ^\circ \text{C} \quad (4.2)$$

Observație : în general, temperaturile de încălzire în vederea tratamentului tehnic respectiv sunt standardizate .

Temperaturile mai pot fi găsite și în normele elaborate de către producătorii de oțeluri sau în diferite tratate de specialitate.

#### 4.1.3.2 Timpul de încălzire, menținere și răcire

Ciclul de încălzire la tratament termic se împarte în următoarele etape:

- 1) timpul de încălzire considerat ca fiind timpul necesar ca suprafața produsului să atingă temperatura de tratament termic (de încălzire) prescrisă;
- 2) timpul de egalizare termică, este timpul necesar pentru atingerea de către centrul piesei a temperaturii prescrise;
- 3) timpul de transformare, este timpul necesar realizării tuturor transformărilor ce trebuie să aibă loc pentru tratamentul respectiv.

În practica tratamentelor termice timpul de menținere include timpul de egalizare termică și timpul de transformare.

*Calculul timpilor de încălzire, menținere și răcire :*

Calculul timpilor de încălzire, se poate face prin următoarele metode :

- metoda criterială pentru corpuri de lungime infinită;
- prin relații simplificate de calcul (în funcție de raportul dintre volumul și suprafața piesei, grosimea piesei).

Calculul timpilor de menținere :

- timpul de egalizare termică:

Timpul de egalizare a temperaturii pe secțiunea pieselor este necesar la piese masive cu dimensiuni de peste 100 mm.



Pentru piese cu grosimi mai mici de 100 mm încălzite în cuptoare cu gaz sau electrice și pentru piese subțiri încălzite în băi de săruri, se consideră timpul de egalizare ca fiind  $\frac{1}{4}$  din  $T_{inc}$  (dacă nu s-a calculat de la început timpul de menținere + timpul de egalizare) [13],[27].

Pentru oțeluri aliate cu elemente carburigene (Cr, Mo, V, T) se recomandă prelungirea duratei de egalizare cu 30% dacă se urmărește dizolvarea carburilor.

- timpul de transformare este socotit din momentul egalizării temperaturii pe secțiunea piesei (se admite o diferență mică între temperatura suprafeței și temperatura centrului, funcție de timpul tratamentului termic) și depinde de tipul tratamentului termic aplicat, de structura inițială și de temperatura de încălzire.

Duratele cele mai mici de transformare sunt la austenitizarea oțelurilor în vederea călirii, normalizării sau recoacerii complete.

Duratele de transformare variază între 1 și 4 minute, funcție de tipul oțelului (de exemplu pentru OLC 45 este nevoie de 1 minut, iar pentru C120 de 4 minute. )

La recoacerea de recristalizare duratele sunt mai mari și în acest caz pentru stabilirea timpului de transformare se recurge la încercări experimentale.

Duratele de transformare ceva mai lungi decât la călire, sunt necesare la austenitizarea oțelurilor în vederea tratamentelor termice de recoacere, de regenerare sau normalizare. Deși transformarea de bază este aceeași, pentru eliminarea structurilor Widmanstätten sau în "frunză " se impun timpi de transformare aproape egali cu cei de egalizare.

Cele mai lungi durate de transformare la oțeluri sunt necesare la recoacerile de omogenizare și la cele subcritice (detensionarea, globulizarea fină) sau intercritice (globulizarea structurilor perlitice).

Transformarea se bazează pe difuzie, care se realizează greu, durata fiind de ordinul orelor. (În practică s-a adoptat o regulă de timp „ ora și țolul”).

- timpul de răcire, are o importanță deosebită deoarece el determină structura finală a pieselor care conferă proprietățile prescrise. Timpul de răcire depinde de tipul tratamentului, de compoziția chimică a oțelului, variația temperaturii mediului de călire, etc. Timpul de răcire poate varia de la secunde (călirea) la ore (recoacerea), etc.

Se poate determina analitic (prin diferite metode, cum ar fi metoda criterială) sau experimental, [22], [23].

#### 4.1.3.3 Viteza de încălzire și răcire

- *Viteza de încălzire* depinde de proprietățile termofizice ale materialului și de compoziția sa chimică. În general viteza de încălzire trebuie să fie mică pentru a evita apariția tensiunilor interne în piese.

- *Viteza de răcire* depinde de tratamentul termic aplicat și poate varia de la 20 - 30 °C/h la unele recoaceri, la 150 - 200 ° C/s la călirile superficiale.

Viteza de răcire se poate determina :

- experimental prin răcirea în diverse medii de răcire;
- grafic folosindu-se diagramele TTT sau CCT. Din acestea se poate determina valoarea vitezei de răcire care să asigure structura și proprietățile prescrise.

#### 4.1.3.4. Mediile de încălzire și răcire

##### - *Mediul de încălzire*

Transmiterea căldurii se poate face prin convecție, conducție și radiație.

La cuptoarele cu flacără și electrice, transmiterea căldurii are loc prin convecție și radiație, iar la cuptoarele cu băi de săruri se face prin conducție.

Mediile de încălzire folosite în practica tratamentelor termice sunt: lichide, gazoase, în vid, în atmosferă controlată sau în strat fluidizat. Încălzirea într-un anumit mediu depinde de compoziția chimică a materialului, caracteristicile termofizice ale materialului, precum și de tratamentul termic prescris.

##### *Mediul de răcire*

Mediile de răcire industriale sunt: gazoase, lichide, solide, sau combinații de tipul gaz-lichid (ceață), gaz-solid (strat fluidizat), lichid –solid (suspensii).

Alegerea mediului se face în funcție de structura finală impusă de tratamentul termic prescris .

#### 4.1.4 Descrierea tratamentelor termice

În funcție de compoziția chimică și starea structurală a materialului metalic din care este executat un anumit produs, precum și de transformările structurii și tensiunilor prin care acesta este adus în starea corespunzătoare caracteristicilor tehnologice și de exploatare prescrise, tratamentele termice care se aplică sunt de mai multe feluri.

##### 4.1.4.1 Călirea

Este tratamentul termic care constă din încălzirea oțelului deasupra punctului de transformare, menținerea la această temperatură, pentru omogenizare, și răcirea cu viteză superioară celei critice. Prin călire se urmărește obținerea unei structuri în afară de echilibru, care să asigure pieselor călite anumite proprietăți fizico-mecanice.

Proprietățile aliajelor fier-carbon călite, depind de constituenții de călire obținuți.

Constituenții structurali obținuți la călire sunt următorii :

*Martensita de călire* (figura 4.6) - se obține la răcirea continuă a austenitei cu o viteză mare de răcire mai mare decât viteza critică de călire (în apă, ulei sau alte medii apoase).

Structura este în afară de echilibru și are formă aciculară. Deoarece la finalul transformării nu toată austenita se transformă în martensită, mai rămâne întotdeauna o cantitate de austenită netransformată numită austenită reziduală.

Martensita este un constituent dur și fragil. Ea nu se poate folosi în tehnică, numai după ce a fost transformată în martensită de revenire. Duritatea poate să ajungă (în funcție de % de carbon până la 64 - 66 HRC, iar  $R_m$  până la 260 - 270 N / mm<sup>2</sup>).

La unele oțeluri, pe lângă martensită și austenită reziduală , după călire mai pot apărea cementita secundară sau carburile.

*Bainita* - se obține la răcirea izotermă și reprezintă un amestec mecanic de ferită suprasaturată și cementită (carburi de tip  $F_xC$ ).

În funcție de temperatura la care se face menținerea se obține :

- bainită superioară (figura 4.7), se obține la temperaturi de menținere situate între 500-300 ° C. Este o structură nedorită cu slabe proprietăți de plasticitate datorită precipitărilor de carburi grosiere la limitele grăunților de ferită. Nu se urmărește obținerea sa în structura oțelurilor călite.
- bainita inferioară (figura 4.8), se obține la temperaturi de menținere între 300 - Ms °C. Are un aspect acicular și se caracterizează prin duritate și rezistență mecanică apropiate de martensita de călire, având însă o tenacitate mai mare.

Prin tratament termic de călire izotermă se urmărește obținerea bainitei inferioare, care conferă oțelului caracteristici de rezistență mecanică superioară, în raport cu constituenții de treaptă perlitică (sorbita, troostita), tenacitatea rămânând la valori destul de ridicate.

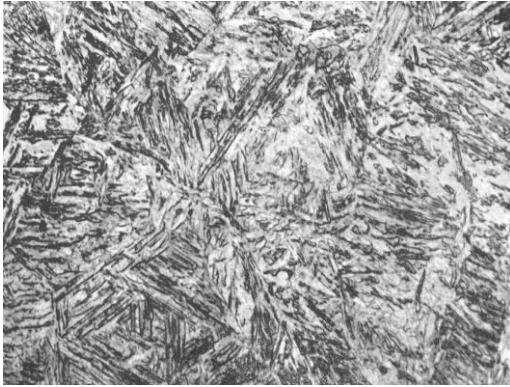


Fig. 4.6 Martensită de călire (500:1)

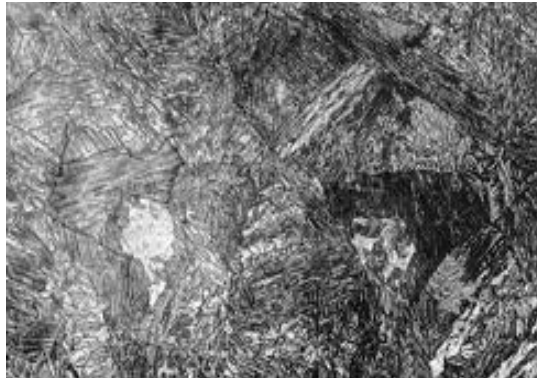


Fig. 4.7 Bainită superioară (500:1)

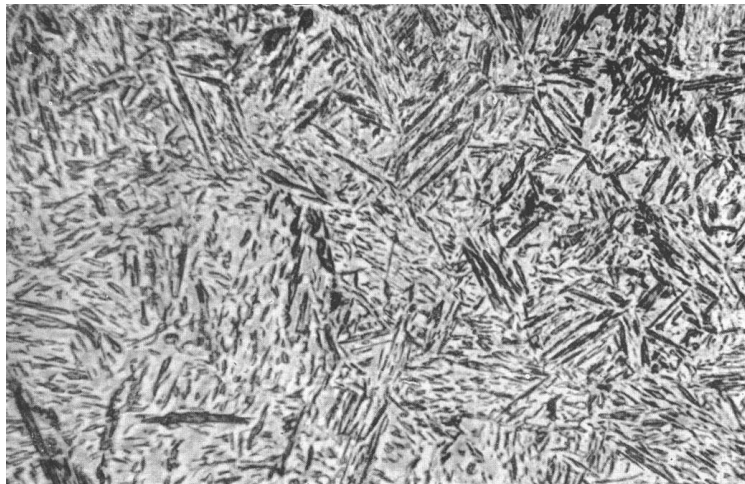


Fig. 4.8 Bainită inferioară (urme de martensită) (500:1)

#### 4.1.4.2 Revenirea

Piesele din oțel călit sunt foarte fragile, au uneori o duritate mai mare decât este necesar și prezintă tensiuni interne pronunțate. Piesele din oțel nu se pot întrebuința în stare călită, ci se supun unui tratament termic, ulterior, de revenire.

Revenirea are ca scop mărirea tenacității, micșorarea durității și reducerea tensiunilor interne. Revenirea mai are ca scop trecerea oțelului călit într-o stare mai stabilă, apropiată de echilibru.

În mod practic, tratamentul de revenire se realizează prin încălzirea oțelului la temperaturi inferioare punctului de transformare, urmată de o răcire lentă.

Prin revenire se obțin constituenți cu proprietăți noi.

Constituenții obținuți la revenire sunt următorii:

*Martensita de revenire* (figura 4.9) - se obține prin încălzirea martensitei de călire între 150 - 200 ° C și menținerea la această temperatură un timp urmată de răcire.

Duritatea martensitei de revenire este cu câteva unități mai mică decât a martensitei de călire (excepție făcând martensita de revenire a unor oțeluri aliate cum ar fi oțelurile rapide  $R_p$ ), HRC = 58 - 62.

Revenirea joasă se aplică la sculele așchietoare , piese solicitate la uzură, etc.

*Troostita de revenire* (figura 4.10) - se obține prin încălzirea martensitei de călire la temperaturi între 300 - 450 ° C, menținerea la această temperatură un timp, urmată de răcire.

Acest constituent are o duritate de  $\approx$  40 - 50 HRC, o elasticitate și o rezistență la oboseală mari.

Troostita de revenire se obține prin revenire medie care se aplică la elemente elastice cum ar fi arcurile.

*Sorbita de revenire* (figura 4.11) - se obține prin încălzirea martensitei la temperaturi cuprinse între 450 - 650 °C, menținute la această temperatură un timp, urmată de o răcire. Duritatea sorbitei de revenire este cuprinsă între 28 - 38 HRC.

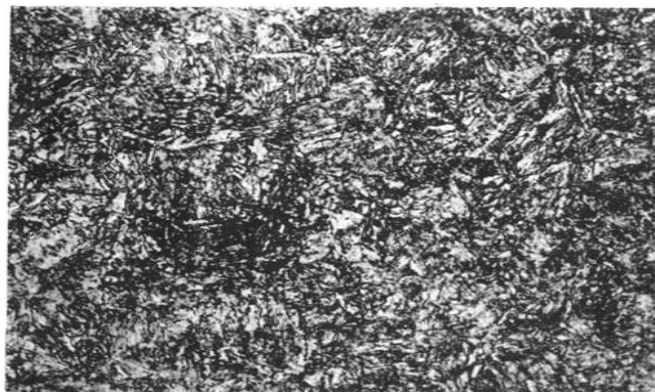


Fig. 4.9 Martensită de revenire și austenită reziduală (500:1)



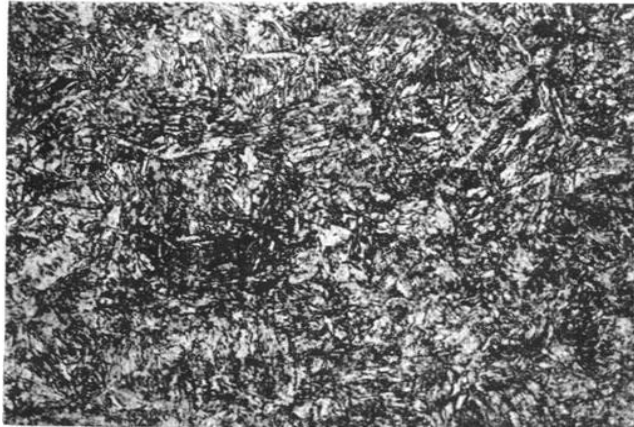


Fig. 4.10. Troostită de revenire (500:1)

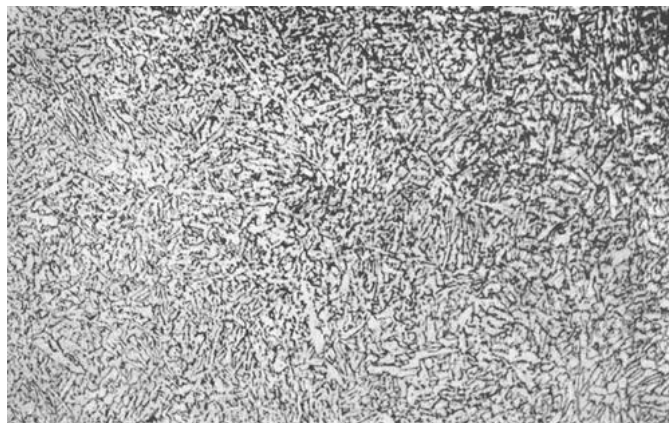


Fig.4.11. Sorbita de revenire (500:1)

#### 4.1.4.3 Recoacerea

Scopul aplicării tratamentului termic de recoacere constă în aceea că, prin încălzire și răcire în anumite condiții, să se dirijeze transformările în stare solidă în sensul apropiării aliajului de echilibrul energetic și structural, al omogenizării chimice sau al obținerii unor constituenți cu un anumit grad de finețe, de uniformitate dimensională și distribuție în structură.

Tensiunile interne care apar în piesele mecanice cu ocazia turnării, deformațiilor plastice sau a operațiilor de prelucrare la rece, au un efect dăunător. Ele pot cauza, în timp, deformarea sau fisurarea pieselor, înrăutățesc comportarea în exploatare, provoacă modificări dimensionale în timpul funcționării sau simplei depozitări a acestora.

Pe aceste considerente, înlăturarea tensiunilor interne este urmărită în timpul tratamentelor termice. Ea se realizează în diferite moduri : dacă tratamentele aplicate în vederea altor scopuri comportă încălziri cu viteze scăzute pentru a nu

cauza apariția altor tensiuni (de exemplu recoacerile subcritice, incomplete și complete) tensiunile interne sunt înlăturate și nu mai este necesară aplicarea unui tratament termic anume pentru acest scop.

În cazul când tratamentul pentru înlăturarea tensiunilor interne se aplică special în acest scop el poartă denumirea de recoacere de detensionare. Dacă se urmărește detensionarea după călire, acest tratament mai poartă și denumirea de revenire.

Produsele din oțel se încălzesc la 550 - 600 °C, menținerea la această temperatură fiind de cca. 2,4 minute pentru fiecare milimetru de grosime a piesei. Această dependență ține seama de influența grosimii atât asupra mărimii tensiunilor formate cât și asupra vitezei de înlăturare a lor. În general, după ce s-a produs egalizarea temperaturii în toată masa, nu sunt necesare mențineri cu durate mai mari de 2...3 ore, deoarece, după acest timp, nu se mai pronunțe o micșorare sensibilă a tensiunilor.

Pentru produsele sudate recoacerea de detensionare se face la 400 - 600 °C, iar pentru cele călite la temperaturi care nu provoacă o micșorare sensibilă a durității (180 - 250 °C).

Prin aplicarea tratamentului de recoacere se obțin următorii constituenți structurali: perlita lamelară, perlita globulară, ferita, sorbita lamelară și troostita lamelară, în funcție de condițiile în care s-a realizat încălzirea și răcirea.

1. *perlita lamelară* (figura 4.12) se poate obține prin două moduri de răcire a austenitei, și anume:

- prin răcirea continuă a austenitei de la temperatura de austenitizare până la o temperatură cuprinsă între 700 - 650 °C și menținerea izotermă în intervalul acesta de temperatură;
- prin răcirea continuă cu viteze mici de răcire (grade foarte mici de subrăcire ( $DT = A_{c1} - T = 727 - (650-700) \text{ } ^\circ\text{C}$ ))

Perlita este un amestec mecanic (eutectoid) de ferită și cementită ce poate fi de formă lamelară sau globulară. Numărul și distanța dintre lamelele de cementită depinde de compoziția chimică a aliajului și de viteza de răcire.

Duritatea perlitei este HB = 180-245

2. *sorbita lamelară* se poate obține la fel ca și perlita lamelară prin două moduri de răcire a austenitei :

- prin răcirea continuă a austenitei de la temperatura de austenitizare până la temperatura de 600 °C și menținerea izotermă la această temperatură un anumit timp.
- prin răcirea continuă a austenitei cu o viteză de răcire mai mare decât în cazul perlitei , gradele de subrăcire fiind  $DT = 727 - 600 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

Sorbita lamelară este mai dură decât perlita, având HB = 250 -350. Este un constituent de treaptă perlitică.

3. *troostita lamelară* se poate obține prin :

- răcire continuă a austenitei de la temperatura de austenitizare, până la 550 °C și menținerea izotermă la această temperatură un anumit timp.
- răcirea continuă a austenitei cu o viteză de răcire mai mare decât în cazul sorbitei lamelare  $DT = 727 - 550 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

Ca și sorbita lamelară, și troostita este un constituent de treaptă perlitică, având o plasticitate redusă și o duritate cuprinsă între 350- 450 HB.

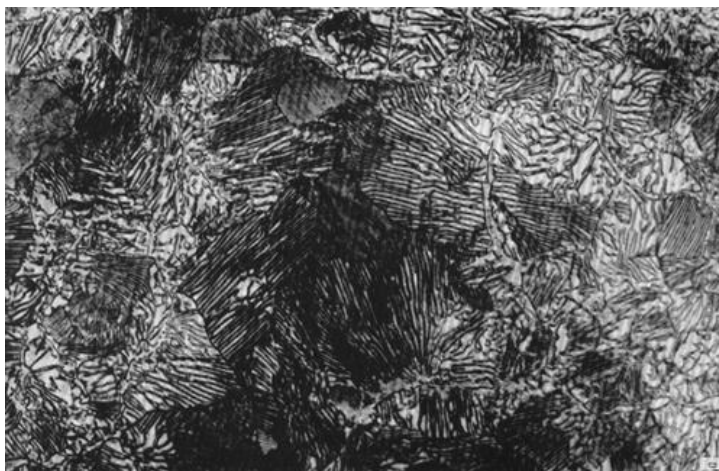


Fig. 4.12 Perlită lamelară (500 : 1)

## 4.2. Tratamentul termic al arcurilor

### 4.2.1. Generalități

După caracteristicile mecanice pe care le au în stare de livrare în vederea fabricării diferitelor tipuri de arcuri, oțelurile se împart în două categorii:

- oțeluri pentru arcuri care au în stare de livrare caracteristicile mecanice necesare, arcurile executate din aceste oțeluri fiind supuse numai unei recoaceri de detensionare. În general, din această categorie fac parte oțelurile trefilate sau laminate la rece, sub formă de sârme.
- oțeluri prelucrate la cald, sub forme de bare rotunde sau profiluri cu diametrul sau grosimea variind între 5 și 80 mm. Aceste oțeluri se folosesc la executarea arcurilor care se supun ulterior unui tratament termic de călire și revnire.

La fabricarea arcurilor se folosesc :

- *oțeluri carbon*, având un conținut de 0,35...0,90 %C, 0,45...1,15 %Mn și 0,15...2,0 %Si.
- *oțeluri aliate*, cu un conținut de 0,45...0,65 %C și cu elemente de aliere: siliciu, mangan și crom. În cazul arcurilor cărora li se cer proprietăți speciale, ca elemente de aliere intervin și nichelul, wolframul și vanadiul.

Spre deosebire de arcurile din oțel carbon, care se execută la rece, rămânând cu proprietățile mecanice dobândite în procesele anterioare de patentare și trefilare sau laminare la rece, arcurile din oțeluri aliate se prelucrează la cald supunându-se, în stare finală, tratamentului termic de călire și revenire.

Pentru arcuri puternic solicitate, de înaltă rezistență, se folosesc oțelurile aliate cu crom, silici și vanadiu. Aceste oțeluri prezintă o adâncime de călire mare prin răcirea în ulei. Datorită prezenței vanadiului, structura acestor oțeluri este mai fină decât în cazul celor aliate numai cu siliciu și au o tendință de supraîncălzire mai mică.



Încălzirea arcurilor în vederea călirii trebuie să se facă, de preferință, în cuptoare electrice cu reglarea automată a temperaturii și cu atmosferă controlată. Încălzirea într-o atmosferă oxidantă, duce la decarburarea arcurilor, respectiv la mărirea sensibilității la fisurare și micșorarea rezistenței la oboseală.

Durabilitatea și comportarea în exploatare a arcurilor depind și de alți factori decât valorile caracteristicilor mecanice: starea suprafeței, gradul de decarburare (din timpul operației de tratament termic); lipsa incluziunilor nemetalice, călibilitatea, regimul tratamentului termic aplicat, omogenitatea structurii, protecția împotriva coroziunii.

Caracteristicile arcurilor sunt determinate de tratamentul termic aplicat. Tratamentul termic se aplică arcurilor gata înfășurate și constă din călire + revenire sau, pentru arcurile înfășurate la rece, o recoacere de detensionare.

#### 4.2.2. Tratamente termice primare aplicate arcurilor

Arcurile executate din oțeluri carbon, ale căror proprietăți se obțin printr-un tratament termic final de călire și revenire, se folosesc numai în cazurile când solicitările la care sunt supuse în exploatare sunt mici.

În majoritatea cazurilor, oțelurile carbon folosite la fabricarea arcurilor se obțin prin trefilare sau laminare la rece.

Arcurile din oțeluri carbon trefilate sau laminate la rece se execută la temperatură obișnuită și, apoi, se supun numai unei recoaceri pentru detensionare la 180 - 250 °C. Caracteristicile mecanice înalte ale acestor arcuri se datoresc prelucrărilor anterioare la care a fost supus oțelul carbon și anume patentării și trefilării (tragere în stare rece). Oțelul carbon pentru arcuri patentat și trefilat se prezintă sub formă de sârmă.

*Patentarea* este o călire izotermă aplicată sârmelor și benzilor de oțel cu conținut mediu sau mare de carbon, pentru a se înlesni prelucrarea lor prin deformare la rece. Patentarea constă în încălzirea sârmelor cu 50 - 100 °C deasupra punctului critic  $A_{c3}$  sau  $A_{c1}$  și răcirea lor în băi de săruri topite, cu temperaturii de 450 - 550 °C. Prin încălzirea materialului la temperaturi superioare punctelor critice corespunzătoare se obține austenita. La răcire, prin trecerea sârmelor prin băile de săruri topite, austenita se transformă în întregime în troostită sau bainită superioară, oțelul obținând o înaltă rezistență mecanică și o mai mică ecrusare a suprafeței în procesul întinderii. De asemenea, sârmele patentate se deformează ușor la trefilare, suportând grade de reducere mari fără să se rupă, obținându-se caracteristici mecanice ridicate.

Rezistența de rupere la tracțiune scade cu mărirea diametrului nominal al sârmei; deci, cu cât gradul de deformare este mai mare și numărul de reduceri a secțiunii sârmei este mai mare, cu atât valoarea rezistenței crește. În general, sârma patentată și trefilată are o rezistență de rupere la tracțiune mai mare decât sârmele din oțeluri aliate supuse unui tratament termic de călire urmat de revenire.

În figura 4.13 este arătată rezistența de rupere la tracțiune a sârmelor din oțeluri patentate și trefilate comparativ cu a sârmelor călite și revenite, în funcție de diametrul nominal al sârmei.

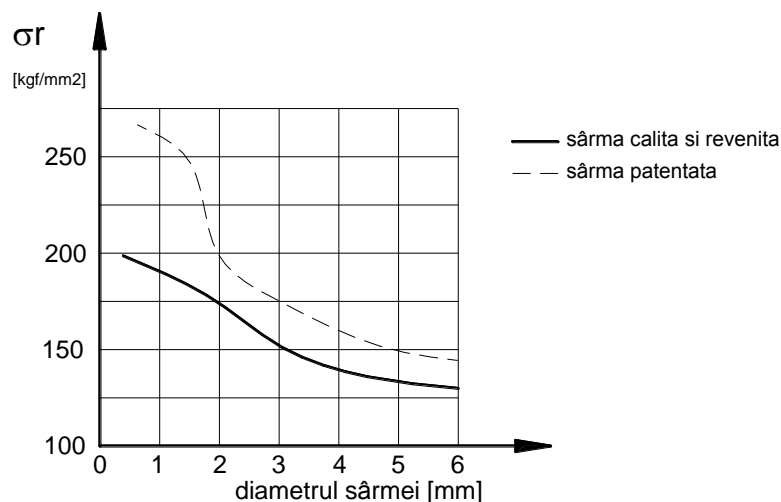


Fig. 4.13 Variația rezistenței sârmei din oțel în funcție de diametru

Se constată că, în special în domeniul diametrelor mici (până la 2 mm), diferențele între valorile rezistențelor de rupere la tracțiune sunt mai accentuate, ele micșorându-se cu creșterea diametrului nominal.

În ceea ce privește rezistența la oboseală, sârmele din oțeluri trase la rece sunt inferioare calitativ sârmelor tratate termic prin călire și revenire.

### 4.2.3. Tratamente termice secundare aplicate arcurilor

#### 4.2.3.1 Tratatamentul termic de călire

Tratatamentul termic de călire-revenire este influențat de dimensiunile relativ reduse ale arcurilor. O călire prost aplicată duce la fragilitate, duritate neuniformă, deformații și fisuri. Operația de călire-revenire trebuie condusă astfel încât să se obțină o structură care să dea arcului o rezistență suficientă și, în același timp, tenacitate și limită elastică superioară.

În urma călirii, în toată secțiunea barei arcului, se urmărește obținerea unei structuri martensitice fine.

Calitatea tratamentului termic de călire al arcurilor, depinde de următorii factori:

- *compoziția chimică a oțelului*, care trebuie să corespundă din punct de vedere al călibilității (adâncimea stratului călit).

În general, toate elementele de aliere care cu fierul  $\gamma$  formează soluții solide, măresc călibilitatea. Această influență este totuși diferențiată.

Elementele de aliere contribuie, de asemenea, la formarea unei structuri de martensită fină.

- *temperatura de călire și durata de menținere* la această temperatură, care trebuie să asigure completa transformare a perlitei și feritei în austenită, dar

totodată să nu fie depășite ca să nu se producă o creștere exagerată a grăunților de austenită formați (supraîncălzire).

Dintre elementele obișnuite de aliere ale oțelului pentru arcuri, manganul dă acestuia o sensibilitate ridicată la supraîncălzire. Un oțel supraîncălzit duce la o martensită grosolană și, în final după revenire, structura obținută posedă proprietăți mecanice scăzute, îndeosebi reziliență scăzută.

Temperatura de călire și durata optimă se stabilesc pentru fiecare calitate de oțel și dimensiune de arc, prin încercări prealabile, asociate cu un control metalografic și de duritate.

- *viteza de încălzire*, care, cu cât este mai mică cu atât temperatura la care are loc transformarea este mai mică și durata transformării mai mare.

Încălzirea arcurilor se poate face, practic, cu viteză nelimitată, de regulă prin introducerea încărcăturii (coșului cu arcuri) direct în cuptorul încălzit la temperatura prescrisă pentru austenitizare.

- *viteza de răcire*, are o influență hotărâtoare asupra formării martensitei în toată secțiunea materialului arcului. Dacă viteza cu care se răcește arcul nu este suficient de mare încât să se asigure și în miezul barei transformarea austenitei în martensită, apar structuri nedorite ca perlita, care provoacă tasarea timpurie a arcului, sau troostita de călire. Troostita de călire, care se obține la viteze de răcire superioare transformării perlitice, dar inferioare transformării martensitice, prezintă cementita sub formă de lamele, ceea ce face oțelul fragil chiar și după revenire, întrucât temperatura de revenire nu poate realiza transformarea cementitei.

Structura obținută în urma unei căliri în condiții optime corespunde unei martensite fine, dar cu cât conținutul în carbon este mai ridicat, cu atât probabilitatea de a găsi austenită reziduală este mai mare.

Viteza de răcire trebuie să fie mai mare, mai ales în intervalul de temperaturi 600 - 450 °C, când austenita prezintă nestabilitatea cea mai accentuată, transformarea ei ducând în acest caz la troostită de călire.

Viteza de răcire trebuie să fie relativ mică în intervalul de temperatură 300 - 200 °C (în jurul temperaturii de formare a martensitei), pentru a diminua tensiunile termice datorită răcirii.

În funcție de aceste două caracteristici pe care trebuie să le posede un mediu de răcire, se alege de preferință drept mediu de răcire uleiul, care în intervalul de temperatură 600 - 450 °C posedă o viteză de răcire de cca. 130 °C/s, iar în intervalul de temperatură 300 - 200 °C de cca. 25 °C/s.

În cazul oțelurilor carbon, viteza de răcire în intervalul de temperatură 600 - 450 °C trebuie să fie deosebit de mare, așa încât uleiul nu mai corespunde ca mediu de răcire. În acest caz se folosește apa, care prezintă o viteză de răcire de cca. 500 °C/s pentru intervalul de temperatură 600 - 450 °C și de cca. 260 °C/s pentru intervalul 300 - 200 °C.

Viteza de răcire ridicată în jurul punctului martensitic este cauza frecventelor crăpături la care este expus, după călire, oțelul carbon.

Prin călire obișnuită, într-un singur mediu, urmată de revenire, nu se realizează o suficientă eliminare a tensiunilor interne, așa încât pentru arcurile cu toleranțe foarte restrânse de funcționare, se aplică cu rezultate mai bune călirea în trepte sau chiar călirea izotermă, care conduc la o eliminare mai completă a tensiunilor interne și la proprietăți mecanice mai ridicate.

Călirea întreruptă în cazul arcurilor este dificil de realizat.

*Călirea în trepte* constă în călirea piesei în două medii de răcire. Martensita obținută este transformată ulterior, prin revenire, în sorbită. Practica acestei căliri presupune cunoașterea temperaturii de început de transformare a austenitei în martensită, temperatură care depinde de compoziția chimică a oțelului respectiv și îndeosebi de conținutul în carbon.

În figura 4.14 se dau curbele de început ( $M_s$ ) și sfârșit ( $M_f$ ) ale transformării austenitei în funcție de conținutul în carbon.

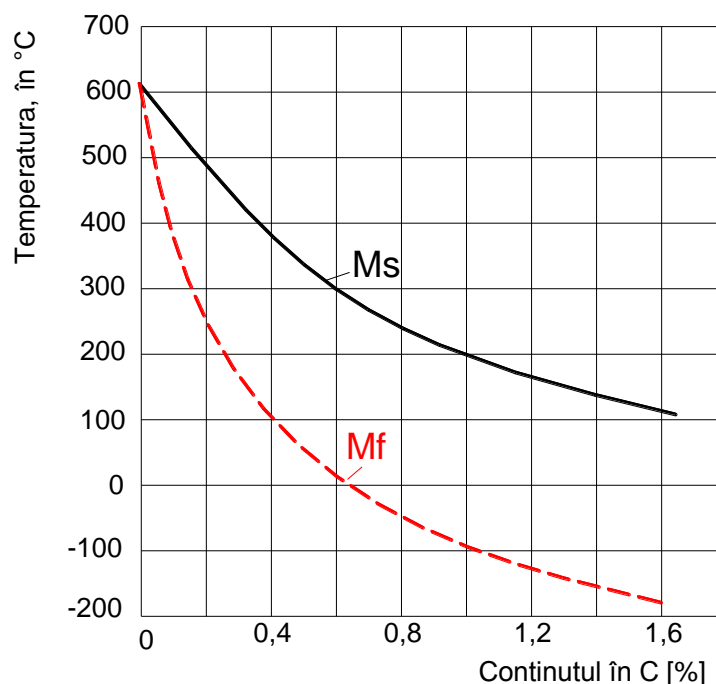


Fig. 4.14 Curbele transformării austenitei

Arcul încălzit la temperatura prescrisă pentru călire, este răcit întâi într-un mediu cald, la o temperatură puțin superioară temperaturii de început de transformare a austenitei în martensită (în jurul temperaturii de 250 °C), menținut la această temperatură un timp suficient ca toate punctele arcului să ia temperatura respectivă, apoi răcit din nou cu viteză mică într-un mediu cu temperatura de 40 - 60 °C.

În prima treaptă de răcire, austenita rămâne neschimbată și de abia în a doua treaptă austenita trece în martensită (are loc călire propriu-zisă).

Schematic, călire în trepte se poate urmări pe figura 4.15 (curba 2), comparativ cu călire obișnuită într-un singur mediu (curba 1). Este de remarcat faptul că timpul de menținere în prima baie de răcire nu trebuie depășit ca să nu aibă loc transformarea austenitei; în diagramă, segmentul *ab* nu taie curba de început de transformare a austenitei.

Acest procedeu de călire duce la apariția unor tensiuni interne termice reduse, deoarece răcirea se împarte în două etape. De asemenea transformările în diferitele puncte ale arcului se produc simultan. Acest mod de călire este indicat

arcurilor de dimensiuni reduse, executate din oțeluri care se călesc în apă (oțeluri carbon și oțeluri slab aliate).

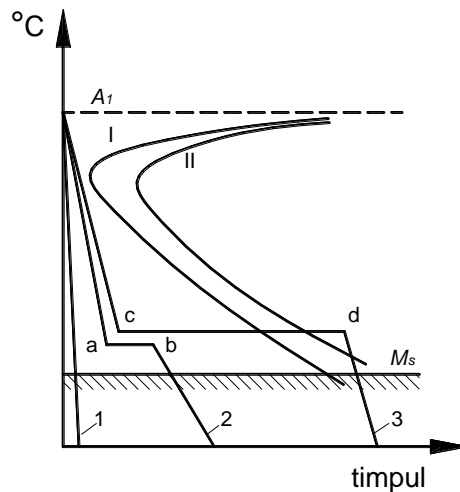


Fig. 4.15. Curbele de răcire pentru diferite tipuri de călire

*Călirea izotermă* a arcurilor are drept scop transformarea austenitei la temperatură ridicată în bainită, o structură care dă oțelului caracteristici mecanice superioare, îndeosebi rezistență la oboseală, reziliență ridicată pentru durități de asemenea ridicate.

Călirea izotermă constă din răcirea rapidă a arcurilor într-un mediu cald a cărui temperatură să asigure transformarea austenitei în bainită (figura 4.15, curba 3), după care urmează o răcire până la temperatura mediului ambiant. Durata de menținere în mediul cald, care nu trebuie să depășească temperatura de 450 °C (mai ales pentru arcurile din oțel susceptibil la fragilitatea de revenire de ordinul doi), trebuie să fie suficient de mare pentru ca în acest timp să se termine transformarea izotermică a austenitei.

În diagramă se vede că segmentul *cd* taie atât curba *I* de început, cât și curba *II* de sfârșit de transformare a austenitei, așa încât răcirea ulterioară se poate face cu orice viteză, aceasta nemaiavând nici o influență asupra structurii.

O călire izotermă corect condusă în ce privește temperatura și timpul de menținere în baia de călire, face inutilă operația de revenire. Transformarea austenitei făcându-se la temperatură ridicată, tensiunile interne care apar sunt reduse, așa încât arcurile călite în acest mod nu necesită de obicei nici un tratament termic de recoacere de detensionare.

Călirea izotermă se aplică numai oțelurilor aliate, caracterizate printr-o durată mare de stabilitate a austenitei în oțel la temperaturi mult inferioare punctelor critice.

Pentru fiecare oțel în parte trebuie să se cunoască curbele transformării izoterme a austenitei în funcție de care se poate stabili temperatura și durata menținerii în baia de călire.

În figura 4.16 sunt date curbele de transformare izotermică a austenitei în cazul unui oțel eutectoid. Curba *I* indică începutul transformării, curba *II* indică sfârșitul transformării, iar curba întreruptă indică transformarea austenitei în proporție de 50 %. Pe diagramă mai sunt indicate și structurile care se obțin în cazul călirii izoterme la diferite temperaturi, cu duritatea Brinell corespunzătoare.

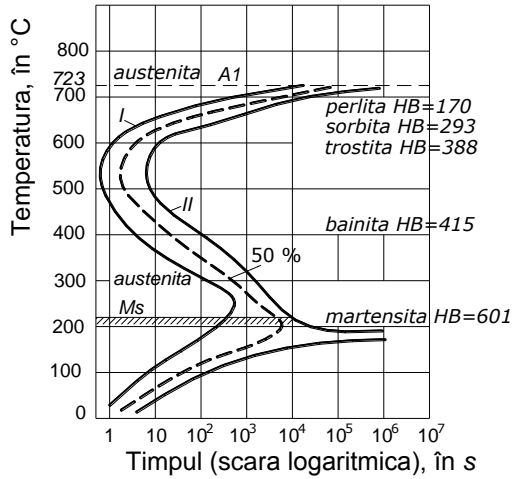


Fig. 4.16. Curbele de transformare izotermică a sustenitei

**4.2.3.2 Tratatamentul termic de revenire**

Arcurile nu se pot utiliza în starea corespunzătoare călirii pentru martensită. Ele trebuie supuse unui tratament termic de revenire, prin care se urmărește mărirea tenacității, reducerea durității și reducerea tensiunilor interne.

O mare influență asupra acestui proces o au temperatura de revenire și durata menținerii la această temperatură.

Modificările care apar la încălzirea unui oțel cu 0,5 % C, călit în prealabil pentru martensită, se pot urmări în figura 4.17.

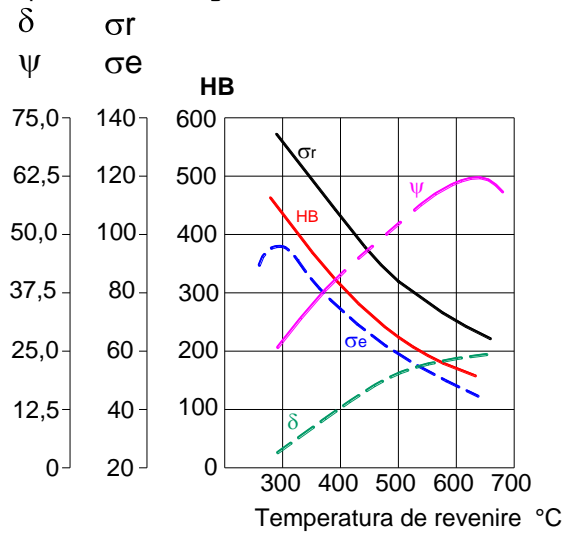


Fig. 4.17. Curbele de variație ale caracteristicilor mecanice în funcție de temperatura de revenire

În figură sunt reprezentate curbele de variație în funcție de temperatură ale : alungirii specifice la rupere  $\delta$  %, găturii specifice  $\psi$  %, duriității Brinell HB, limitei de elasticitate  $\sigma_e$  și rezistenței la rupere  $\sigma_r$ .

Curbele arată că pe măsura ridicării temperaturii de revenire, începând de la 250 °C, rezistența oțelului, cu excepția limitei de elasticitate (proportionalitate), scade, iar reziliența crește.

Modificarea apreciabilă a proprietăților mecanice începe la temperatura de 400 °C, iar la temperaturi de revenire cuprinse între 550 - 600 °C se ajunge la o îmbinare optimă a proprietăților mecanice, caracterizată printr-o rezistență suficientă și o reziliență ridicată. Oțelul supus unei asemenea reveniri înalte prezintă constituentul structural de sorbită globulară.

Arcurilor supuse la sarcini dinamice li se aplică revenirea la temperaturi care duc la obținerea sorbitei globulare. Celor cărora li se cere o rezistență și o duritate mai ridicate, revenirea se face în jurul temperaturii de 500 °C, când se obține o structură troosto - sorbitică. Constituentul denumit troostită de revenire, se obține prin revenirea oțelului la temperaturi de 300 - 450 °C. Datorită dispersiei fine a cementitei, troostita de revenire este un constituent tenace, spre deosebire de troostita de călire care, din cauza cementitei lamelare, este casantă.

Formarea structurilor de revenire se bazează pe un proces de difuziune a carbonului, proces care este ușurat nu numai de temperatura ridicată, ci și de durata menținerii la această temperatură. Deoarece modificările structurale care intervin în timpul procesului de revenire sunt însoțite și de modificări în volum (diferenții constituenți având volume diferite) pentru a se evita apariția de crăpături, încălzirea trebuie să se facă treptat, temperatura cuptorului la introducerea arcului trebuie să fie cu cca. 150 °C mai mică decât temperatura prescrisă revenirii.

*De reținut că revenirea trebuie aplicată imediat după călire.*

Structura oțelului supus revenirii este hotărâtoare în obținerea unei structuri de revenire cu o dispersie fină a cementitei. Influența dăunătoare a grăuntelui de austenită mult crescut cu ocazia supraîncălzirii oțelului în timpul călirii se manifestă după revenire și se resimte mai ales asupra rezistenței arcului.

Structura optimă de călire, din care să rezulte o structură optimă de revenire, o constituie *martensita fină*, prezentă în toată secțiunea arcului.

Viteza de răcire, după revenire, trebuie să fie redusă pentru a se evita apariția unor noi tensiuni remanente de natură termică. În cazul oțelurilor care prezintă sensibilitate la fragilitate după revenire la temperaturi înalte și anume la temperaturi care depășesc 500 °C, răcirea lentă este contraindicată. În figura 4.18 se poate urmări efectul pe care îl are asupra rezilienței o răcire bruscă în comparație cu una lentă, în cazul unui oțel crom-nichel.



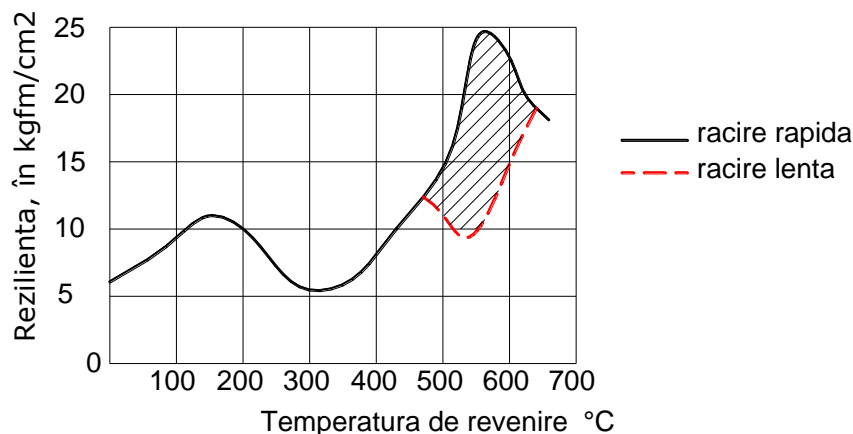


Fig. 4.18. Variația rezilienței în funcție de temperatură de revenire

Fenomenul de micșorare a rezilienței, când răcirea de la temperatura de revenire ridicată se face încet, este numit „fragilitate de revenire de ordinul doi” sau „fragilitate de revenire reversibilă”.

Curba din figura 4.18 pune în evidență existența a încă un domeniu de reziliență scăzută, între 200 și 400 °C. Această fragilitate, numită „fragilitate de ordinul întâi” sau „fragilitate de revenire ireversibilă” apare independent de condițiile de răcire și poate fi înlăturată numai printr-o revenire la o temperatură mai înaltă. Fragilitatea de ordinul întâi prezintă, într-un grad mai mare sau mai mic, toate oțelurile.

Fragilitate de revenire de ordinul întâi și de ordinul doi prezintă oțelurile al căror conținut de fosfor depășește 0,05-0,06 %, adică depășește limita admisă din oțelurile carbon de calitate, precum și oțelurile cu un procent ridicat de mangan. Cromul dă de asemenea acest neajuns oțelului, mai ales când oțelul conține nichel și un procent ridicat de mangan. Molibdenul și wolframul reduc această sensibilitate a oțelurilor.

Tensiunile termice care apar cu ocazia răcirii bruște a oțelurilor care manifestă sensibilitate la fragilitatea de ordinul doi, se pot elimina printr-o recoacere de detensionare la temperatură coborâtă, urmată de răcire lentă.

Structura finală, poate fi trostită de revenire, sau trostită de revenire și o cantitate mică de sorbită. În cazul oțelurilor aliate cu Cr și alte elemente care formează carburi mai pot să apară în structură, pe lângă constituenții menționați, o cantitate de carburi ale acestor elemente.

### **4.3. Determinarea regimurilor optime de tratament termic ale arcurilor**

#### **4.3.1 Generalități**

Arcurile sunt piese care prin forma și caracteristicile lor fizico-mecanice ajung la deformații elastice relativ mari sub acțiunea forțelor exterioare, revenind la forma inițială după îndepărtarea acestor forțe.

Principala caracteristică mecanică pe care trebuie să o aibă arcurile pentru a corespunde la solicitări este limita de curgere, care trebuie să fie superioară și cât mai apropiată de valoarea rezistenței la tracțiune.

Datorită alternanței sensului solicitărilor, arcurile trebuie să prezinte rezistență bună la oboseală. Deasemenea trebuie să aibă rezistență bună la temperaturi mari și la coroziune, uneori.

În funcție de condițiile de solicitare, de forma și dimensiunile lor, arcurile se execută din bare, benzi, table sau sârme din oțeluri carbon de calitate, oțeluri aliate cu crom, mangan, siliciu, vanadiu, molibden sau wolfram sau aliaje speciale pe bază de nichel (pentru arcurile destinate să funcționeze la temperaturi mai mari de 400 °C și în condiții de coroziune).

Arcurile înfășurate la cald sunt supuse, după înfășurare, unui tratament termic de călire martensitică pătrunsă, urmată de revenire medie sau joasă pentru descompunerea numai parțială a martensitei și păstrarea unor valori relativ mari ale caracteristicilor de rezistență, plasticitate și tenacitate.

Dintre parametrii încălzirii pentru austenizare în vederea călirii, o importanță deosebită o au cei privind evitarea decarburării și supraîncălzirii. Datorită conținutului relativ ridicat de carbon și, în unele cazuri, de siliciu, straturile superficiale trebuie protejate împotriva decarburării. În acest scop este necesar să se folosească cuptoare cu atmosferă controlată neutră sau băi de săruri neutre.

Parametrii tehnologici de tratament termic (viteza de încălzire, temperatura maximă de încălzire, durata menținerii la această temperatură și viteza de încălzire) se stabilesc în funcție de o serie de factori dintre care cei mai importanți sunt : compoziția chimică, starea structurală și de tensiuni a materialului înainte și după tratamentul termic, forma, dimensiunile și destinația produselor, mărimea și alcătuirea încărcăturii, caracteristicile funcționale ale utilajelor.

Prin stabilirea tipului de tratament termic aplicat unui anumit tip de arc, se fixează între anumite limite valorice numai o parte dintre parametrii tehnologici : temperatura de încălzire pentru călire și revenire, durata menținerii la aceste temperaturi și valoarea vitezei de răcire în raport cu viteza critică de călire.

#### **4.3.2 Experimentări de laborator privind optimizarea regimurilor de tratament termic**

Optimizarea tratamentului termic, mai ales a operațiilor de călire și revenire, sunt importante pentru comportarea în exploatare a unui arc, având în vedere solicitările mari și complexe care apar.

Programul experimental destinat acestei optimizări s-a desfășurat pe probe de material furnizate de către societatea constructoare de arcuri, din aceeași șarjă de material (50CrV4) ca și cel folosit la producția curentă. Determinarea parametrilor tehnologici s-a făcut conform normativelor de material de origine germană, pe baza experienței existente în tratamentul materialelor similare și a

constatărilor făcute cu ocazia vizitei de studiu. Astfel, s-a pornit de la următoarele informații ce rezultă din analiza documentelor puse la dispoziție:

#### *Tratamentul termic de călire*

1. Duritatea după călire constatată pe probe martor este mai mică decât cea scontată pentru acest gen de materiale (57 - 65 HRC după proba Jominy), fapt care poate fi pus pe seama unei ușoare abateri de la situația optimă. Duritatea mai mică se asociază, de obicei, unei rezistențe mecanice mai scăzute și impune tratamente de revenire cu temperaturi sau durate mai scăzute, fapt care reduce capacitatea portantă a arcului. Din aceste motive, se consideră critică optimizarea tratamentului de călire.

2. De asemenea, ridică semne de întrebare împrăștierea statistică prea mare a valorilor de duritate măsurate pe aceeași probă (de ex : min. 52 – max. 57), ceea ce indică, probabil, o temperatură prea scăzută la intrarea în baia de călire așa numitele „pete moi”, conținând aglomerări de ferită.

Pentru evitarea acestei situații, următoarele aspecte se cer urmărite, cu precădere:

- temperatura de la care se face călirea, în special, ca ea să nu fie prea mică ;
- răcirea cât mai energică, pe baza agitării puternice a băii de ulei sau a pieselor în baie.

- distanța prea mare între cuptor și baia de călire existentă actualmente face ca o parte din răcire să se facă în aer, adică lent. Proporția prea mică de martensită realizată prin călire va produce o duritate mai mică. Din acest motiv, s-a optat la încercări pentru valoarea maximă a intervalului de temperatură recomandat, adică valoarea de 860°C (unii producători ai acestui material recomandă ca maxim valoarea de 875 °C). De asemenea, se consideră că, în mod practic, șarja nu va ajunge în mod real la temperatura cuptorului, ci cu 10 – 20 °C mai jos. De aceea, numeroși autori și practica tratamentelor termice indică *reglarea cuptorului cu 10 – 20 °C mai sus*; În cazul oțelului de față o eventuală supraîncălzire nu este periculoasă.

Pentru determinarea temperaturii optime de călire s-a apelat la metoda călirilor succesive, în intervalul 820...870 °C, efectuate pe 6 probe, în condiții de laborator.

Rezultatele verificărilor de duritate sunt consemnate în tabelul 4.1 și figura 4.19

Tabel 4.1.Valorile de duritate ale probelor călite experimental la diferite temperaturi

NR. CRT.	T <sub>inc</sub>	T <sub>cuptor</sub>	t <sub>inc</sub>	MEDIU CĂLIRE	DURITATE CĂLIRE HRC	DURITATE MEDIE
1	820	840	30	ulei	51,6; 52,8; 51,9; 52,3	52,1
2	830	850	30		53,0; 53,6; 52,9; 54,1	53,4
3	840	860	30		55,5; 54,9; 54,0; 55,0	54,8
4	850	870	30		56,9; 57,0; 55,8; 57,5	56,8
5	860	880	30		57,7; 58,5; 58,0; 58,5	58,1
6	870	890	30		58,2; 59,1; 59,5; 59,5	59,0

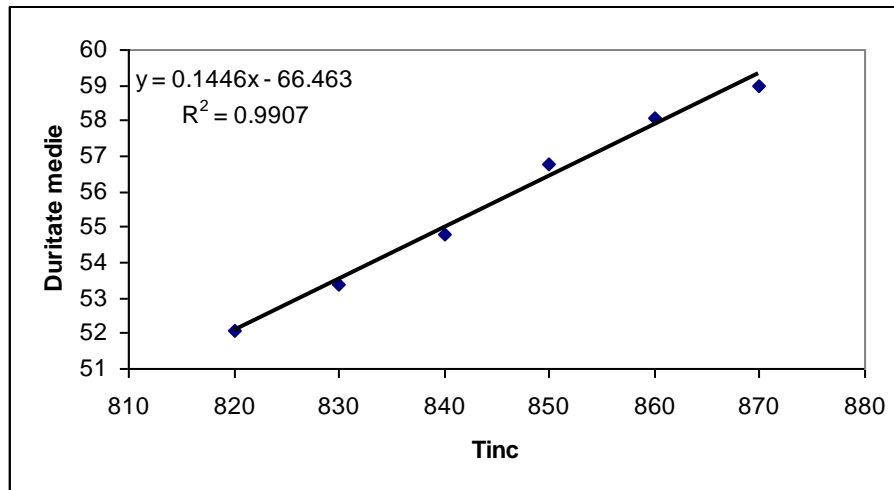


Fig. 4.19 Variația durității în funcție de temperatura de călire

După analizarea rezultatelor obținute, au fost considerați ca optimi următorii parametri:

- temperatura de călire  $T_{inc} = 860$  °C;
- temperatura cuptorului  $T_{cuptor} = 880$  °C;
- durata de încălzire:  $t_{inc} = 30$  minute.

Pentru verificarea corectitudinii opțiunii alese, tot în condiții de laborator, a fost călit experimental un lot de 8 probe, cu parametrii de mai sus.

Valorile de duritate, măsurate în câte 4 puncte pentru fiecare probă, fiind cuprinse în tabelul 4.2

Tabel 4.2. Valorile de duritate ale probelor călite experimental la temperatura de călire considerată optimă

NR. CRT.	$T_{inc}$	$T_{cuptor}$	$t_{inc}$	MEDIU CĂLIRE	DURITATE CĂLIRE HRC	DURITATE MEDIE
1	860	880	30	ulei	59,6; 58,9; 58,1; 57,8	58,6
2	860	880	30		57,4; 58,5; 57,8; 58,9	58,1
3	860	880	30		58,9; 60,1; 58,3; 58,1	58,8
4	860	880	30		58,8; 58,5; 59,6; 59,3	59,0
5	860	880	30		57,4; 58,1; 59,1; 58,6	58,3
6	860	880	30		57,8; 58,8; 59,4; 58,3	58,5
7	860	880	30		58,3; 58,8; 58,0; 58,6	58,4
8	860	880	30		57,3; 58,8; 58,0; 58,6	58,1

Studiul metalografic (figura 4.20) a confirmat calitativ prezența după călire a unei structuri de călire corespunzătoare în aceste cazuri, dominată de martensită fină, cu aspect acicular.

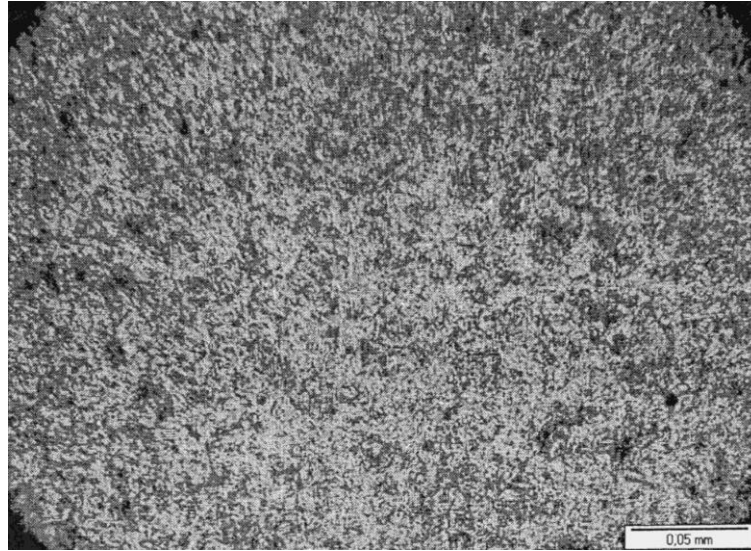


Fig. 4.20 Structura de călire a oțelului 50CrV4 (860°C/30 min-ulei)

În concluzie, se constată următoarele:

- parametrii propuși permit realizarea unei durități de valori ridicate, în jur de 58 HCR, ceea ce confirmă datele din normativele de material;
- un lucru important de semnalat este că valorile de duritate sunt uniforme, practic împrăștierea rezultatelor, atât la aceeași probă, cât și la probe diferite, fiind în interiorului intervalului de precizie a aparatului de măsurat, ceea ce înseamnă că din punct de vedere al compoziției, materialul folosit este corespunzător, el răspunzând bine la tratamentul termic de călire.
- valorile diferite ale durităților pe probe martor efectuate în atelierul societății se datorează, probabil, unei răcirii premature la deplasarea dintre cuptor și baie, eventual unei răcirii mai puțin energice în baie pentru unele probe.

De menționat că, la încălzirea în șarjă, duratele de încălzire vor fi mai lungi, o prelungire peste optim a duratei nefiind dăunătoare la încălzirea în atmosferă controlată.

Pentru experimentele ce se vor realiza în secție se recomandă :

- reglarea cuptorului de tratament la valori mai mari decât cele folosite anterior, adică 880°C sau chiar 890 °C;
- reducerea duratei de deplasare dintre cuptor și baie de răcire;
- se cere urmărit ca răcirea în ulei să fie energetică și să se facă în toate zonele piesei. De asemenea, răcirea continuă a uleiului din baie de răcire trebuie să evite încălzirea uleiului la peste 50 – 60 °C.

*Tratamentul termic de revenire*

Tratamentului termic de revenire are ca scop îmbunătățirea comportării la solicitări variabile (oboseală, șocuri, etc.).

Revenirea fiind bazată pe un fenomen datorat difuziei, cu efect aditiv, regimul optim de revenire corespunzător unei anumite durități prescrise, se poate face prin adoptarea a diverse perechi de valori temperatură - timp. În anumite limite, o temperatură mai scăzută se compensează printr-o durată mai mare de revenire sau viceversa.

La solicitări dinamice mari se preferă durate mai scurte și temperaturi ridicate, deoarece dau structuri mai fine, cu tenacitate mai mare. Duratele se pot stabili prin regula „ora și țolul” adică o oră la piese cu diametrul până la 25 mm, așa cum este cazul de față. Din aceste motive, durata de revenire s-a stabilit la  $t_{inc} = 1$  oră, valorile temperaturii determinându-se experimental.

Parametrii revenirii (durată - timp) sunt puternic influențați de condițiile concrete de încălzire (mărimea și forma șarjei, recircularea aerului în interiorul cuptorului), putând apărea unele ușoare abateri față de condițiile de laborator.

Pentru determinarea temperaturii optime de revenire s-a apelat la metoda încălzirilor succesive, în intervalul 350...550 °C, efectuate pe 5 probe, în condiții de laborator.

Duritățile măsurate, după revenire, la diferite temperaturi sunt prezentate sintetic în tabelul 4.3 și figura 4.21.

Tabel 4.3 Valorile de duritate ale probelor revenite experimental la diferite temperaturi

NR. CRT.	$T_{rev}$ [°C]	$t_m$ [min]	DURITATE REVENIRE [HRC]	DURITATE MEDIE [HRC]
1	350	60	51,0; 52,2; 53,1; 52,4; 53,0	52,3
2	400	60	49,2; 48,9; 48,7; 49,0; 48,1	48,7
3	450	60	47,0; 48,2; 47,0; 46,8; 47,7	47,3
4	500	60	44,4; 43,6; 43,2; 43,8; 44,0	43,8
5	550	60	39,3; 41,4; 39,8; 38,8; 41,0	40,0

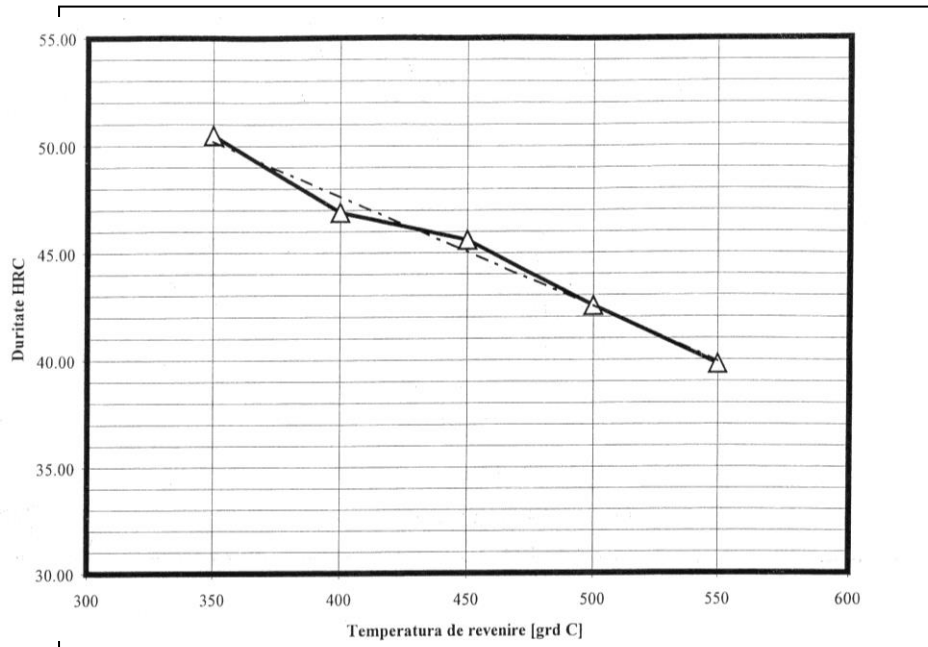


Fig. 4.21. Variația durtății în funcție de temperatura de revenire

De remarcat că, la acest tratament de revenire, valorile de duritate măsurate sunt, de asemenea, cu împrăștierea mai redusă, fapt datorat mai ales structurii de călire mai uniforme. Trebuie subliniat și în acest caz importanța deosebită a realizării corecte a călirii, care determină, în mod hotărâtor, proprietățile de material.

După cum se observă în figura 4.21, zona optimă pentru realizarea durtății prescrise se întinde din punctul de vedere a temperaturii, aproximativ pe intervalul de 400 - 450 °C, care va produce durtăți finale între 45 și 50 HRC.

Studiul metalografic relevă prezența unei structuri de revenire corecte, cu păstrarea parțială a aspectului acicular produs de călire, ușor estompat prin difuzia produsă la revenire (figura 4.22 și 4.23).

De menționat că, acesta structură are, din punct de vedere calitativ, aspect similar celor realizate pe probe din arcuri finite care s-au rupt la oboseală. Problema identificată se află însă la nivel cantitativ, în sensul că, tehnologia de tratament termic aplicată, are încă rezerve de producere a unei structuri cu proporție mai ridicată de martensită, care să prezinte proprietăți superioare.



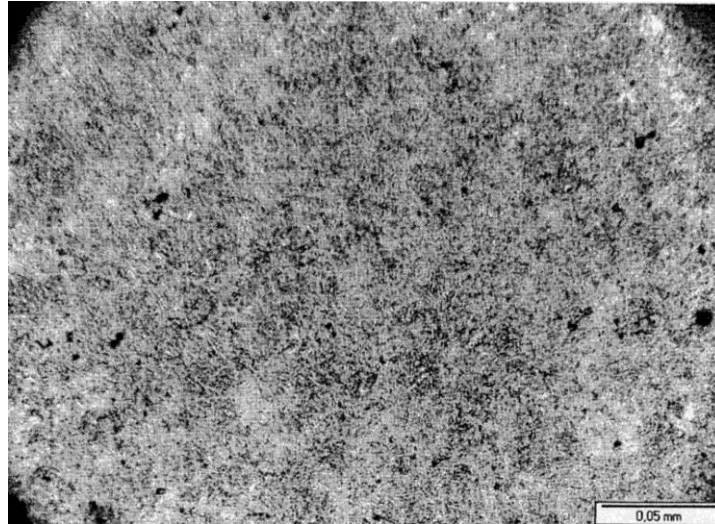


Figura 4.22. Structura de revenire a oțelului 50CrV4 (400°C/1 h/aer)

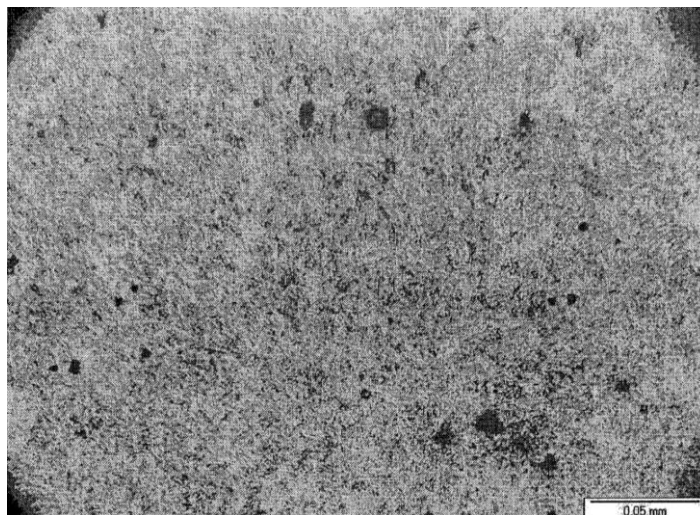


Figura 4.23. Structura de revenire a oțelului 50CrV4 (450°C/1 h/aer)

Acest interval, relativ mare, de temperatură și de duritate acceptată, face posibilă adoptarea a două strategii diferite de abordare a producerii unor arcuri cu o rezistență la oboseală acceptabilă din punctul de vedere al încercărilor impuse:

1) Varianta cea mai probabilă din punctul de vedere al datelor existente indică o posibilă cauză a rezistenței insuficiente la oboseală, existența microfisurilor din suprafață ca amorse de fisuri prin oboseală și care se propagă în timpul ciclurilor de oboseală distrugând prematur mare parte din secțiunea arcului. La aceste tipuri de arcuri cu solicitări importante de oboseală, unde se aplică tratamente de suprafață destinată reducerii probabilității de apariție superficială a microfisurilor

(așa cum par a fi cazurile analizate) o duritate mai redusă face ca ecruisarea să fie mai puternică, iar efectul tratamentului superficial mai semnificativ.

În concluzie, în cazul realizării unei căliri optime, trebuie să se adopte reveniri în jurul valorii de 450 °C/h, cu răcire în aer. Această măsură, împreună cu altele, la nivelul tehnologiei de ecruisare superficială cu bile, care se vor realiza separat, vor avea ca efect pregătirea superioară a suprafeței și îmbunătățirea comportării la oboseală.

2) Dacă rezultă că arcul este suprasolicitat din punctul de vedere al calcului de rezistență, sau eventul în imediata apropiere a zonei de solicitare maxim admisibilă pentru solicitările de oboseală, este de dorit maximizarea proprietăților mecanice ale materialului, iar duritățile să fie maxime (spre 50 HRC), ceea ce va corespunde și unei rezistențe mecanice spre valori maxime. Îmbunătățirea condițiilor de suprafață prin ecruisare trebuie și în acest caz optimizate, ținând seama de duritățile mai mari ale arcului.

#### 4.4 Concluzii

În urma cercetării efectuate remarc:

- cu parametrii din tehnologia actuală de călire s-a constatat că duritatea este mai mică decât cea scontată;
- este o „împrăștiere” mare a valorilor de duritate măsurate atât după călire cât și după revenire;
- valorile diferite ale durităților pe probe martor efectuate în atelierul societății se datorează, probabil, unei răciri premature la deplasarea dintre cuptor și baie, eventual unei răciri mai puțin energice în baie pentru unele probe;
- pentru îmbunătățirea tratamentului termic de călire și determinarea temperaturii optime de călire, am aplicat metoda „călirilor succesive” în intervalul 820...870 °C.

Din analiza rezultatelor obținute am considerat optimi următorii parametrii :

- temperatura de călire  $T_{inc} = 860$  °C;
- temperatura cuptorului  $T_{cuptor} = 880$  °C;
- durata de încălzire:  $t_{inc} = 30$  minute.

Cu acești parametrii am obținut o duritate mai ridicată, iar valorile acestor durități au fost într-un interval restrâns, practic în intervalul de precizie al aparatului de măsurat.

Studiul metalografic (figura 4.20) a confirmat calitativ prezența după călire a unei structuri de călire corespunzătoare în aceste cazuri, dominată de martensită fină, cu aspect acicular.

Pentru determinarea temperaturii optime de revenire s-a apelat la metoda încălzirilor succesive, în intervalul 350...550 °C, efectuate pe 5 probe, în condiții de laborator. Am ajuns la concluzia că intervalul optim pentru realizarea durității prescrise se întinde, din punctul de vedere a temperaturii, pe intervalul de 400 - 450 °C, care produce durități finale între 45 și 50 HRC.

De remarcat că, la acest tratament de revenire, valorile de duritate măsurate sunt, de asemenea, cu împrăștierea mai redusă, fapt datorat mai ales structurii de călire mai uniforme

Studiul metalografic relevă prezența unei structuri de revenire corecte, cu păstrarea parțială a aspectului acicular produs de călire, ușor estompat prin difuzia produsă la revenire (figura 4.22 și 4.23).

Acest interval, relativ mare, de temperatură și de duritate acceptată, face posibilă adoptarea a două strategii diferite de abordare a producerii unor arcuri cu o rezistență la oboseală acceptabilă din punctul de vedere al încercărilor impuse:

1. Varianta cea mai probabilă din punctul de vedere al datelor existente indică o posibilă cauză a rezistenței insuficiente la oboseală, existența microfisurilor din suprafață ca amorse de fisuri prin oboseală și care se propagă în timpul ciclurilor de oboseală distrugând prematur mare parte din secțiunea arcului. La aceste tipuri de arcuri cu solicitări importante de oboseală, unde se aplică tratamente de suprafață destinată reducerii probabilității de apariție superficială a microfisurilor (așa cum par a fi cazurile analizate) o duritate mai redusă face ca ecruisarea să fie mai puternică, iar efectul tratamentului superficial mai semnificativ.

În concluzie, în cazul realizării unei căliri optime, trebuie să se adopte reveniri în jurul valorii de 450 °C/h, cu răcire în aer. Această măsură, împreună cu altele, la nivelul tehnologiei de ecruisare superficială cu bile, care se vor realiza separat, vor avea ca efect pregătirea superioară a suprafeței și îmbunătățirea comportării la oboseală.

2. Dacă rezultă că arcul este suprasolicitat din punctul de vedere al calculului de rezistență, sau eventul în imediata apropiere a zonei de solicitare maxim admisibilă pentru solicitările de oboseală, este de dorit maximizarea proprietăților mecanice ale materialului, iar duritățile să fie maxime (spre 50 HRC), ceea ce va corespunde și unei rezistențe mecanice spre valori maxime. Îmbunătățirea condițiilor de suprafață prin ecruisare trebuie și în acest caz optimizate, ținând seama de duritățile mai mari ale arcului.

## CAPITOLUL 5

### STUDII PRIVIND INFLUENȚA ECRUISĂRII CU BILE ASUPRA CREȘTERII REZISTENȚEI LA OBOSEALĂ PENTRU ARCURILE ELICOIDALE

În procesul de execuție al arcurilor, în special prin operația de înfășurare, în suprafață se introduc tensiuni remanente : în exteriorul barei tensiuni de întindere iar în interior tensiuni de compresiune. Aceste tensiuni, asociate cu o amorsă de fisură, pot duce la ruperea prematură a arcurilor în exploatare sau la proba de oboseală [41].

Procesul de **ecruisare** este bazat pe efectul introducerii unor tensiuni de compresiune în suprafața arcurilor, printr-o lovire controlată cu jet de alicie.

Tratamentul superficial prin ecruisare cu bile are un efect foarte important pentru creșterea rezistenței la oboseală, tensiunile de compresiune formate pe adâncime de ordinul zecimilor de milimetri, scăzând probabilitatea de apariție a unei fisuri, care, prin propagare, vor duce la ruperea piesei, [34].

Ecruisarea arcurilor elicoidale pentru material rulant trebuie să fie făcută cât mai uniform posibil și de așa manieră încât să satisfacă prescripțiile anexei 1 din UIC 822.

#### 5.1. Controlul eficacității ecruisării prin metoda ALMEN

*Principiul metodei* : dacă o platbandă de oțel (epruvetă), fixată pe un bloc suport, este ecruisată pe una din fețele sale, aceasta se va curba, îndepărtându-se de blocul suport, fața convexă fiind cea ecruisată.

Mărimea săgeții luate este în funcție de intensitatea efectivă a jetului de alicie.

Epruveta este supusă aceluiași ciclu de ecruisare ca și arcurile, respectându-se următorii parametri :

- viteza de circulație a arcurilor în instalația de ecruisare;
- viteza de proiectare a alicelor;
- natura și dimensiunile alicelor.

*Materialul folosit* :

- epruveta ALMEN A2
  - oțel laminat la rece, având următoarea compoziție chimică : C = 0,65...0,73 % ; Si = 0,15...0,35 % ; Mn = 0,40...0,70 % ; P ≤ 0,035 % ; S ≤ 0,035 %.
  - duritate : 44...50 HRC
  - lungime : 76,2 ± 0,4
  - lățime : 19 + 0,05 - 0,1
  - grosime : 1,3 + 0,02 - 0,03
  - planeitate : ± 0,04

- port – epruveta
- duritate : 62...65 HRC

Pentru încercări (epruvetă ALMEN – port epruvetă) s-a recurs la montajul prezentat în figura 5.1:

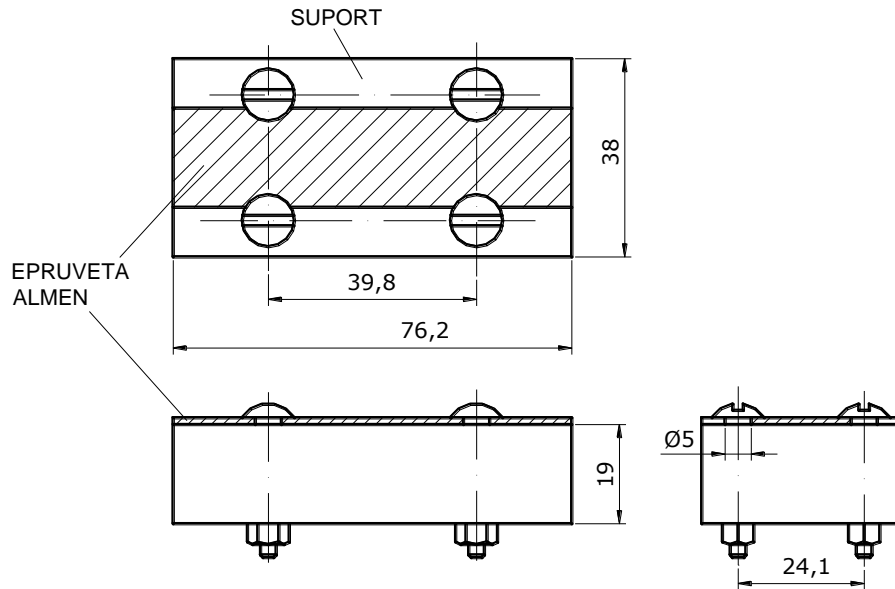


Fig. 5.1 Epruvetă și portepruvetă Almen

*Măsurători* : măsurătorile constau în determinarea curburii probei Almen.

Schema de principiu a aparatului (fig. 5.2) este un comparator cu cadran (gradat în 1/100 mm), montat pe o placă purtătoare cu 4 bile din oțel călit, formând colțurile unui dreptunghi și situate riguros în același plan. Palpatorul comparatorului iese în centrul dreptunghiului.

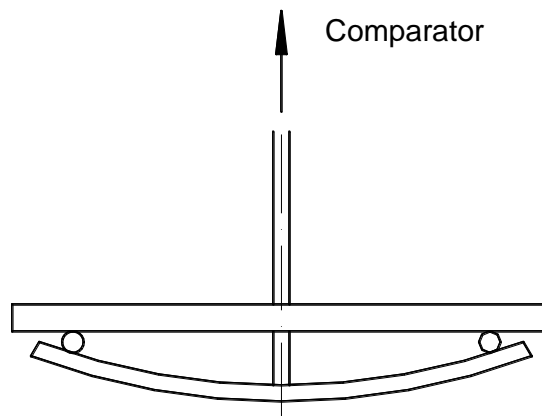


Fig. 5.2 Măsurarea săgeții probei Almen ecruisate

*Concluzia controlului eficacității ecruisării* : eficacitatea ecruisării poate fi considerată corespunzătoare dacă deformația epruvetei Almen A2 este cuprinsă între **0,4 și 0,5 mm**.

## 5.2. Analiza tehnologiei actuale

Operația de ecruisare cu bile se aplică arcurilor în stare tratată (călire și revenire), având ca scop mărirea rezistenței la oboseală. Eficiența acestei operații este demonstrată, ea putând mări rezistența la oboseală până la 10 – 15 % față de cazul unor arcuri necruisate.

Tehnologia actuală de fabricație a arcurilor prevede aplicarea unei operații de ecruisare cu bile din oțel într-o instalație "SIESSON - LEHMANN". Controlul procesului se recomandă să fie făcut vizual și cu epruvetă ALMEN, în conformitate cu norma UIC 822.0.

Analiza efectuată a relevat următoarele aspecte:

- proba Almen nu poate indica eficacitatea procesului de ecruisare decât dacă este utilizată în condiții riguros determinate;

În tehnologia actuală se folosește o singură probă Almen, montată pe o porteprevetă fixată pe un arc „martor”, conform figurii 5.3. Acest arc „martor” se ecruisează odată cu loturile de arcuri.

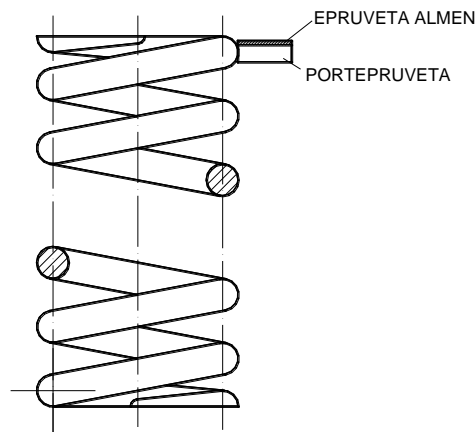
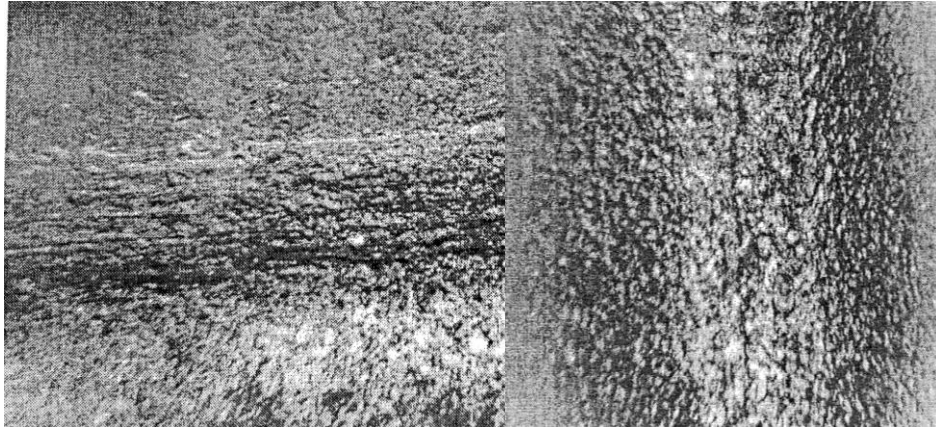


Figura 5.3 Arc „martor” cu epruveta Almen

Folosirea unei singure epruvete Almen nu poate determina eficacitatea ecruisării în toate zonele arcului (interior-exterior, sus-mijloc-jos).

- în timpul operației nu sunt urmăriți toți factorii tehnologici care pot influența procesul de ecruisare (dimensiunea bilelor, starea acestora, viteza de aruncare). Din acest motiv, se pot constata diferențe vizibile între suprafețele ecruisate pentru arcuri diferite, deși, în toate cazurile, s-au folosit pentru control epruvete Almen. În figura 5.4. se prezintă comparativ două suprafețe ecruisate. Proba 10 (figura 5.4 a) prezintă o rugozitate mai mică în comparație cu proba 17 (figura 5.4 b)





a)

b)

Figura 5.4 Aspectul macroscopic al suprafețelor ecruisate:  
a) proba 10;  
b) proba 17

Măsurătorile de rugozitate pentru cele două suprafețe indică o diferență mare între cele două probe (valori  $R_a = 4,5...6,5$  pentru proba 10 și  $R_a = 6,3...10,1$  pentru proba 17).

O valoare prea mare a energiei bilelor (dimensiuni mari și viteze mari), combinată cu o duritate mare și forme colțuroase (bile sparte), pot conduce la apariția unor cratere pe suprafața (fig. 5.5) care favorizează amorsarea fisurilor la proba de încercare la oboseală.

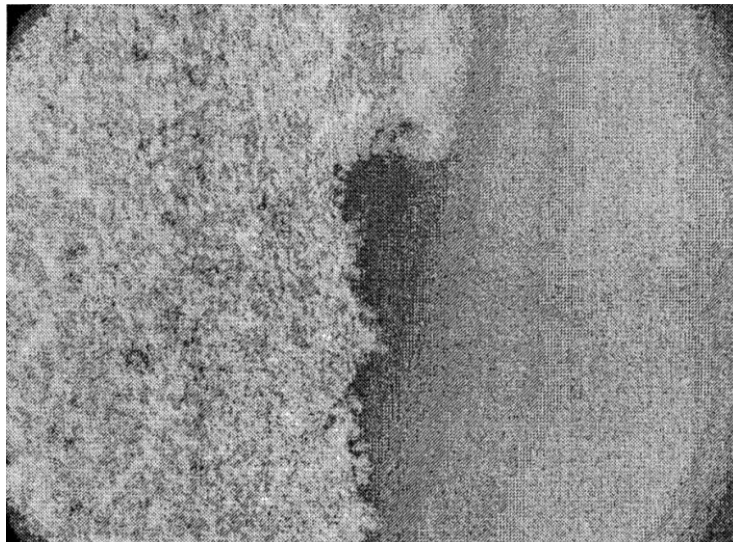


Figura 5.5 Aspectul suprafeței pe proba 7



- dispozitivul de susținere și de deplasare a arcurilor nu poate permite o ecruisare uniformă a tuturor spirelor;
- suprafețe de așezare prelucrate mecanic, ale arcurilor analizate nu sunt durificate cu bile. Se apreciază că, în cazul arcurilor rupte în zona spirei de capăt, amorsarea fisurii ar fi putut fi evitată dacă această zonă ar fi fost ecruisată.

### 5.3 Îmbunătățirea procesului de ecruisare

Având în vedere mecanismele ecruisării cu bile a arcurilor și influența puternică a acesteia asupra rezistenței la oboseală, se impune optimizarea acestei operații în sensul sporirii eficienței și al îmbunătățirii reproductibilității.

Pentru tehnologia actuală este de recomandat folosirea mai multor epruvete Almen, fixate pe portepruvete amplasate în diferite zone ale arcului, conform figurii 5.6.

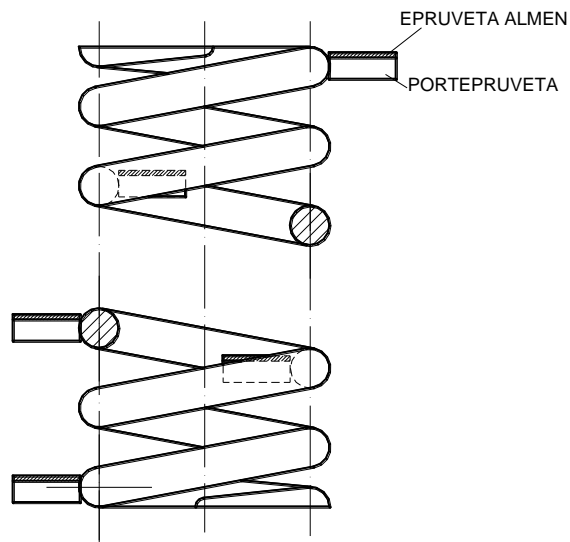


Fig. 5.6 Arc „martor” cu epruveta Almen

În acest mod se poate aprecia (în funcție de deformările probelor Almen) gradul de ecruisare în toate zonele arcului.

Pentru creșterea eficienței procesului de ecruisare cu bile, se recomandă verificarea adâncimii stratului durificat obținut în condiții tehnologice bine cunoscute.

Această determinare nu poate fi evidențiată prin măsurători de duritate (în figura 5.7 se constată diferențe minime între amprentele HV obținute la diferite adâncimi cu sarcini de 50 și 200g).

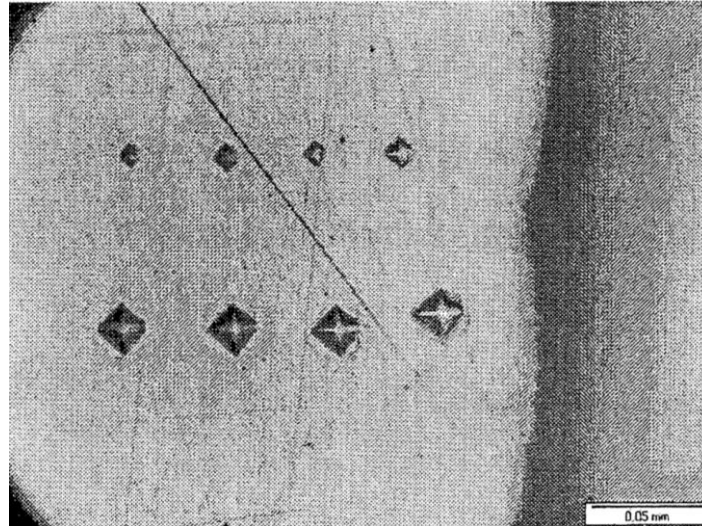


Figura 5.7 Evoluția durtății pe adâncimea ecrusării

Efectul ecrusării este, de obicei, evaluat prin proba Almen, de regulă, pe o probă martor. Această valoare reprezintă însă, un indicator global al efectului cumulat, fenomenele produse fiind mult mai complexe și descrise de mai mulți parametri (figura 5.8).

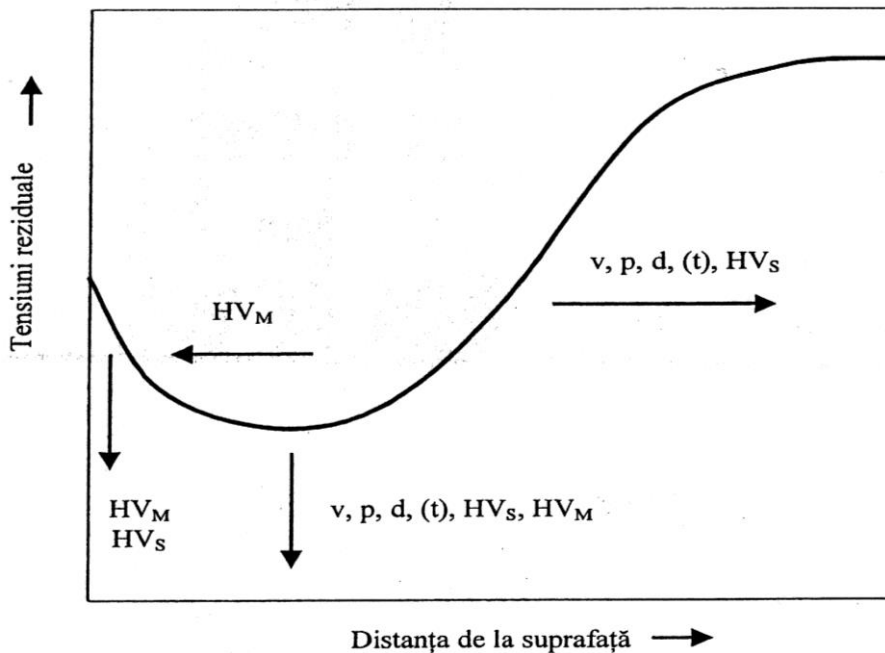


Figura 5.8 Influența parametrilor ecrusării

Parametrii ecrisării cu bile sunt următorii:

- duritatea materialului de bază	HV <sub>M</sub>
- duritatea bilelor	HV <sub>s</sub>
- diametrul bilelor	d
- viteza bilelor	v
- presiunea	p
- durata tratamentului	t

Figura 5.8 reprezintă influența pe care diferiți parametri o au asupra stratului ecrisat. Tensiunile de compresiune sunt reprezentate de către prima parte a curbei, orientată cu concavitatea în jos, caracterizată prin valoarea maximă a acestei curbe, distanța acestui maxim față de suprafață, precum și de lățimea acestui strat, [11].

Cel mai mare inconvenient posibil îl poate reprezenta un proces de ecrisare prea energetic, care să realizeze tensiuni de compresiune prea mari (curba cu concavitatea în jos este prea adâncă), având ca rezultat apariția de microfisuri și reducerea drastică a rezistenței la oboseală. După cum se poate vedea, această valoare este influențată de  $v$ ,  $p$ ,  $d$ ,  $(t)$ ,  $HV_s$ ,  $HV_M$  și într-o oarecare măsură de durata de tratament.

Așadar, căile de eliminare a microfisurilor sunt următoarele:

1. arcurile să aibă durități medii sau spre minim față de valoarea maxim acceptată (50 HRC);
2. materialul bilelor să nu prezinte durități exagerate;
3. diametrul bilelor să nu fie prea mare. O mențiune specială pentru distribuția acestor diametre, bilele trebuind să fie sortate, fără muchii sau ciupituri și fără alte deșeuri;
4. presiunea de expulzare a bilelor să fie redusă, în cazul în care se constată apariția microfisurilor.

#### 5.4 Alte metode de îmbunătățire a procesului de ecrisare

O metodă nouă de îmbunătățire a comportării la oboseală este realizarea unui tratament special al suprafeței arcului. Această metodă a fost introdusă cu succes de către firma MAN GmbH din Munchen în colaborare cu Boehler Federn GmbH din Duesseldorf și constă în introducerea unei operațiuni suplimentare de ecrisare cu bile, la cald, succesiv celei de ecrisare la rece, corespunzătoare schemei clasice de tratament. Rezultatele obținute indică o mărire până la dublu a rezistenței la oboseală față de variantele clasice de execuție a arcurilor. În esență, acest tratament constă în următoarele operații:

- operația de înfășurare la cald ale arcului;
- tratamentul termic de îmbunătățire (călire și revenire);
- ecrisarea la rece a suprafeței prin lovire cu bile (ecrisare normală);
- ecrisarea la cald (250 - 300 °C) a suprafeței prin lovire cu bile (ecrisare pentru tensionare).

Cercetările au relevat următorul mecanism de îmbunătățire a rezistenței la oboseală:

- ecrisarea la temperatură ambiantă (la rece) și apariția unor dislocații sau linii de alunecare în rețeaua cristalină a aliajului metalic, care produc tensiuni de compresiune pe adâncimi de ordinul zecimilor de milimetri. Pe parcursul încercării arcului sau în exploatare are loc un fenomen de „descărcare” a acestor dislocații și diminuarea efectului pozitiv al ecrisării;

- carburile fine precipitate pe parcursul revenirii au efect pozitiv de fixare (pitting) al dislocațiilor și de „păstrare” a ecruisării, dar numai limitat acolo unde pozițiile dislocațiilor și ale precipitatelor coincid. Rezultă că precipitate mai fine și uniform distribuite (realizarea la temperaturi de revenire mai scăzute) vor avea un efect mai favorabil;
- dacă după ecruisarea la rece urmează o încălzire, aceasta va activa difuzia și deplasarea carburilor spre liniile de dislocație, ceea ce accentuează fixarea acestora și păstrarea ecruisării la solicitarea arcului;
- ecruisarea la cald mărește densitatea de dislocații și adâncimea stratului pe care se manifestă tensiunile remanente de compresiune.

### 5.5 Experimente privind îmbunătățirea procesului de ecruisare

Pentru a evidenția efectul ecruisării asupra proprietăților mecanice ale materialului de arc (și implicit asupra caracteristicilor arcului), din 6 bare de material s-au prelevat 12 probe care au fost supuse aceluiași tratament termic de călire și revenire. Dintre acestea, la 6 probe s-au verificat caracteristicile mecanice (rezistența la rupere  $\sigma_r$  și limita de curgere  $\sigma_c$ ) în starea călit + revenit, iar la celelalte 6 s-au verificat aceleași caracteristici în starea călit + revenit + ecruisat.

Întrucât gradul de ecruisare depinde direct de durata de acțiune a jetului de alică asupra probelor, acestea au fost ecruisate la timpi diferiți : 5, 10 și 15 minute.

Rezultatele verificărilor sunt în tabelul 5.1 și figurile 5.9, 5.10, 5.11, 5.12, 5.13 și 5.14.

Tabelul 5.1 Caracteristici mecanice obținute pe probe ecruisate

NR. PROBĂ	$\sigma_r$ c + r	$\sigma_r$ c + r + e			$\sigma_c$ c + r	$\sigma_c$ c + r + e		
		5'	10'	15'		5'	10'	15'
1	1450	1496	1560	1522	1341	1398	1470	1422
2	1487	1525	1590	1498	1351	1403	1482	1450
3	1428	1467	1532	1503	1349	1409	1476	1450
4	1520	1571	1605	1550	1415	1502	1542	1505
5	1511	1557	1610	1572	1405	1490	1533	1510
6	1490	1533	1588	1557	1370	1432	1483	1450
<i>media</i>	<i>1481</i>	<i>1525</i>	<i>1580</i>	<i>1534</i>	<i>1372</i>	<i>1439</i>	<i>1497</i>	<i>1465</i>

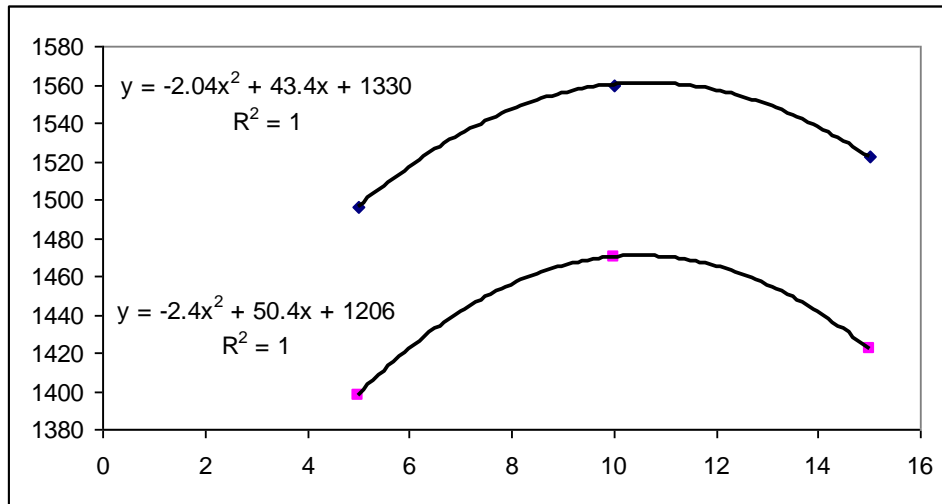


Fig. 5.9 Variația caracteristicilor mecanice în funcție de durata de ecruisare pentru proba 1

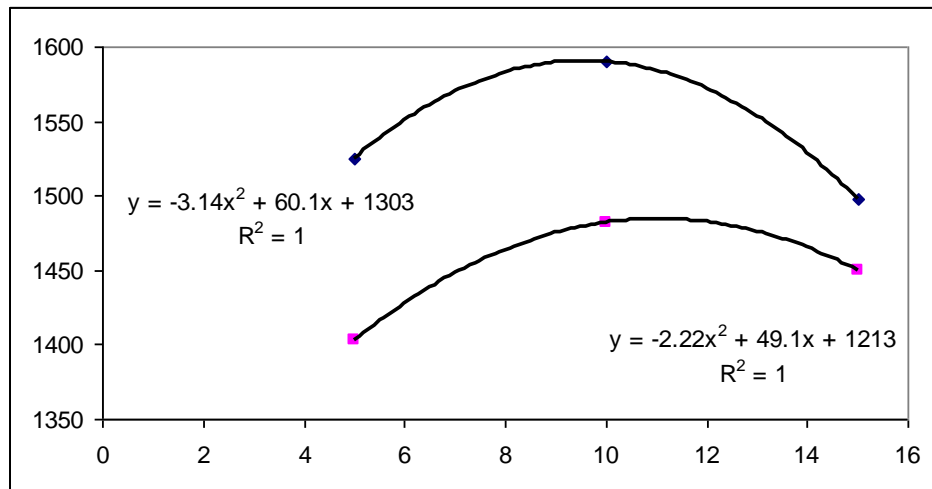


Fig. 5.10 Variația caracteristicilor mecanice în funcție de durata de ecruisare pentru proba 2

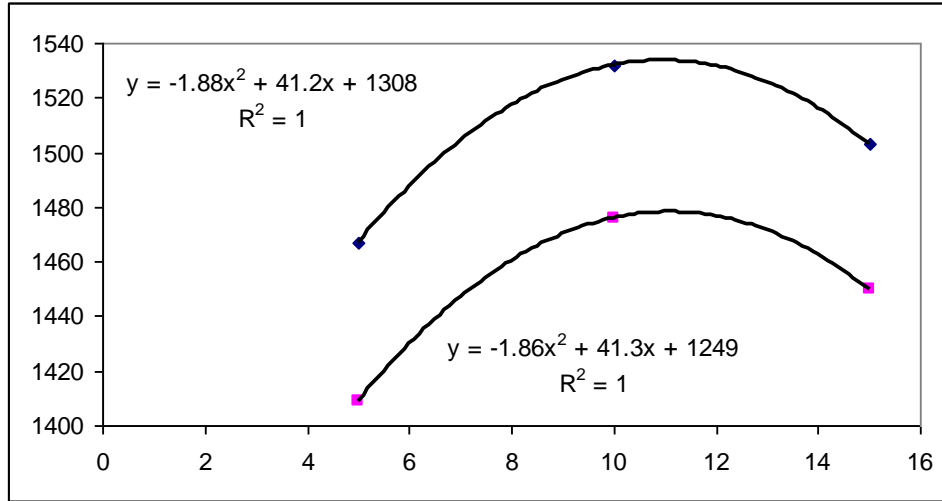


Fig. 5.11 Variația caracteristicilor mecanice în funcție de durata de ecruisare pentru proba 3

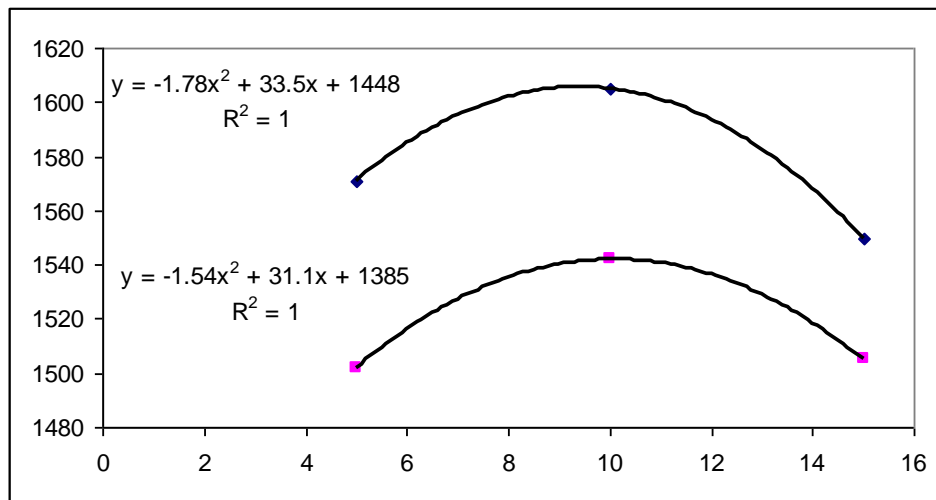


Fig. 5.12 Variația caracteristicilor mecanice în funcție de durata de ecruisare pentru proba 4

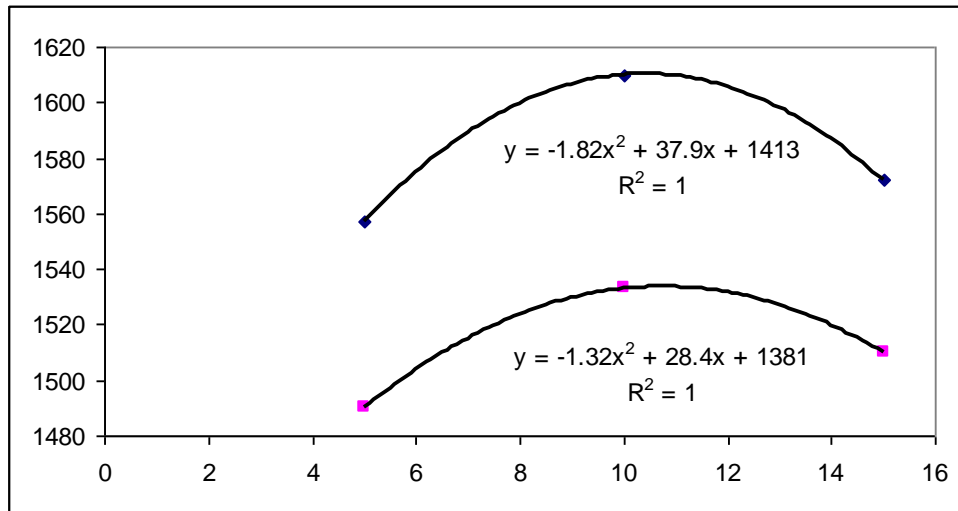


Fig. 5.13 Variația caracteristicilor mecanice în funcție de durata de ecrusare pentru proba 5

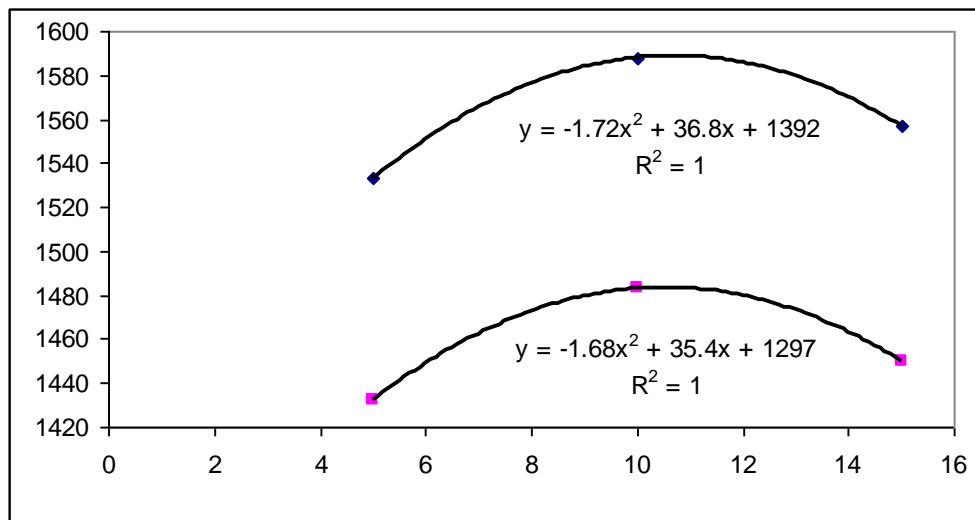


Fig. 5.14 Variația caracteristicilor mecanice în funcție de durata de ecrusare pentru proba 6

Analizând rezultatele de mai sus, durata optimă de ecrusare pentru arcurile analizate este de 10 minute.

La această durată se obțin caracteristicile mecanice cele mai bune. O durată mai mare scade aceste caracteristici și poate duce la apariția fisurilor de suprafață.



### 5.6 Concluzii

Eficacitatea ecruisării se determină cu ajutorul probei Almen. Proba Almen nu poate indica eficacitatea procesului de ecruisare decât dacă este utilizată în condiții riguros determinate.

Menționez necesitatea utilizării căilor de eliminare a microfisurilor în procesul de ecruisare:

- arcurile să aibă durități medii sau spre minim față de valoarea maxim acceptată (50 HRC);
- materialul bilelor să nu prezinte durități exagerate;
- diametrul bilelor să nu fie prea mare. O mențiune specială pentru distribuția acestor diametre, bilele trebuind să fie sortate, fără muchii sau ciupituri și fără alte deșeuri;
- presiunea de expulzare a bilelor să fie redusă, în cazul în care se constată apariția microfisurilor.

În tehnologia actuală se folosește o singură probă Almen, montată pe o porteprevetă fixată pe un arc „martor”. Acest arc „martor” se ecruisează odată cu loturile de arcuri. Folosirea unei singure epruvete Almen nu poate determina eficacitatea ecruisării în toate zonele arcului (interior-exterior, sus-mijloc-jos).

Eficacitatea ecruisării nu poate fi determinată prin măsurători de duritate.

Pentru îmbunătățirea procesului de ecruisare consider că trebuie :

- pentru tehnologia actuală trebuie folosite mai multe epruvete Almen, fixate pe porteprevete amplasate în diferite zone ale arcului, conform figurii 5.6.
- introducerea unei operații suplimentare de ecruisare la cald, ulterior celei de ecruisare la rece, introdusă de firma MAN GmbH din Munchen în colaborare cu Boehler Federn GmbH din Duesseldorf.

Pentru tehnologia actuală am determinat experimental timpul optim pentru ecruisarea arcurilor. Din analiza rezultatelor se observă că, pentru instalația „SIESSON - LEHMANN” utilizată, timpul optim este de 10 minute.

Pentru acest timp s-au obținut caracteristicile mecanice (rezistența la rupere și limita de curgere) cele mai ridicate. O durată mai mare scade aceste caracteristici și poate duce la apariția fisurilor de suprafață.

Totodată cercetările au relevat că îmbunătățirea rezistenței la oboseală poate fi realizată prin:

- ecruisarea la temperatură ambiantă (la rece) și apariția unor dislocații sau linii de alunecare în rețeaua cristalină a aliajului metalic, care produc tensiuni de compresiune pe adâncimi de ordinul zecimilor de milimetri. Pe parcursul încercării arcului sau în exploatare are loc un fenomen de „descărcare” a acestor dislocații și diminuarea efectului pozitiv al ecruisării;
- carburile fine precipitate pe parcursul revenirii au efect pozitiv de fixare (pitting) al dislocațiilor și de „păstrare” a ecruisării, dar numai limitat acolo unde pozițiile dislocațiilor și ale precipitatelor coincid. Rezultă că precipitate mai fine și uniform distribuite (realizarea la temperaturi de revenire mai scăzute) vor avea un efect mai favorabil;
- dacă după ecruisarea la rece urmează o încălzire, aceasta va activa difuzia și deplasarea carburilor spre liniile de dislocație, ceea ce accentuează fixarea acestora și păstrarea ecruisării în timpul solicitării la oboseală a arcului;
- ecruisarea la cald mărește densitatea de dislocații și adâncimea stratului pe care se manifestă tensiunile remanente de compresiune.

## CAPITOLUL 6

# DETERMINAREA CARACTERISTICILOR MECANICE ȘI A REZISTENȚEI LA OBOSEALĂ PENTRU ARCURILE ELICOIDALE

### 6.1. Introducere

Trecând în domeniul variabile, care cauzează fenomenul de oboseală, caracteristica stării limită – *rezistența la oboseală* – nu mai este o mărime unică, ci poate lua o infinitate de valori, funcție de o serie de factori [3]. Ca urmare, proiectarea de rezistență nu se poate limita, în acest caz, la simpla aplicare a unor relații de dimensionare sau verificare; este necesar ca proiectantul să asigure, în afara unor dimensiuni geometrice, toate condițiile tehnologice, constructive și funcționale, care să garanteze o anumită rezistență la oboseală. Din acest motiv, calculul la oboseală nu este doar un calcul de rezistență: multe tratate de rezistența materialelor nu cuprind acest calcul, fiind studiat separat, în funcție de toți factorii care îl condiționează [18], [45], [50], [58].

După cum arăta Hertel în introducerea tratatului său [17] "*dimensionarea la oboseală este mai mult o artă decât o știință cantitativă*". Cunoașterea factorilor care influențează rezistența la oboseală și folosirea corespunzătoare a acestora în interesul piesei proiectate constituie "arta" dimensionării la oboseală. În această dimensionare, principiile generale ale calculului de rezistență și sensibilitate, întâlnite la solicitările statice, rămân valabile [15],[16], [38].

### 6.2. Definiții, terminologie, simboluri

Modul cel mai simplu de variație a solicitărilor într-o piesă de mașină este reprezentat în fig. 6.1. Pe orizontală se măsoară *timpul*, iar pe verticală, mărimi caracteristice ale solicitărilor: forțe sau cupluri exterioare, tensiuni ( $N$ ,  $T$ ,  $M_i$ ,  $M_t$ ), sau tensiuni ( $\sigma$ ,  $\tau$ ). În forma cea mai uzuală, pe orizontală se măsoară tensiuni  $\sigma$  sau  $\tau$ . Totalitatea valorilor pe care le ia tensiunea în decursul unei perioade (ABCDE în fig. 6.1) formează un *ciclu de solicitare variabilă*. Ținând seama că, în general, frecvența nu are importanță, ciclul de solicitare variabilă poate fi definit prin:

- *tensiunea maximă*,  $\sigma_{\max}$ , și *tensiunea minimă*,  $\sigma_{\min}$ , sau prin:

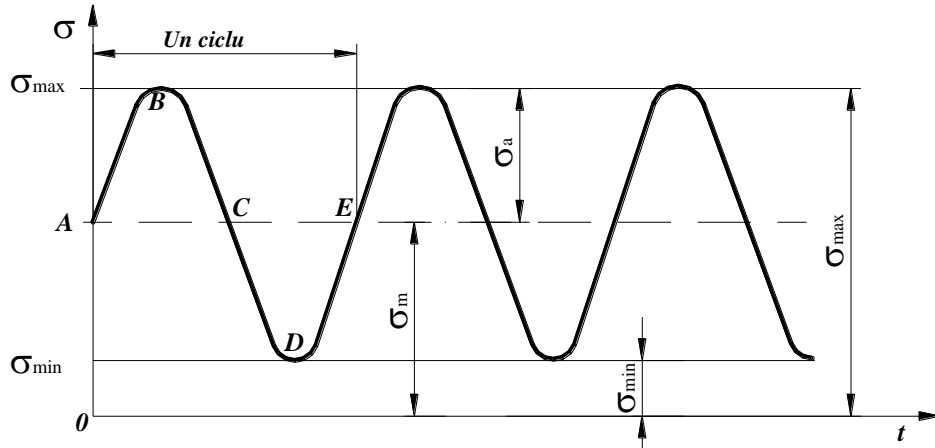


Fig. 6.1. Cicluri de solicitare variabile

- tensiunea medie,  $\sigma_m$ , și amplitudinea tensiunii,  $\sigma_a$ , definite prin relațiile

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}; \sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}. \quad (6.1)$$

Este evident că:  $\sigma_{\max} = \sigma_m + \sigma_a$ ;  $\sigma_{\min} = \sigma_m - \sigma_a$  (6.2)

Relațiile (6.1) și (6.2), sunt valabile indiferent de semnele algebrice ale mărimilor respective.

Se definește coeficientul de asimetrie al ciclului de solicitare variabilă:

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}. \quad (6.3)$$

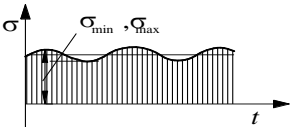
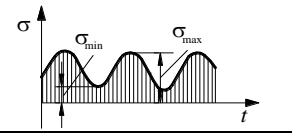
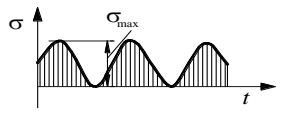
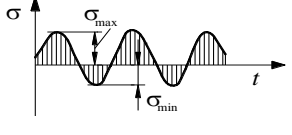
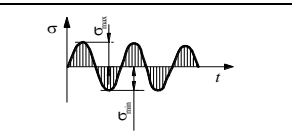
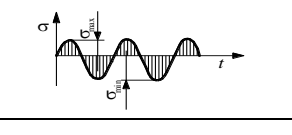
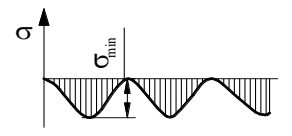
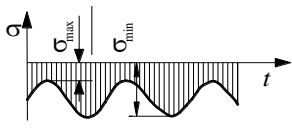
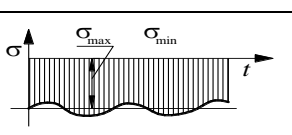
Dacă pe toată durata de aplicare a solicitării variabile, tensiunile variază între aceleași valori  $\sigma_{\max}, \sigma_{\min}$ , atunci se spune că *ciclurile sunt staționare*. Majoritatea studiilor ce s-au efectuat până acum asupra solicitărilor variabile se referă la solicitări prin cicluri staționare.

După valorile și semnele algebrice pe care le au limitele  $\sigma_{\max}, \sigma_{\min}$  (relația 6.2), respectiv după valorile și semnele coeficientului de asimetrie R (relația 6.3), se disting diferite feluri de cicluri, a căror sistematizare este făcută în tabelul 6.1.

Se numește *ciclu simetric* (poziția 5 din tabelul 6.1) acela care are  $R = -1$ ;  $\sigma_{\max} = -\sigma_{\min}$ ;  $\sigma_m = 0$ ;  $\sigma_a = \sigma_{\max}$ .

Toate celelalte cicluri, care au  $R \neq -1$ , se numesc *cicluri asimetrice*.

Tabelul 6.1.

Poz.	Ciclul	$\sigma_{\max}, \sigma_{\min}, \sigma_a$	$\sigma_m$	R
1		$\sigma_{\max} = \sigma_{\min} > 0$ $\sigma_a = 0$	$\sigma_m = \sigma_{\max} = \sigma_{\min} > 0$ $\sigma_a = 0$	$R = +1$
2		$\sigma_{\max} > \sigma_{\min} > 0$ $\sigma_a \neq 0$	$\sigma_m > 0; \sigma_a \neq 0$ $\sigma_a > 0$	$0 < R < +1$
3		$\sigma_{\max} > 0; \sigma_{\min} = 0$	$\sigma_m = \frac{1}{2} \sigma_{\max} = \sigma_a$	$R = 0$
4		$\sigma_{\max} > 0; \sigma_{\min} < 0$ $\sigma_{\max} >  \sigma_{\min} $	$\sigma_m > 0$ $\sigma_a \neq 0$	$-1 < R < 0$
5		$\sigma_{\max} = -\sigma_{\min} > 0$ $\sigma_{\min} < 0$	$\sigma_m = 0$ $\sigma_a = \sigma_{\max}$	$R = -1$
6		$\sigma_{\max} = -\sigma_{\min} > 0$ $\sigma_{\min} < 0$	$\sigma_m < 0; \sigma_a \neq  \sigma_{\min} $	$-\infty < R < -1$
7		$\sigma_{\max} = 0$ $\sigma_{\min} < 0$	$\sigma_m = \frac{1}{2} \sigma_{\min}$ $\sigma_a = \left  \frac{1}{2} \sigma_{\min} \right $	$R = \pm\infty$
8		$\sigma_{\max} < 0; \sigma_{\min} < 0$	$\sigma_m < 0; \sigma_a \neq 0$	$+1 < R < +\infty$
9		$\sigma_{\max} = \sigma_{\min} < 0$	$\sigma_m = \sigma_{\max} = \sigma_{\min}$ $\sigma_a = 0$	$R = +1$

Ciclurile ale căror tensiuni rămân de același semn se numesc *oscilante* (pozițiile 2, 3, 7, 8). Ele pot fi cicluri *oscilante pozitive* (pozițiile 2, 3), respectiv *negative* (pozițiile 7, 8).

Cazurile limită de cicluri oscilante, la care una dintre valorile extreme ale tensiunii se anulează, sunt cicluri *pulsante*. Ciclul pulsant pozitiv (poziția 3) are  $R = 0$ , iar cel pulsant negativ (poziția 7) are  $R = \pm\infty$ . Ca un caz limită de cicluri oscilante – când amplitudinea  $\sigma_a$  devine practic nulă – sunt solicitările statice (pozițiile 1 și 9 din tabelul 1.1) care au  $R = +1$ .

Ciclurile la care tensiunile schimbă semnul (pozițiile 4, 5, 6) sunt *ciclurile alternante*. Acestea au coeficient de asimetrie negativ. Cel mai important, din punct de vedere teoretic și practic, este ciclul *alternant simetric* (poziția 5), care are  $R = -1$ .

### 6.3. Rezistență la oboseală

Rezistența la oboseală (fatigue limit, limite de fatigue, Ermdungs-festigkeit, predel ustalosti) este mărimea caracteristică a stării limită folosită în calculele de oboseală [20], [21].

#### 6.3.1. Determinarea experimentală a rezistenței la oboseală

Ca și alte caracteristici mecanice ale materialelor, rezistența la oboseală se determină pe cale experimentală. Fiecare material are rezistențe la oboseală diferite pentru solicitările de întindere-compresiune, încovoiere, torsiune [59], [60], [74], [75], [80]. În cele ce urmează, se vor da câteva indicații sumare asupra determinării rezistenței la oboseală [39], [40].

#### 6.3.2. Clasificarea mașinilor de încercat la oboseală

Mașinile de încercare specializate [37] sunt realizate într-una din următoarele variante:

- a. mașini mecanice acționate cu excentric, cu șurub de forță, cu axe sau mase în mișcare de rotație;
- b. mașini electromecanice sau cu acționare magnetică;
- c. mașini hidraulice sau electrohidraulice.

Capacitățile de încărcare ale mașinilor respective nu depășesc, de regulă, 500 kN, iar frecvențele de lucru sunt până la 150 Hz [4], [33], [35].

Corespunzător soluției constructive a mașinii de încercare sau dispozitivelor folosite pentru aplicarea sarcinii, solicitarea epruvetelor poate fi axială, de încovoiere sau de torsiune. De regulă, variația în timp a solicitării corespunde unei funcții periodice de tip sinusoidal; pot fi folosite și funcții de formă triunghiulară, dinte de ferăstrău, treaptă sau de altă formă.

Echipamentele conexe ale mașinilor de încercare la oboseală constau din:

- sistem de control a forței, deplasării sau, după caz, al deformației specifice din zona calibrată a epruvetei, mărimea adoptată pentru controlul solicitării epruvetei fiind în directă legătură cu tipul de încercare efectuat. Având în vedere efectele maselor în mișcare, este

recomandată aplicarea unor tehnici de verificare în regim dinamic a solicitării epruvetei. În cursul încercării, valorile caracteristice ale mărimii controlate trebuie menținute constante, pe cât posibil în limitele unor abateri de până la 2% din domeniul de operare al mașinii;

- contor de cicluri pentru reținerea și indicarea numărului de cicluri de solicitare aplicat.

Pentru anumite încercări, de exemplu încercările prin solicitări axiale în domeniul durabilităților mici, pot fi necesare și alte echipamente cum sunt:

- a. tensometre pentru măsurarea în regim dinamic a deformației specifice din zona calibrată a epruvetei. Se pot folosi tensometre de tip electromecanic cu traductoare rezistive, tensometre de tip electromecanic cu traductoare inductive (LVDT) sau tensometre optice. În cazul epruvetelor cu zonă calibrată de secțiune constantă, tensometrul poate fi de tip axial, pe când în cazul epruvetelor cu zonă calibrată toroidală tensometrul trebuie să fie de tip transversal (diametral);
- b. sistem de înregistrare în două coordonate, utilizat de exemplu pentru înregistrarea buclei de histerezis forță-deplasare sau tensiune-deformație specifică;
- c. sistem integrat de conducere a încercării cu asigurarea amplitudinii constante a deformației specifice la epruvete cu zonă calibrată de formă toroidală. Acest sistem este necesar mai ales la încercarea unor materiale cu capacitate de ecrusare sau de înmuiere ciclică mare și se adaptează la mașinile de încercare cu servocontrol pentru a furniza semnalul de comandă din bucla închisă.

Folosind drept criteriu caracterul determinist sau aleator al solicitării, o posibilă clasificare a mașinilor de încercat este prezentată în tabelul 6.2.

Tabelul 6.2.

1.	Încercări, fără a cunoaște solicitarea în serviciu	Încercări cu amplitudine constantă (Wöhler)	
		Încercări cu amplitudine crescătoare (încercări rapide Prot, Locati)	
2.	Încercări unde este necesară cunoașterea solicitării în serviciu	Încercări cu amplitudini variabile de solicitare	Solicitări programate cu diferite nivele Solicitări aleatoare, după înregistrare
		Încercări cu amplitudine constantă (Wöhler)	Încercări de durabilitate

În tabelul 6.3, se prezintă o clasificare mixtă, luând drept criterii felul solicitării și principiul constructiv de realizare a solicitării variabile și transmitere a acesteia la epruvetă.

Tabelul 6.3.

Nr. ctr.	Solicitarea	Principiul constructiv de realizare a solicitării variabile
1.	Tracțiune - compresiune	Cu mecanism bielă - manivelă
		Electromagnetic
		Cu pulsator hidraulic
		Prin forțe de inerție
2.	Încovoiere, epruvete în rotație	Cu epruvete pe două reazeme
		Cu epruvete în consolă, încărcare directă
		Cu epruvete în consolă, încărcare prin pârgă
		Cu epruvete în consolă, încărcare prin arcuri
3.	Încovoiere într-un singur plan	Cu încovoiere pură
		Cu încovoiere plană
4.	Răsucire	Cu mecanism bielă - manivelă
		Cu rezonanță, răsucire prin ciclu simetric
		Cu rezonanță, răsucire prin cicluri nesimetrice
5.	Solicitări compuse	Încercări de încovoiere și răsucire
		Încercări la presiune interioară și forță axială
		Încercări la presiune interioară, forță axială și răsucire
		Încovoiere într-un plan, răsucire și tracțiune
		Tracțiune - compresiune pe două direcții

### 6.3.3. Clasificarea metodelor de încercare

Analiza experimentală a influenței solicitărilor variabile asupra rezistenței metalelor se face prin încercări la oboseală executate în condiții de laborator reproductibile. Pentru încercare sunt folosite corpuri de probă, numite *epruvete*, având forme și dimensiuni convenționale, specifice scopului urmărit. Epruvetele sunt supuse unor solicitări cunoscute, cu variație continuă. Parametrii principali în controlul solicitării sunt tensiunile sau deformațiile specifice dezvoltate în epruvetă [37].

Scopul încercărilor la oboseală este de a furniza date pentru o apreciere cantitativă a influenței factorilor de solicitare (cum sunt natura și distribuția câmpului de tensiuni sau spectrul de solicitare), a factorilor de material și de execuție, precum și a celor de mediu [36], [33], [5], [4].

Încercările la oboseală ale pieselor sau subsansamblelor ridică probleme distincte în special în ceea ce privește simularea prin condițiile de încercare a naturii și particularităților solicitărilor reale întâlnite în exploatare.

Tipurile de încercări la oboseală practicate în laboratoarele de încercări au cunoscut și cunosc o diversificare continuă. O imagine privind principalele tipuri de încercări la oboseală care se execută în prezent, metodele de conducere a încercărilor și caracteristicile determinate prin încercările respective se prezintă în tabelul 6.4. Referitor la încercările înscrise în acest tabel se fac următoarele precizări:



a. *Încercările în domeniul durabilităților mari* se execută în condiții de solicitări variabile în cursul cărora se dezvoltă deformații specifice mici, preponderent elastice. De aceea, încercările respective sunt conduse prin *controlul tensiunii* aplicate epruvetei. După caz, acestea urmăresc cunoașterea limitei de oboseală sau a rezistenței la durabilitate limitată. De aceea, rezultatele își găsesc o largă aplicabilitate la proiectarea pieselor supuse la forțe cu variație în timp după funcții de tip *staționar* sau *aleator*, de regulă, proiectate la durată de viață nelimitată.

b. *Încercările în domeniul durabilităților mici* studiază influența aceluiași factori prezentați anterior, dar în condiții în care componenta plastică a deformației specifice este importantă. De regulă, încercările de acest tip sunt conduse prin *controlul deformației specifice* care se dezvoltă în epruvetă. Acestea oferă date pentru piesele proiectate la durată de viață limitată care au concentratori de tensiune puternici sau sunt supuse unor solicitări de amplitudine mare. Aspectele care prezintă interes pentru evaluare sunt tendința de înmuiere sau de ecruisare ciclică a materialului, precum și amplitudinea maximă a deformației specifice plastice care poate fi suportată pentru un număr dat de cicluri de solicitare.

c. *Încercările pentru determinarea vitezei de creștere a fisurii* reprezintă un tip distinct de încercări dezvoltat pentru a furniza date specifice pieselor sau structurilor proiectate la deteriorare controlată; acestea sunt conduse aproape întotdeauna în *control de tensiune*.

Pentru încercările curente, practica de laborator a atestat, cu rare excepții, funcții de solicitare de tip ciclic, cu amplitudine constantă. Această soluție cu caracter evident convențional reduce numărul de variabile care intervin în încercare și simplifică interpretarea rezultatelor. În figura 6.2. sunt prezentate schematic diagramele tensiune-timp și tensiune-deformație specifică, precum și principalele mărimi de definiție ale unor cicluri de solicitare reprezentative în încercările la oboseală [55].

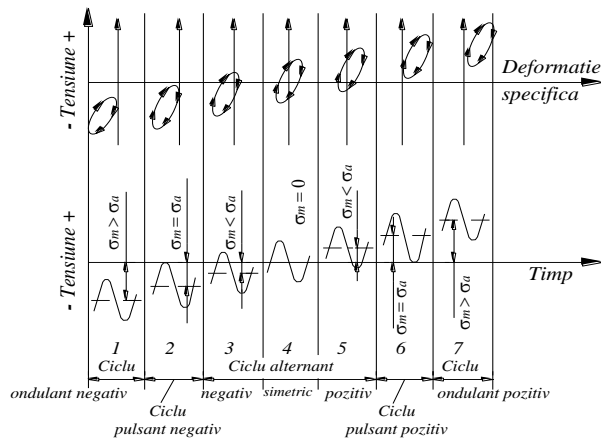
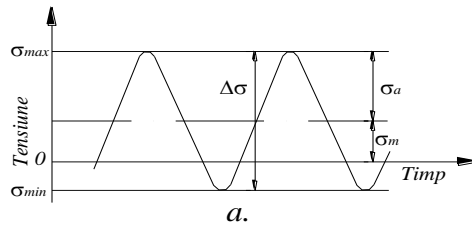
De regulă, încercările la oboseală se execută în condițiile standard ale mediului ambiant. În anumite situații poate fi necesară efectuarea încercărilor în condiții deosebite de cele standard, atât ca temperatură și presiune, cât și ca mediu de încercare. Desigur, în astfel de situații tehnica de încercare este stabilită în concordanță cu particularitățile programului de testare; o dată cu modificarea condițiilor de încercare pot interveni și aspecte calitativ noi, rezultate din dezvoltarea unor fenomene complexe, ca de exemplu oboseală-fluaj sau oboseală-coroziune.

#### **Tipuri de încercări la oboseală ale metalelor**

Tabelul 6.4.

Tipul de încercare	Modul de solicitare	Metoda de efectuare a încercării	Caracteristicile determinate
Încercări în domeniul durabilităților mari (peste $10^5$ cicluri) efectuate pe epruvete netede sau cu concentrator	Întindere-întindere Întindere-compresiune Încovoiere plană Încovoiere rotativă Torsiune	Încercări cu amplitudine constantă: - metoda clasică - metode statistice Încercări cu	Limita de oboseală  Rezistența la durabilitate limitată Durabilitatea

Încercări în domeniul durabilităților mici (până la $10^5$ cicluri) efectuate pe epruvete netede	Întindere-întindere Întindere-compresiune	amplitudine variabilă Încercări cu amplitudine constantă	Diagrama $\sigma - \varepsilon$ ciclică Rezistența la durabilitate limitată
Încercări pentru determinarea vitezei de creștere a fisurii în condiții de solicitări ciclice	Întindere excentrică (stare plană de deformare) Întindere-întindere	Încercări cu amplitudine constantă	Viteza de creștere a fisurii în domeniul valorilor de peste $10^{-8}$ m/ciclu



$\sigma_m$	$> 0$	$\frac{1}{2} \sigma_{max}$	$> 0$	$0$	$< 0$	$\frac{1}{2} \sigma_{min}$	$< 0$
$\sigma_a$	$\neq 0$	$\frac{1}{2} \sigma_{max}$	$\neq 0$	$\sigma_{max}$	$\neq 0$	$\frac{1}{2} \sigma_{min}$	$\neq 0$
$R_s$	$> 0$ $< +1$	$0$	$> -1$ $< 0$	$-1$	$> -\infty$ $< -1$	$\pm \infty$	$> +1$ $< -\infty$

Fig. 6.2. Diagramele tensiune-timp și tensiune-deformație specifică

**6.3.4. Epruvete pentru încercări la oboseală**

Asigurarea unor epruvete corecte ca geometrie, dimensiuni și acuratețe în execuție are importanță deosebită în încercările la oboseală, atât pentru reproductibilitatea rezultatelor, cât și pentru limitarea dispersiei acestora [37].

Tipul de epruvetă adoptat depinde de capacitatea mașinii de încercare, de programul de încercare propus, precum și de forma și cantitatea materialului disponibil. În cele ce urmează se vor prezenta câteva recomandări generale [18], [33], [35], [49], [48], [54], [56].

**Geometria epruvetelor.** Condițiile care trebuie avute în vedere sunt:

- ansamblul constituit din epruvetă – capete de prindere – mașină de încercat trebuie să asigure totdeauna ruperea epruvetei în zona calibrată de secțiune minimă. În acest scop se vor urmări:
  - o aplicarea corectă a solicitării în secțiunea calibrată astfel încât să se asigure limitarea abaterilor între solicitarea efectivă și cea nominală în oricare punct al secțiunii calibrate a epruvetei la max. 5% din valoarea nominală;
  - o limitarea tendinței de flambaj sau de încovoiere suplimentară necontrolată a epruvetelor prin folosirea, când este cazul, a epruvetelor toroidale sau a epruvetelor cilindrice cu lungime calibrată scurtă, precum și prin limitarea abaterilor de la coaxialitatea cu capetele de prindere;
  - o evitarea unor fenomene de rezonanță în sistemul de încercare prin limitarea frecvenței ciclurilor de solicitare la max 0,5 din frecvența naturală a sistemului (excepție fac mașinile funcționând pe principiul rezonanței).
- Epruvetele netede sau cu concentrator vor fi, de regulă, cu zonă calibrată de secțiune circulară. Fac excepție tablele și benzile pentru care se recomandă epruvete cu secțiune dreptunghiulară, cu mențiunea că este de preferat ca reducerea de secțiune dreptunghiulară, să se facă pe o dimensiune (de regulă pe lățime).

Astfel, la încercări în domeniul durabilității mari, se pot folosi epruvete cu următoarele forme:

- a. *în cazul solicitării axiale*, epruvetele cu secțiune circulară și zonă calibrată cilindrică de lungime normală (fig. 6.3, a) sau scurtă (fig. 6.3. b) epruvetele cu secțiune circulară și zonă calibrată toroidală (fig. 6.3. c), epruvete cu secțiune dreptunghiulară și zonă calibrată de secțiune constantă normală (fig. 6.3., d) sau scurtă (fig. 6.3. e), epruvete cu secțiune dreptunghiulară și zonă calibrată cilindrică (fig. 6.3. f) sau toroidală (fig. 6.3 g);
- b. *în cazul solicitării la încovoiere plană*, un exemplu reprezentativ de epruvetă este dat în fig. 6.4. a;
- c. *în cazul solicitării la încovoiere rotativă*, epruveta toroidală (fig. 6.4., b) indiferent de modul de aplicare a forței, epruveta cilindrică (fig. 6.4. c) dacă aplicarea forței se face în două sau patru puncte, epruveta tronconică (fig. 6.4. d) dacă aplicarea forței se face într-un punct;
- d. *în cazul solicitării la torsiune*, epruvetele din fig. 6.5.

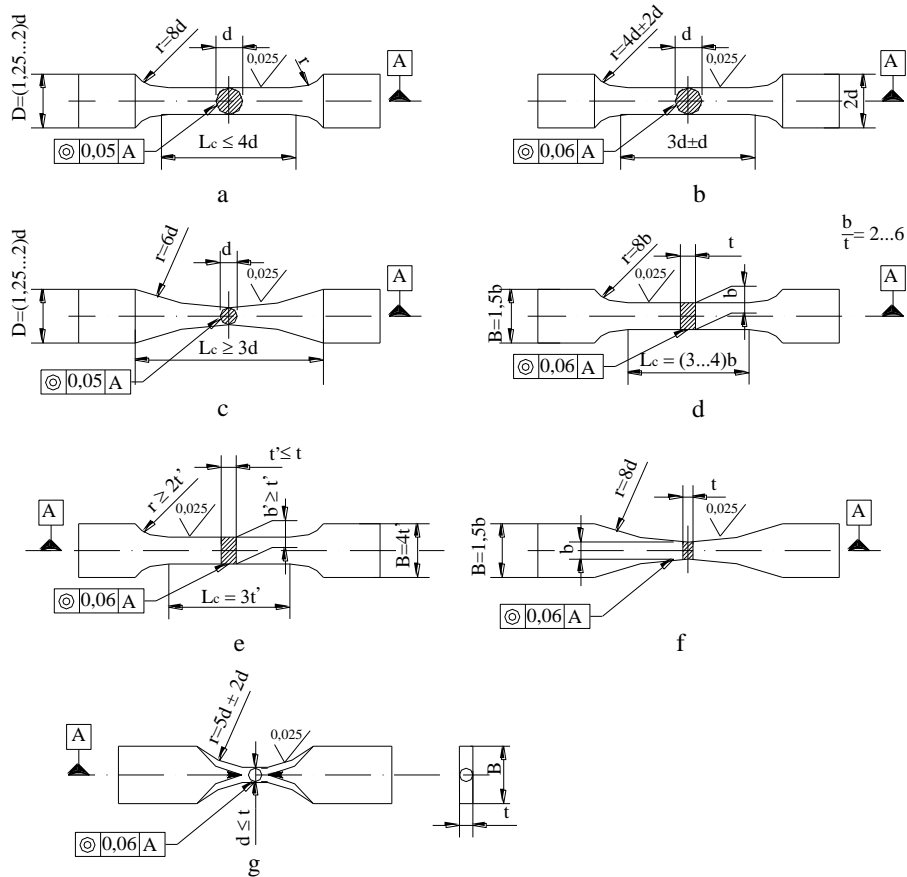


Fig. 6.3. Tipuri de epruvete utilizate în cazul solicitărilor axiale

- În încercările pentru determinarea vitezei de propagare a fisurii se folosesc epruvete de tip compact (fig. 6.6. a) sau epruvete cu fisură centrală (fig. 6.6. b). De menționat că pentru asigurarea unei distribuții uniforme a tensiunilor, lungimea între capetele de prindere ale epruvetei cu fisură centrală trebuie corelată cu lățimea epruvetei și tipul de solicitare, conform indicațiilor din fig. 6.6. b. De asemenea, pentru ambele tipuri de epruvete, grosimea  $t$  și lățimea  $b$  pot fi stabilite în limitele indicate în fig. 6.7. pentru evitarea flambajului sau a fisurării epruvetelor după un front de formă curbă. Detalii privind concentratorul și zona prefisurată a ambelor tipuri de epruvete sunt date în fig. 6.7.

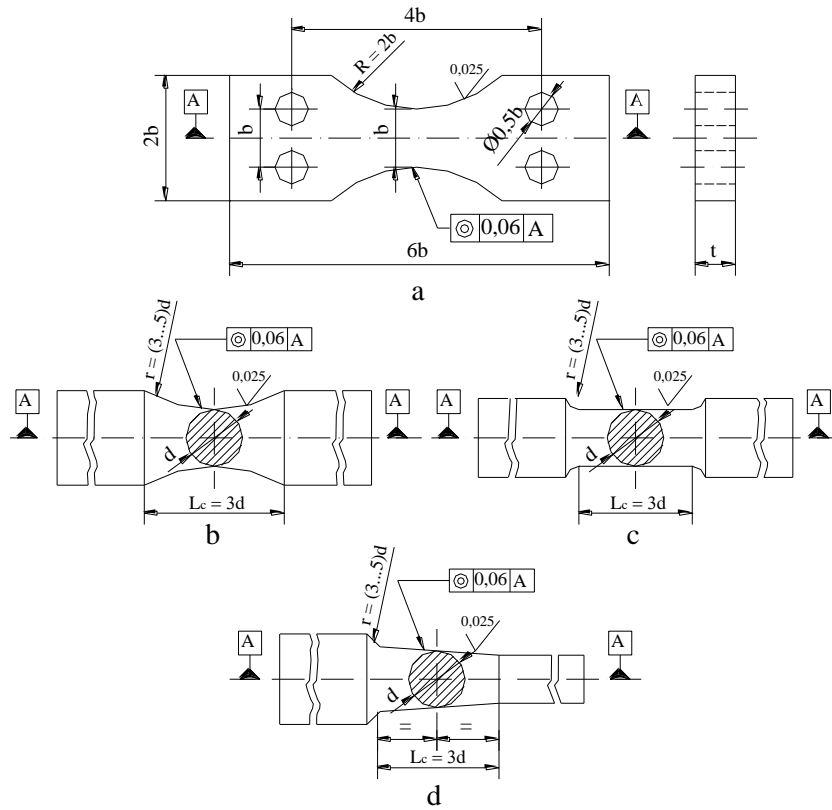


Fig. 6.4. Tipuri de epruvete utilizate în cazul solicitării la încovoiere plană (1.4.a) și rotativă (1.4.b,c,d)

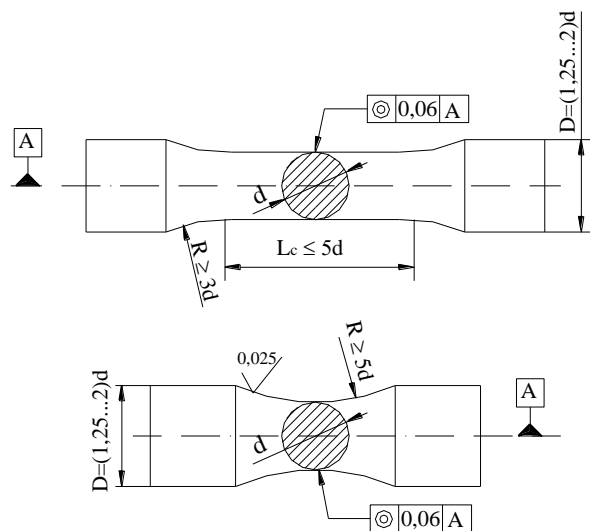


Fig.6.5. Tipuri de epruvetă utilizate în cazul solicitării la torsiune



8,89 mm, lățimea  $3,18 \text{ mm} \leq b \leq 8,89 \text{ mm}$  și lungime calibrată redusă pentru a preveni flambajul au prezentat aceeași diagramă  $\sigma - \varepsilon$  ciclică și aceeași diagramă de durabilitate (în termeni probabilistici) atunci când aria secțiunii epruvetelor a variat în limitele raportului 1:20.

- În cazul încercărilor pe epruvete cu concentrator, forma și dimensiunile concentratorului, se stabilesc în funcție de obiectivele programului de încercare.
- În cazul încercărilor pentru determinarea vitezei de propagare a fisurii, secțiunea nefisurată în care se propagă fisura trebuie să fie solicitată preponderent elastic. Aceasta impune ca lungimea de fisurare să fie corelată cu limita de curgere a oțelului și amplitudinea solicitării. Pentru epruvete de tip compact, conform fig. 6.6. a, condiția pentru lungimea de fisurare este

$$b - a \geq \frac{4}{\pi} \cdot \left( \frac{K_{\max}}{\sigma_c} \right)^2 \quad (6.4.)$$

iar pentru epruveta cu fisură centrală, conform fig. 6.6. b este

$$b - 2a \geq \frac{5}{4} \cdot \left( \frac{F_{\max}}{t \cdot \sigma_c} \right)^2 \quad (6.5.)$$

unde:  $a$  - lungimea fisurii;

$b$  - este lățimea epruvetei;

$t$  - grosimea epruvetei;

$\sigma_c$  - limita de curgere a oțelului la temperatura de încercare;

$F_{\max}$  - valoarea maximă a forței în ciclul de solicitare;

$K_{\max}$  - valoarea factorului de intensitate a tensiunii calculată pentru  $F = F_{\max}$ .

Condițiile (6.4.), respectiv (6.5.), permit precizarea:

a. valorii limită  $K_{\max}$  la care poate fi realizată la încercarea materialului cu o anumită limită de curgere  $\sigma_c$  și dimensiune a epruvetei;

b. dimensiunile minime ale epruvetei în vederea obținerii unor rezultate

valide până la anumite valori  $K_{\max}$ ; domeniul valorilor  $\frac{K_{\max}}{\sqrt{\sigma_c \cdot b}}$  care

satisfac condițiile (6.4.), respectiv (6.5) se situează sub curbele din fig. 6.8. corespunzătoare fiecărui tip din epruvetă.

**Execuția epruvetelor.** Tehnica de execuție a epruvetelor trebuie adaptată materialului, geometriei și dimensiunilor fiecărui tip de epruvetă. O atenție deosebită trebuie dată prelucrărilor finale; îndepărtarea de material trebuie făcută în lungul direcției de solicitare fără a se produce rizuri pe suprafața epruvetelor sau să se introducă tensiuni reziduale. Recomandări detaliate privind modul de execuție a epruvetelor pentru încercări la oboseală se dau în standardele de încercări [47], [49], [50], [54].



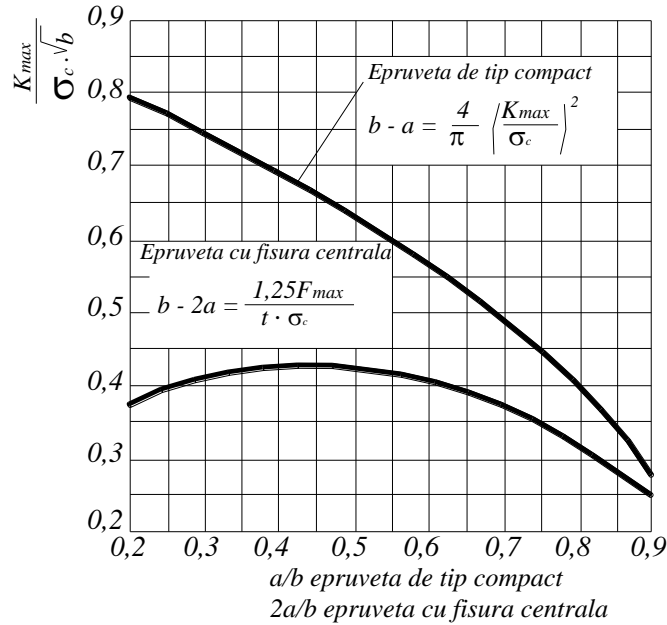


Fig. 6.8.

#### 6.4. Comportarea la oboseală a arcurilor elicoidale cu secțiune cilindrică

##### 6.4.1. Arc elicoidal de secțiune Ø24,4mm

În scopul verificării tehnologiei de fabricație și a tratamentelor termice aplicate a fost încercat un set de arcuri la oboseală în scopul depistării cauzelor ruperilor în exploatare. Obiectivul impus de cercetarea pe care am efectuat-o este acela de a realiza arcuri a căror rezistență la oboseală să fie la nivelul prevăzut de cerințe (4000000 cicluri în trei regimuri de încercare), cerințe ce asigură o rezistență la oboseală optimă în exploatare.

Setul de arcuri are caracteristicile mecanice ce indică valori ale limitei de curgere de 1489-1551 N/mm<sup>2</sup> (față de min. 1370-1670 N/mm<sup>2</sup> prescris) și valori ale alungirii la rupere de 10,8-12,8% (față de min. 6% admis). Diametrele inițiale ale barelor au valori de 24,33 – 24,34 mm încadrându-se în intervalul prescris (24,4±0,1 mm).

Au fost efectuate încercări de oboseală cu rezultatele cuprinse în tabelele 6.5 și 6.6.

Tabelul 6.5

Nr. crt.	Numărul arcului	Numărul de cicluri după care s-a rupt
1	7	368.000
2	8	530.000
3	4	250.000
4	6	3.192.000

Tabelul 6.6

Nr. crt.	Numărul arcului	Numărul de cicluri după care s-a rupt
1	9	368.000
2	7bis	530.000
3	17	250.000
4	7	3.192.000
5	10	3.192.000

Probele pentru analiza suprafețelor de rupere au fost prelevate din arcuri ce provin din mai multe loturi de fabricație, iar numărul de cicluri suportat înainte de rupere de către fiecare arc este prezentat în tabelul 6.6.

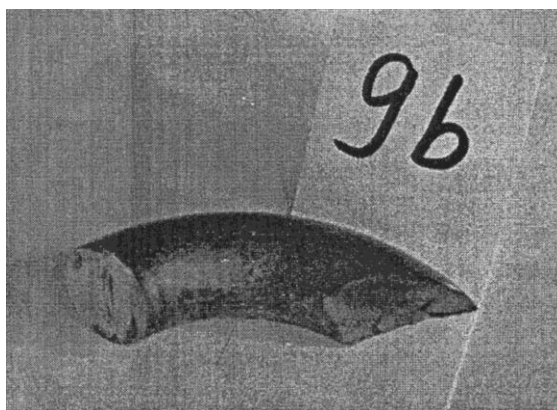
Pentru a aprecia cauzele ruperii s-a urmărit, într-o primă etapă, determinarea zonelor în care s-a produs ruperea (figurile 6.9 -6.12).

Analiza probelor din tabelul 6.6 a dus la concluzia că ruperea se produce fie în spira de capăt (probele 7 și 9) fie în spirele active.

Valoarea redusă a rezistenței la oboseală, pozițiile diferite ale zonelor de rupere și împrăștierea mare a rezultatelor conduc la presupunerea că ruperea prematură în timpul încercării la oboseală este favorizată de mai mulți factori care acționează separat sau simultan.

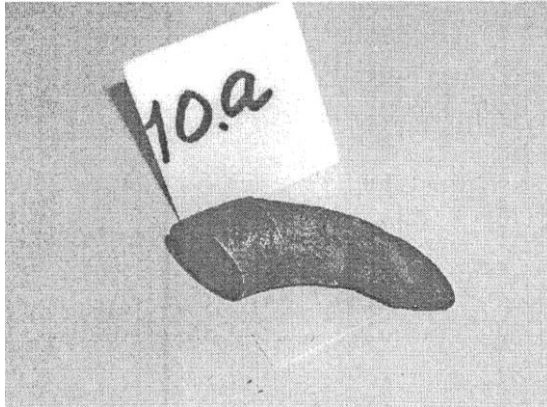
Pornind de la aspectele teoretice ale ruperii prin oboseală (1), (2) și de la expertize similare ale unor arcuri elicoidale rupte prin oboseală (3), (4), s-a impus depistarea posibilelor deficiențe de fabricație pe tot parcursul tehnologic. În acest scop, au fost analizate mai multe arcuri urmărindu-se modul în care au fost respectate prescripțiile din documentația de execuție și cea tehnologică.

Determinările efectuate au vizat dimensiunile, forma geometrică a arcului, starea suprafeței (rugozitate datorată durificării cu bile, imprimări pe suprafață apărute în timpul deformării plastice sau în timpul încărcării datorită contactului punctiform în zona spirelor de capăt) și nivelul tensiunilor interne.

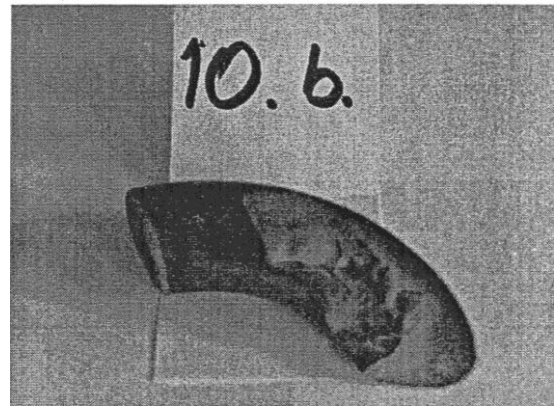


a)

Figura 6.9 Probe din arcul 9



a)

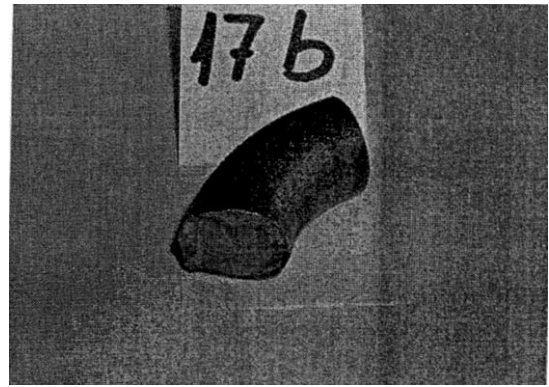


b)

Figura 6.10 Probe din arcul 10

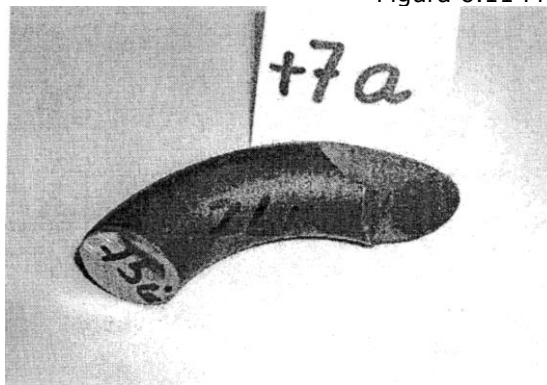


a)

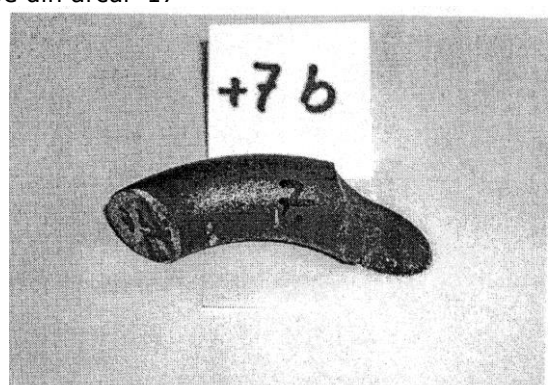


b)

Figura 6.11 Probe din arcul 17



a)



b)

Figura 6.12 Probe din arcul 7 bis (+7)

Pentru date suplimentare s-a apelat la analiza suprafețelor de rupere (microscopie optică și microscopie electronică prin baleiaj).

O primă apreciere a fost făcută prin analiză microscopică, permițând stabilirea zonei de amorsare și a modului de propagare a fisurii.

În general, suprafețele de rupere indică una sau mai multe zone de rupere prin oboseală, dezvoltate în jurul punctului de amorsare a fisurii și porțiunii de rupere parțial fragilă.

După modul în care s-a amorsat fisura, probele examinate pot fi grupate în următoarele categorii:

a) Probe la care fisura s-a amorsat în fibra interioară a spirei (fibra cea mai intens sollicitată la compresiune). Din acesta categorie au fost identificate probele 7bis și 10.

Proba 7 bis (figura 6.13) este tipică pentru ruperea prin oboseală. Amorsa de rupere se află în fibra interioară, fiind favorizată de existența urmelor provocate de dornul de înfășurare.

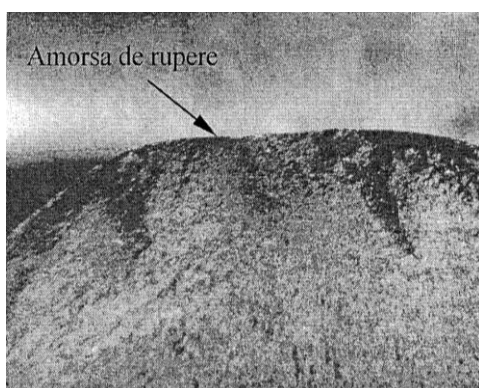


Figura 6.13 Rupere amorsată pe fibra interioară

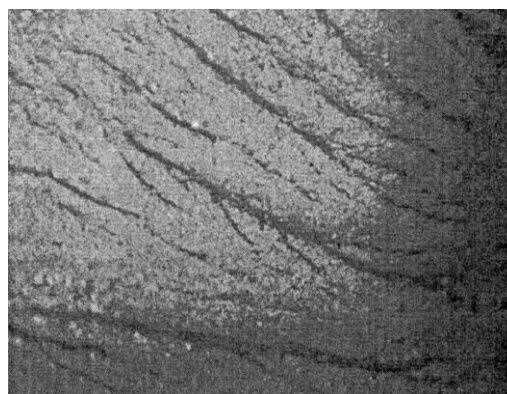


Figura 6.14 Rupere fibroasă

Arcul din care a fost prelevată proba a rezistat la un număr de 530000 de cicluri.

O altă probă pe care s-a constatat o rupere similară este proba 10 (figura 6.14) la care, în mod evident, ruperea este amorsată în spira interioară pe rezidurile provocate de dorn.

Structura macroscopică este fibroasă indicând o texturare a materialului, ca urmare a unei căliri incomplete.

b) Probă la care fisura s-a amorsat într-o altă zonă decât fibra interioară a spirei, pe o microfisură provocată de bilele de ecrusare este cea provenită din arcul notat cu 17 care s-a rupt după un număr de 250000 cicluri la încercarea la oboseală. Proba a fost anterior citată ca având o suprafață foarte rugoasă.

Aspectul macroscopic al suprafeței de rupere este indicat în figura 6.15.



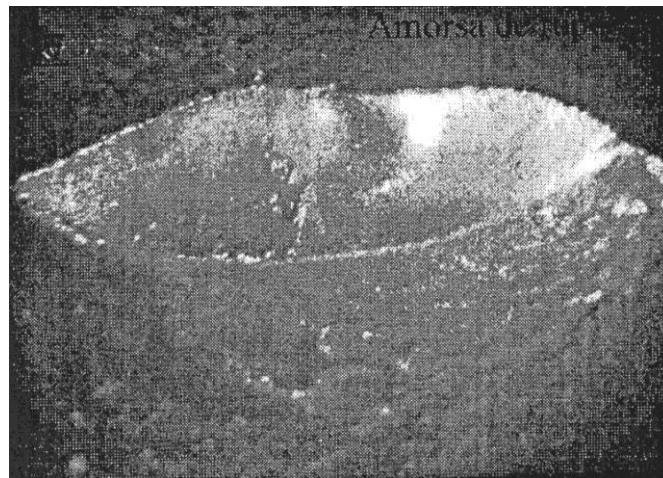
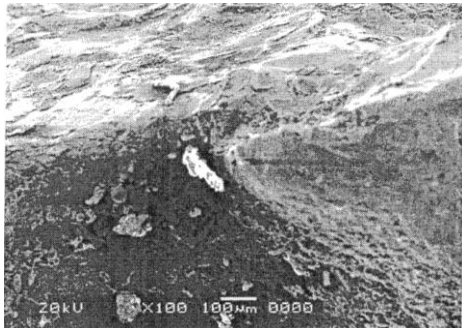


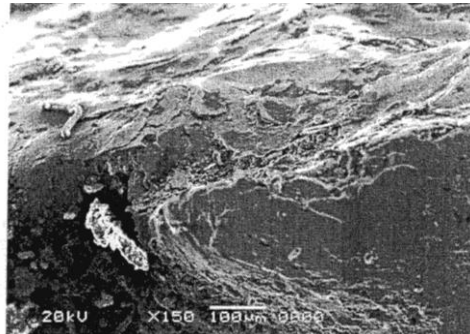
Figura 6.15 Suprafață de rupere prin oboseală – macrostructură

Evidențierea modului de amorsare a fisurii din zona stratului superficial ecruisat excesiv, a fost posibilă prin microscopie electronică (figura 6.16 a,b,c).

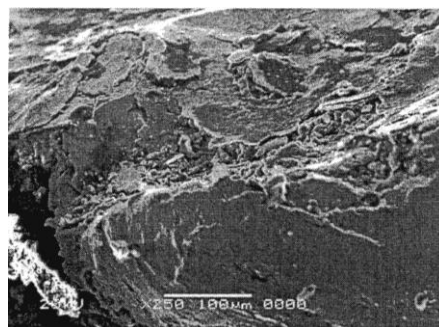
Se constată că, pe măsura creșterii puterii de mărire, zona de amorsare a fisurii poate fi poziționată cu mai mare certitudine în stratul superficial al spirei, acolo unde pot fi identificate și alte microfisuri și chiar material exfoliat.



a)



b)



c)

Figura 6.16 Fisură amorsată în stratul ecruisat

Tot prin microscopie electronică prin baleiaj a putut fi evidențiată, pe aceeași probă, o zonă în care este evidentă propagarea microfisurii din suprafață înspre interior (figura 6.17).

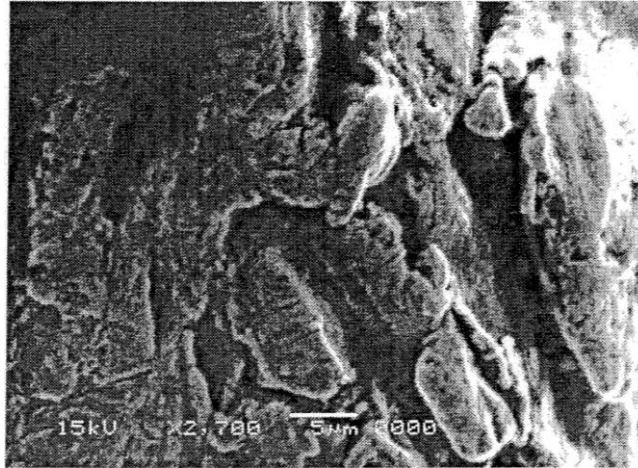


Figura 6.17. Microfisură în stratul ecruisat

c) Probe la care fisura s-a amorsat pe suprafața de așezare ca urmare a solicitării spirei de capăt la încovoiere. Este cazul probelor provenite din arcurile 7 și 9.

Macrostructura suprafeței de rupere pentru proba 7 este prezentată în figura 6.18, iar structura microscopică este cea din figura 6.19.



Figura 6.18. Microstructura suprafeței de rupere

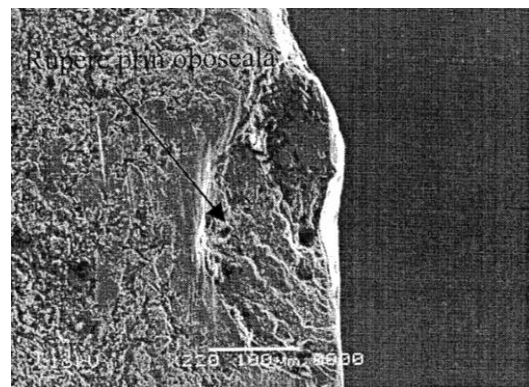


Figura 6.19. Microstructura suprafeței de rupere

În figura 6.19 se observă striatiile caracteristice pentru propagarea fisurii la oboseală. Amorsa se află în suprafața strunjită și poate fi provocată de o asperitate sau de o smulgere de material.

d) Probe la care fisura s-a amorsat în zona de contact punctiform dintre două spire, pornind de la o urmă de tip pitting (figura 6.20).

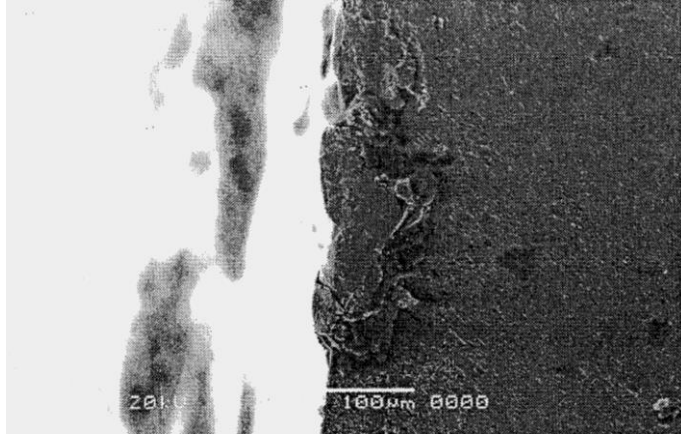


Figura 6.20 Suprafața de rupere amorsată de la o urmă de tip pitting

Zona din figura 6.20 a fost găsită între spira de capăt și prima activă. În timpul încercărilor au fost constatate și alte arcuri a căror rupere s-a produs pe acesta porțiune, fiind vizibil, chiar, contactul pe o suprafață redusă dintre cele două spire.



**RAPORT PRELIMINAR**

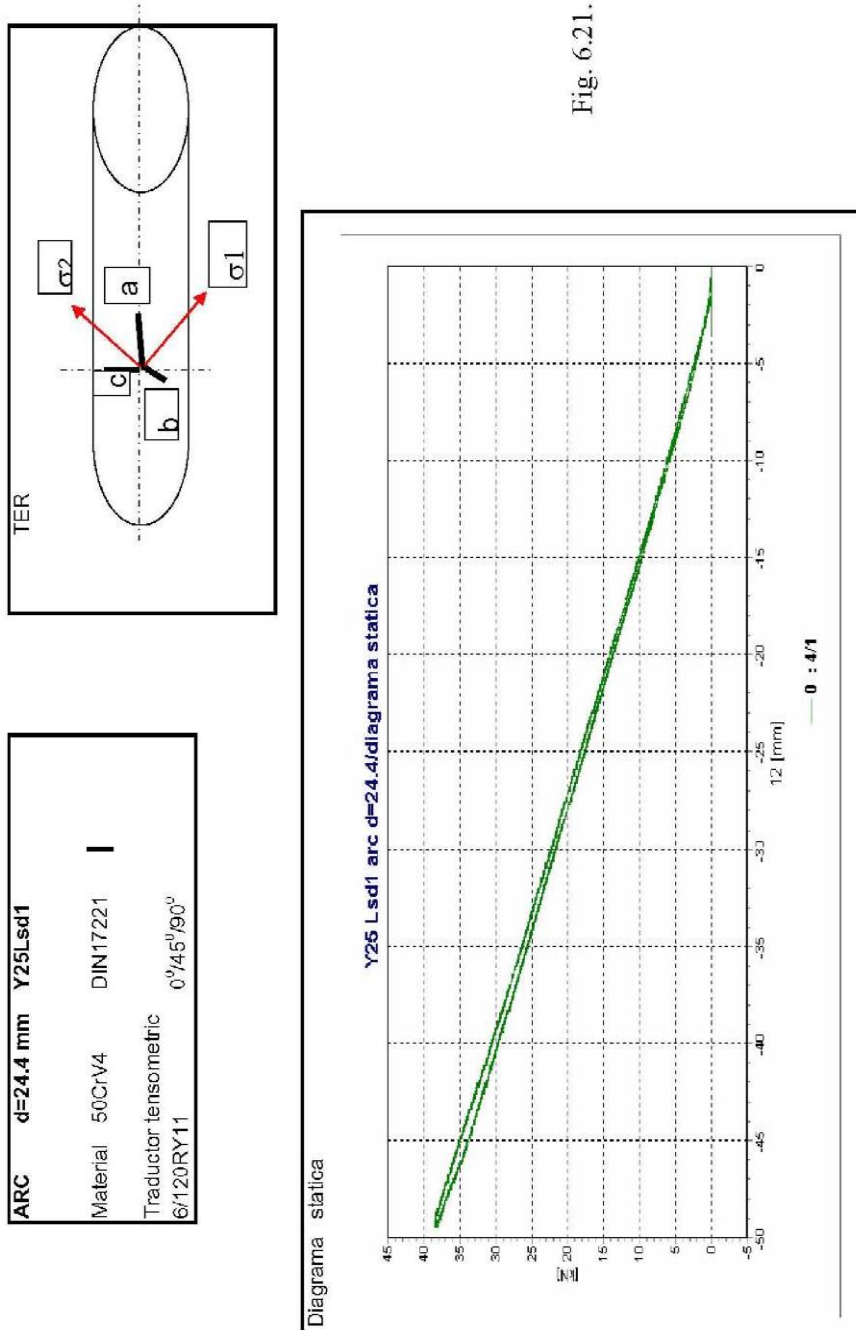


Fig. 6.21.







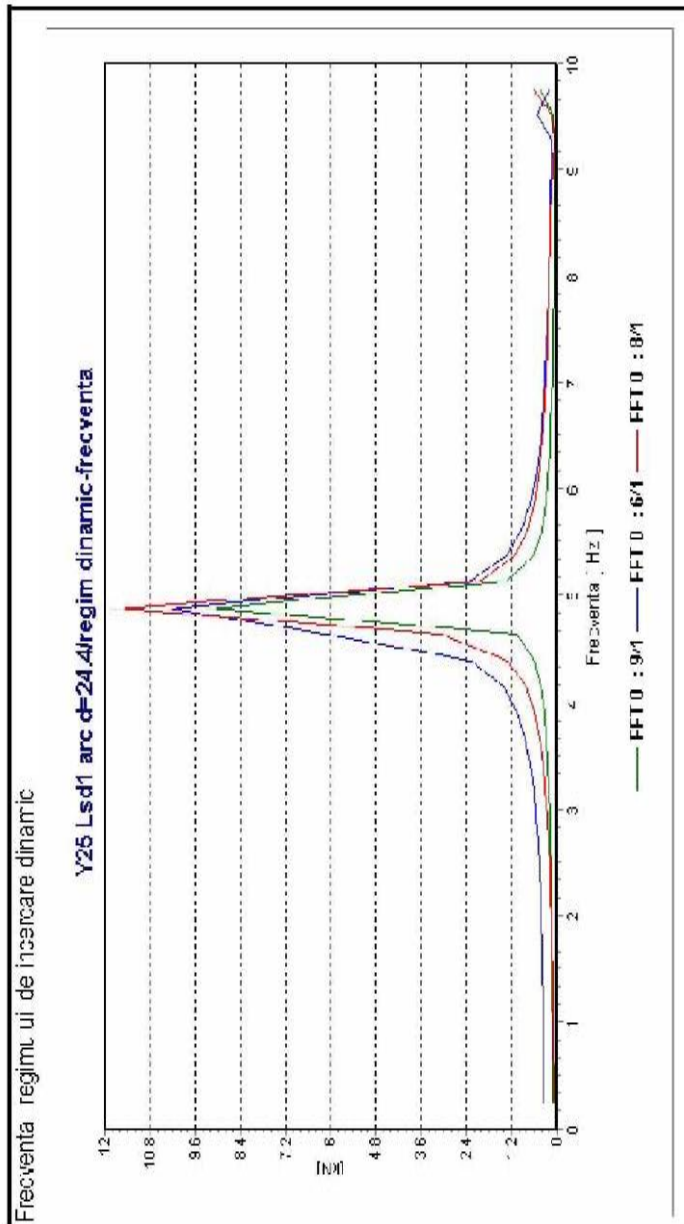


Fig. 6.25.

Programul de încercări experimentale efectuat pentru arcul  $\varnothing 24,4\text{mm}$  s-a făcut urmărindu-se rezistența la oboseală cu 4 milioane de cicluri aplicate în trei regimuri de încercare. În cadrul acestor încercări au fost urmărite regimurile de încercare prin două metode experimentale:

1. determinarea experimentală a forței cu traductori de forță adecvați având domeniul de la 0 la 50 kN;
2. urmărirea regimului aplicat prin determinarea experimentală atât pe partea interioară cât și pe partea exterioară a deformațiilor relative respectiv a tensiunilor cu traductor electric rezistiv (TER) de tip rozetă (figura 6.21).

Diagrama statică a arcului  $\varnothing 24,4\text{mm}$  este prezentată în figura 6.21. În figurile 6.22 - 6.24 sunt redate pentru cele trei regimuri utilizate diagrama dinamică a forței și rezultatele experimentale ale deformației relative respectiv a tensiunii. În figura 6.25 este redată analiza în funcție de frecvență a forțelor aplicate pe parcursul încercărilor cu cele trei regimuri.

Arcul supus încercărilor la oboseală a rezistat mai mult de 400000 de cicluri aplicate, în final nu au fost constatate fisuri sau alte defecte. De semnalat de asemenea că valorile tensiunilor determinate experimental nu au depășit limita de elasticitate de  $1511\text{ N/mm}^2$ .

#### 6.4.2. Arcuri elicoidale cu secțiunea $\varnothing 30\text{mm}$ și $\varnothing 31\text{mm}$

S-au efectuat încercări de oboseală utilizând metoda energetică de stabilire a numărului ciclurilor de solicitare și a amplitudinilor. Arcurile metalice încercate au diametrul sârmei de valoare apropiată dar diferă în ce privește înălțimea liberă și diametrul interior.

Datele tehnice ale arcului încercat sunt:

##### Arc $\varnothing 31$

Înălțimea liberă –  $419.1 \pm 6.35\text{ mm}$   
 Diametrul interior –  $\varnothing 127 \pm 2.38\text{ mm}$   
 Diametrul sârmei –  $\varnothing 31\text{ mm}$   
 Sarcina maximă utilă –  $47170\text{ N}$

##### Arc $\varnothing 30$

Înălțimea liberă –  $330.2 \pm 6.35\text{ mm}$   
 Diametrul interior –  $\varnothing 101,6 \pm 2.38\text{ mm}$   
 Diametrul sârmei –  $\varnothing 30.16 \pm 0,2\text{ mm}$   
 Sarcina maximă utilă –  $48947.98\text{ N}$

Echipamentele de încercare și măsurare au fost:

- a) standurile de încercare:
  - mașina de încercat la tracțiune compresione tip ZD 100 Hekert Germania;
  - stand hidraulic tip PZA Germania;
- b) aparatura de măsură:
  - celulă de sarcină tip U – HBM 10 t;
  - amplificator tensometric tip KWS;

- Înregistrator în ultraviolet – HONEYWELL SUA.

*Diagramare statică*

Valori măsurate înainte de efectuarea încercărilor de oboseală:

Arc  $\Phi 31$   
 Înălțimea liberă – 420,4 mm  
 Diametrul interior –  $\Phi 124,7$  mm  
 Diametrul sârmei –  $\Phi 31$  mm

Arc  $\Phi 30$   
 Înălțimea liberă – 329.2 mm  
 Diametrul interior –  $\Phi 100$  mm  
 Diametrul sârmei –  $\Phi 30$  mm

S-au diagramat cele două arcuri în regim static figurile 6.26 și 6.27. Analizând cele două diagrame s-au obținut următoarele:

- a) arc  $\Phi 31$  mm – la sarcina de 47, 168 KN s-a obținut o cursă de 131,5 mm;  
 b) arc  $\Phi 30$  mm – la sarcina de 48, 95 KN s-a obținut o cursă de 84 mm.

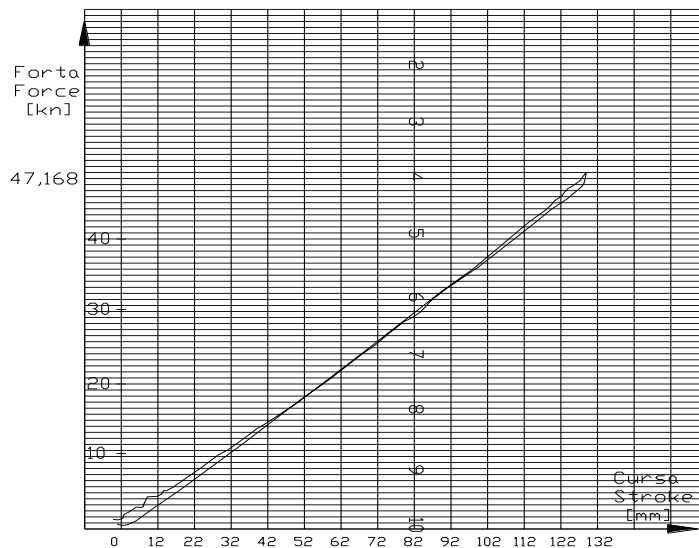


Fig. 6.26 Diagrama statică înainte de efectuarea încercării la oboseală  
 Arc  $\Phi 31$



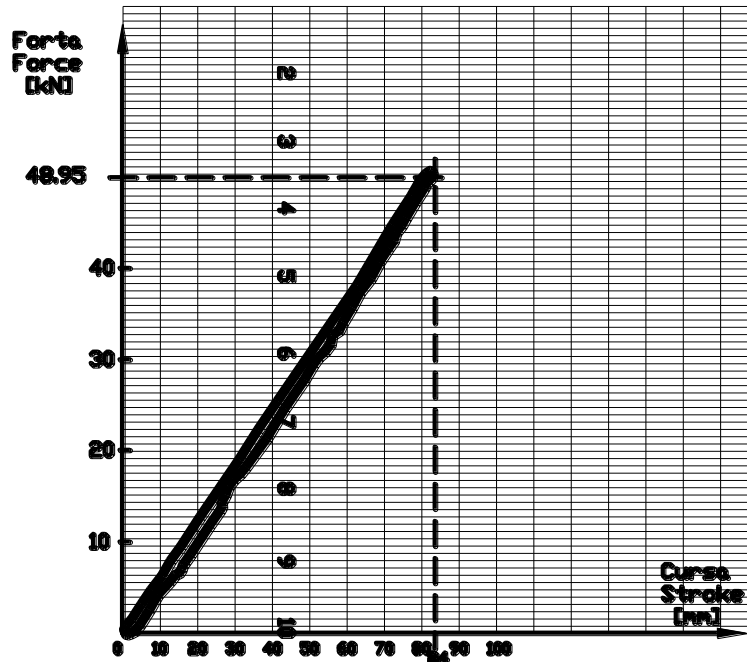


Fig. 6.27 Diagrama statică înainte de efectuarea încercării la oboseală  
Arc  $\Phi 30$

#### Încercarea de oboseală

Regimurile de pulsare impuse au fost următoarele:

- a) arc  $\Phi 31$ 
  - forța minimă  $F1^*=0.470$  KN
  - forța maximă  $F2^*=47,168$  KN
  - săgeata arcului  $(f2^*-f1^*)=131.5$  mm
- b) arc  $\Phi 30$ 
  - forța minimă  $F1^*=0.490$  KN
  - forța maximă  $F2^*=48.95$  KN
  - săgeata arcului  $(f2^*-f1^*)=84$  mm

Având în vedere caracteristicile arcurilor și performanțele tehnice ale sistemului hidraulic al ștandului (obs. Frecvența minimă de pulsare este de 5Hz) s-au obținut următoarele regimuri de pulsare:

- a) arc  $\Phi 31$ 
  - forța minimă  $F1=25.506$  KN
  - forța maximă  $F2=47,168$  KN
  - săgeata arcului  $(f2-f1)=57$  mm

La acest regim corespunde un nr. de 453735 cicluri.

b) arc  $\Phi 30$

- forța minimă  $F_1=20.99$  KN
- forța maximă  $F_2=48.95$  KN
- săgeata arcului  $(f_2-f_1)=48$  mm

La acest regim corespunde un nr. de 371118 cicluri.

Modificarea numărului de cicluri la care au fost supuse arcurile rezultă din echivalarea energetică între regimurile de oboseală (impus și cel rezultat).

Echivalarea energetică s-a calculat cu relația:

-energia potențială de deformație înmagazinată este dată de relația

$$W = \frac{(F_1 + F_2)(f_2 - f_1)}{2} \quad (6.6)$$

- unde: -  $F_1$  = forța minimă  
 -  $F_2$  = forța maximă  
 -  $(f_2-f_1)$  = săgeata arcului  
 -  $f_1$  = cursa la forța  $F_1$   
 -  $f_2$  = cursa la forța  $F_2$

$W$  solicitat =  $W$  realizat

$$W = \frac{(F_1^* + F_2^*)(f_2^* - f_1^*)n^*}{2} = \frac{(F_1 + F_2)(f_2 - f_1)n}{2} \quad (6.7)$$

- unde: -  $F_1^*$  = forța minimă solicitată  
 -  $F_2^*$  = forța maximă solicitată  
 -  $(f_2^*-f_1^*)$  = săgeata arcului  
 -  $f_1^*$  = cursa la forța  $F_1$  minimă solicitată  
 -  $f_2^*$  = cursa la forța  $F_2$  maximă solicitată  
 -  $n^*$  =  $3 \times 10^5$  cicluri solicitate  
 -  $F_1$  = forța minimă realizată  
 -  $F_2$  = forța maximă realizată  
 -  $(f_2 - f_1)$  = săgeata arcului realizată  
 -  $f_1$  = cursa la forța  $F_1$  minimă realizată  
 -  $f_2$  = cursa la forța  $F_2$  maximă realizată  
 -  $n$  = numărul de cicluri realizate

rezultă:

$$n = \frac{(F_1^* + F_2^*)(f_2^* - f_1^*)n^*}{(F_1 + F_2)(f_2 - f_1)} \quad (6.8)$$

Verificarea regimului de pulsare s-a făcut la 50,100, 200, 300, 400 mii cicluri, prin determinarea experimentală a forței aplicate.

Aceste diagrame se găsesc pentru arcul  $\Phi 31$  în figurile 6.28 ... 6.33, iar pentru arcul  $\Phi 30$  în figurile 6.34 ... 6.38.

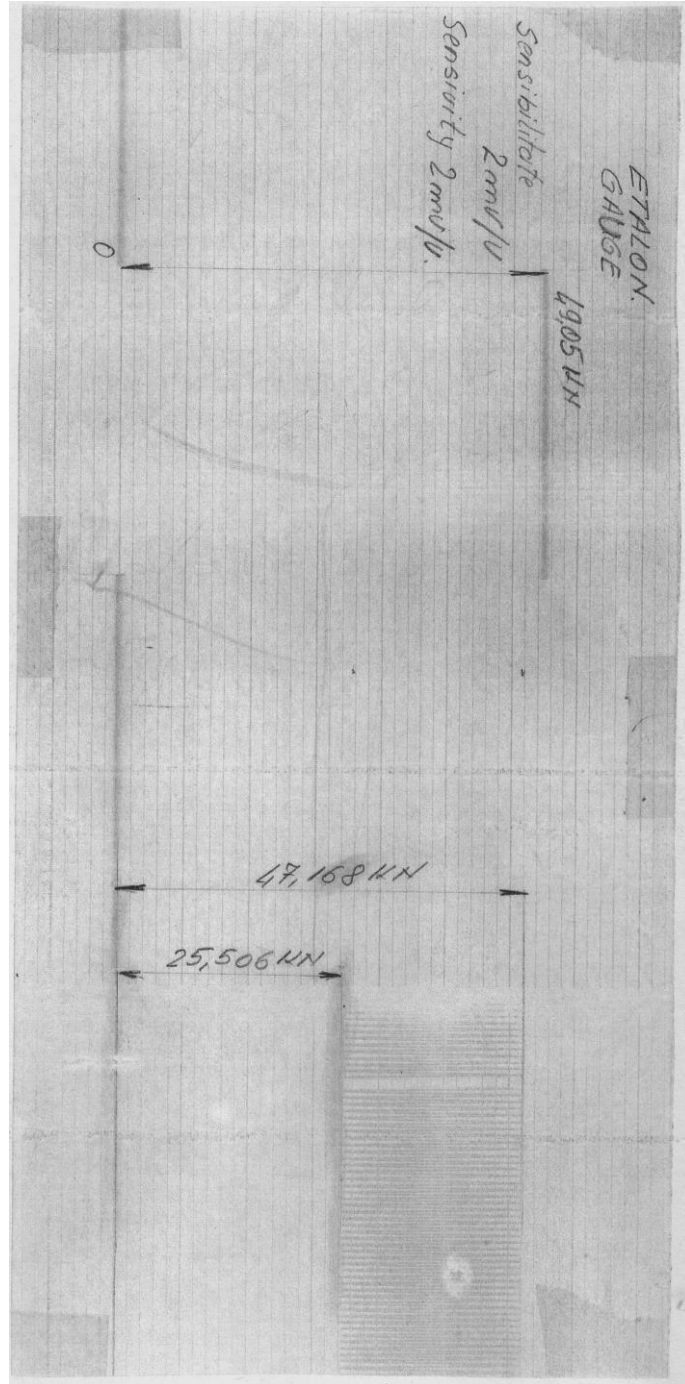


Fig. 6.28 Diagrama regimului de oboseală arc  $\Phi 31$

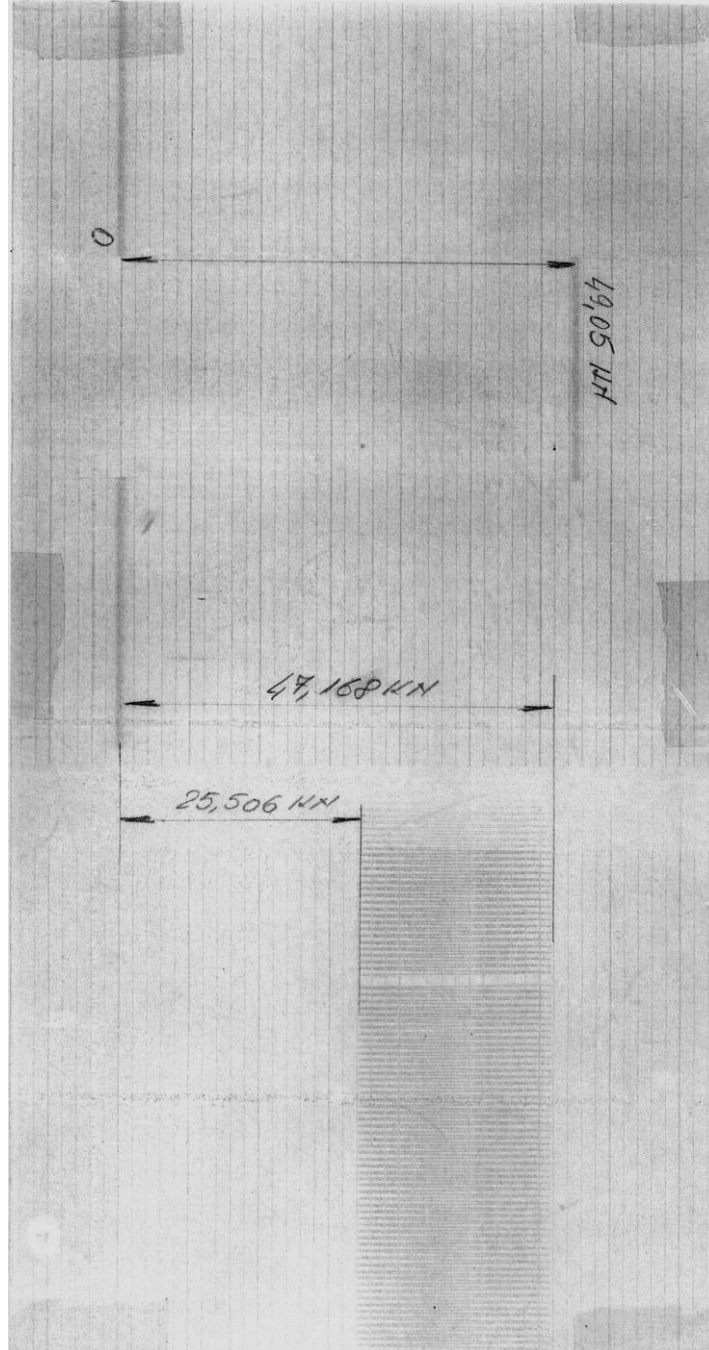


Fig. 6.29 Diagrama regimului de oboseală arc  $\varnothing 31$  (50 mii cicluri)

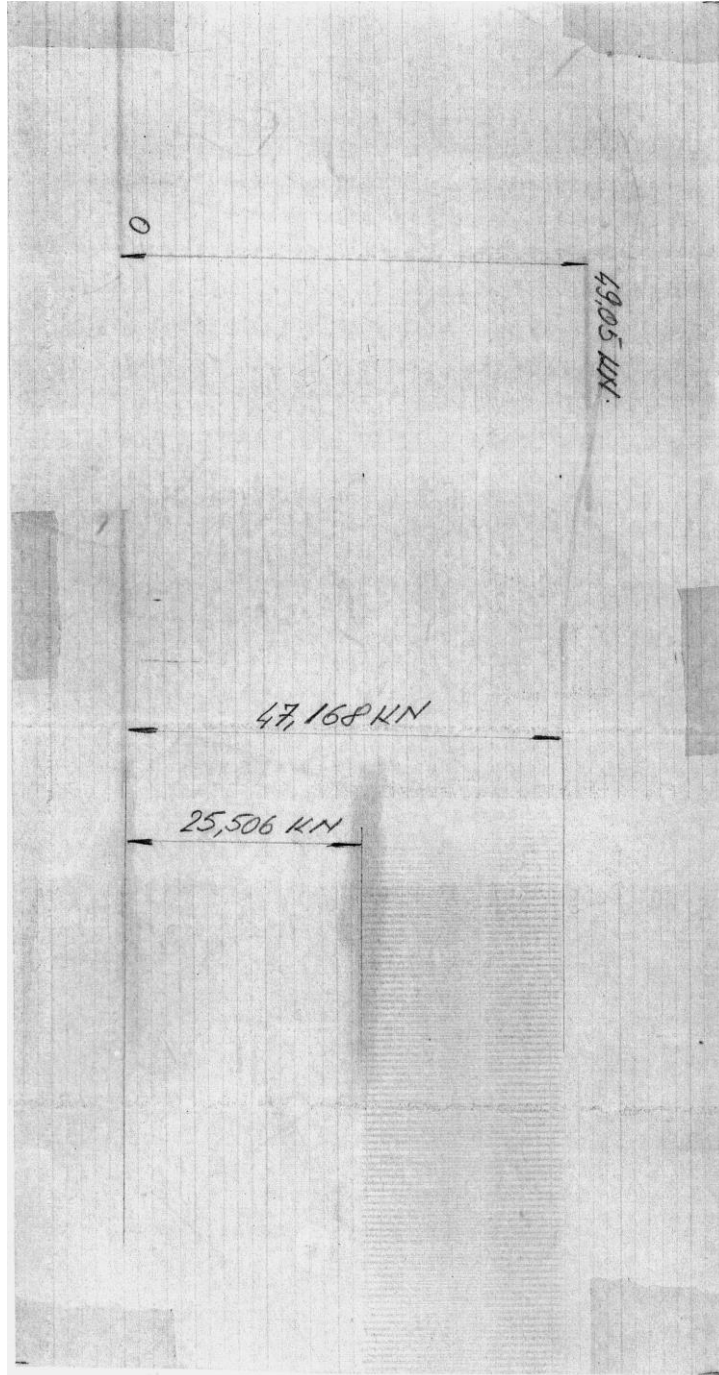


Fig. 6.30 Diagrama regimului de oboseală arc  $\varnothing 31$  (100 mii cicluri)



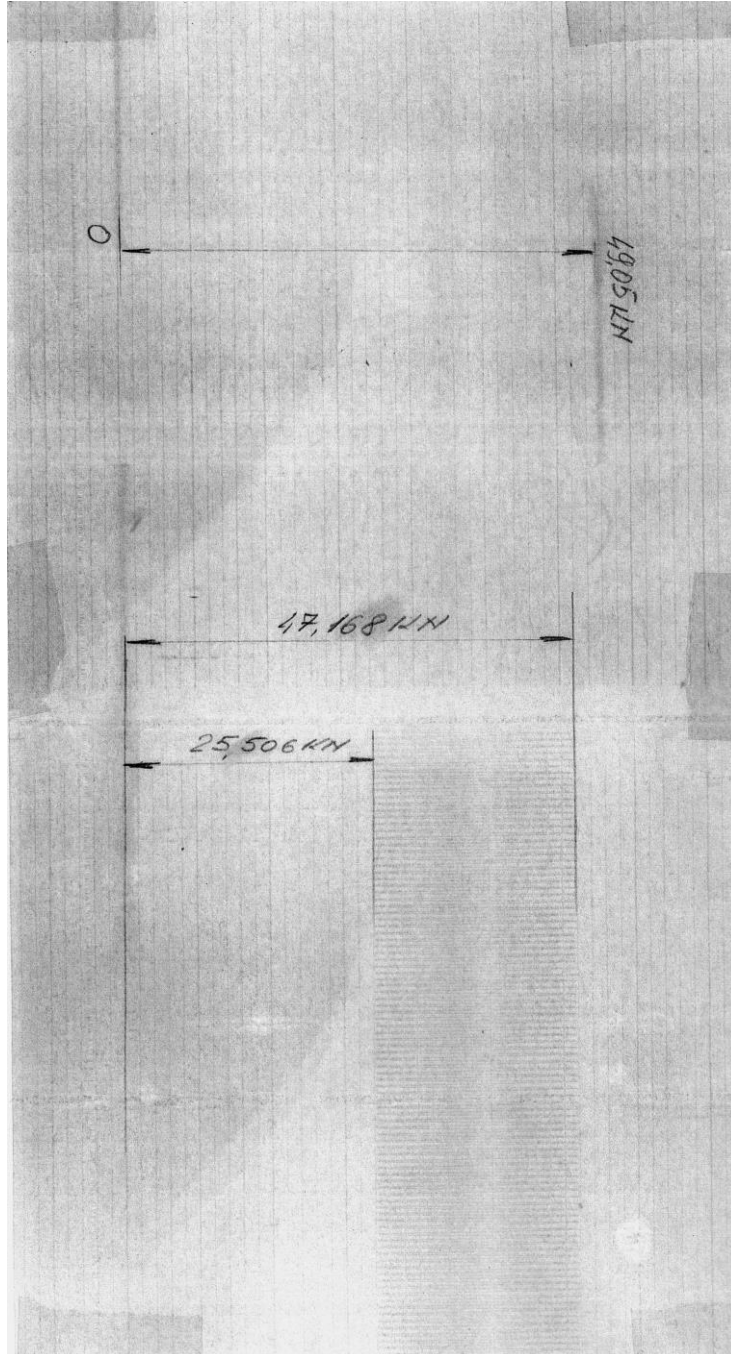


Fig. 6.31 Diagrama regimului de oboseală arc  $\Phi 31$  (200 mii cicluri)

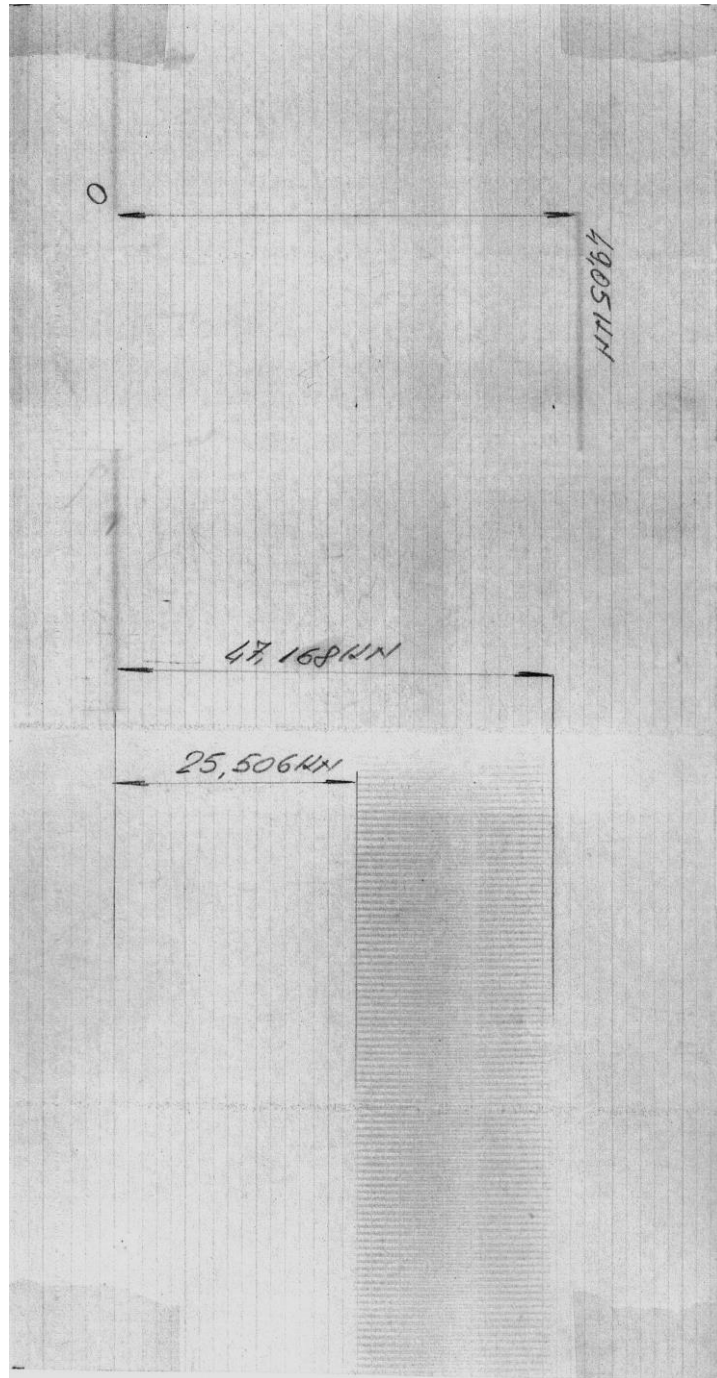


Fig.6.32 Diagrama regimului de oboseală arc  $\Phi 31$  (300 mii cicluri)



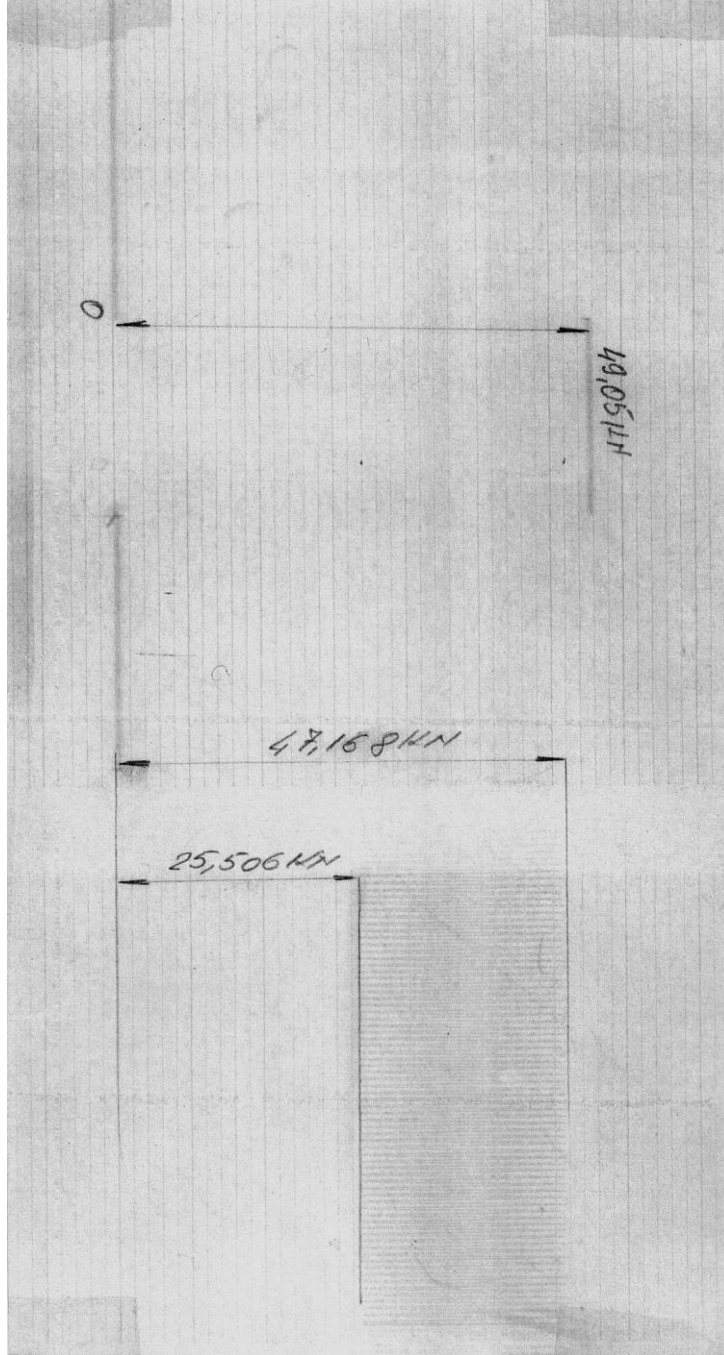


Fig. 6.33 Diagrama regimului de oboseală arc  $\Phi 31$  (400 mii cicluri)

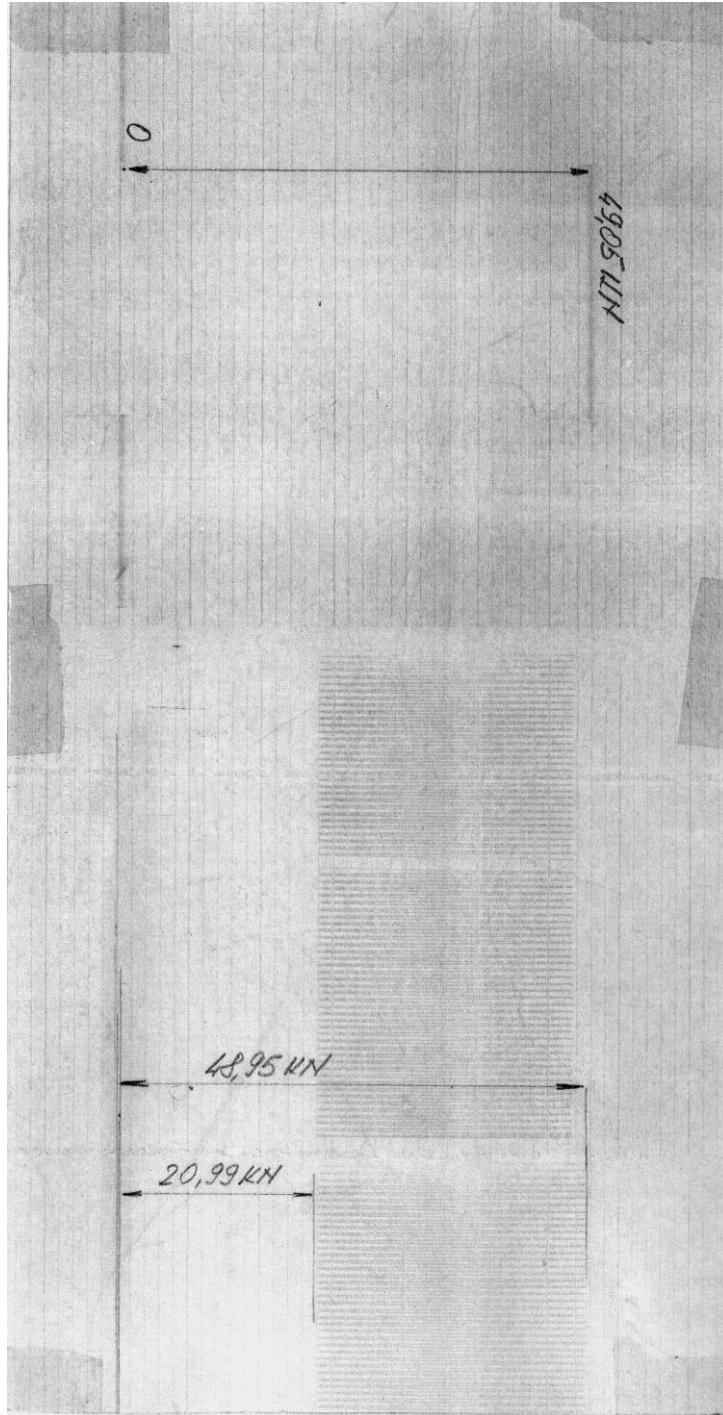


Fig. 6.34 Diagrama regimului de oboseală arc  $\Phi 30$

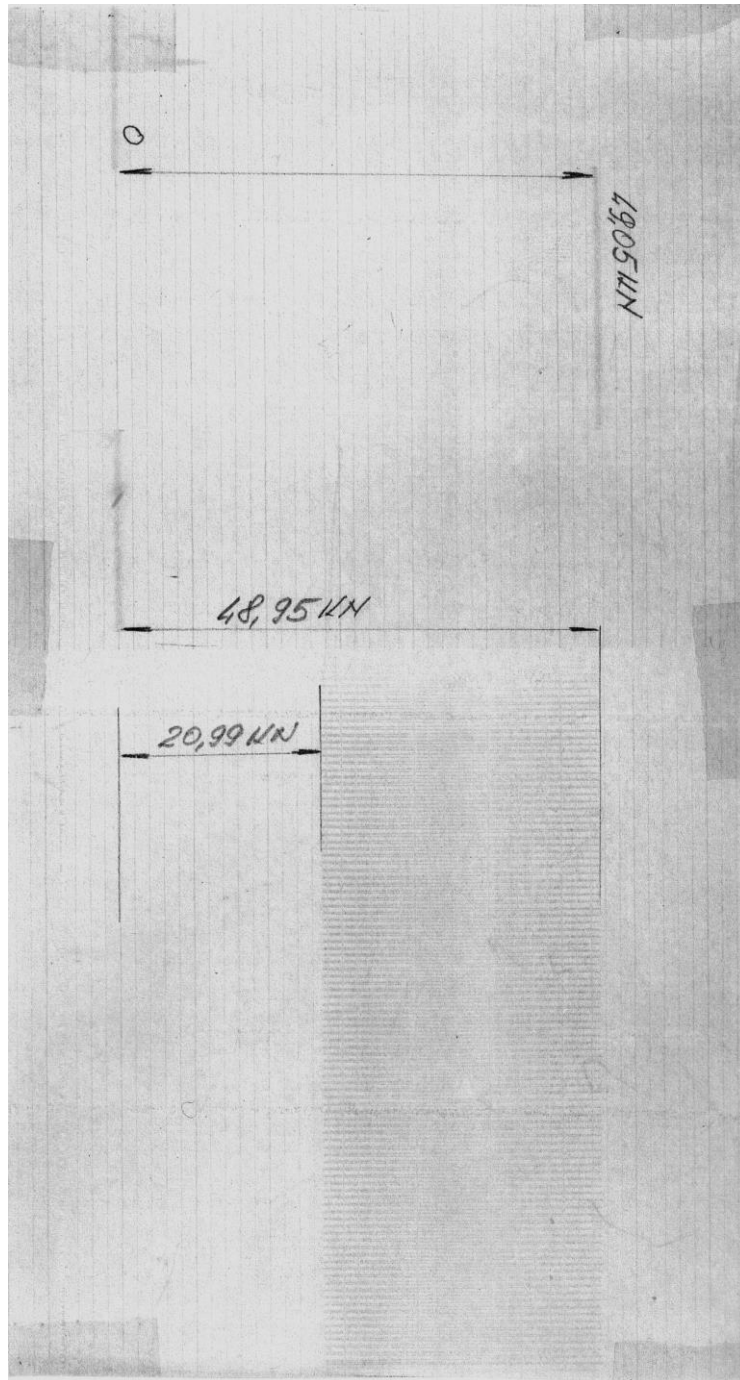


Fig. 6.35 Diagrama regimului de oboseală arc  $\varnothing 30$  (50 mii cicluri)

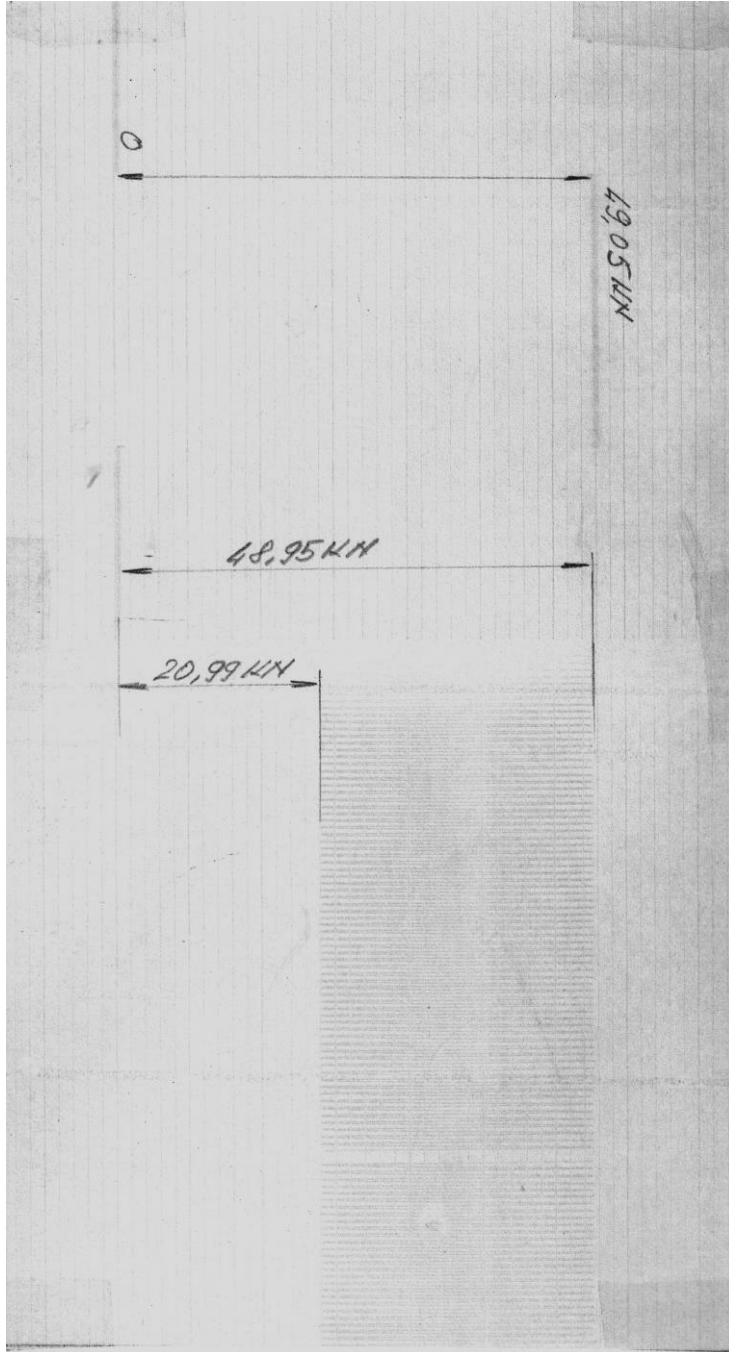


Fig. 6.36 Diagrama regimului de oboseală arc  $\Phi 30$  (100 mii cicluri)



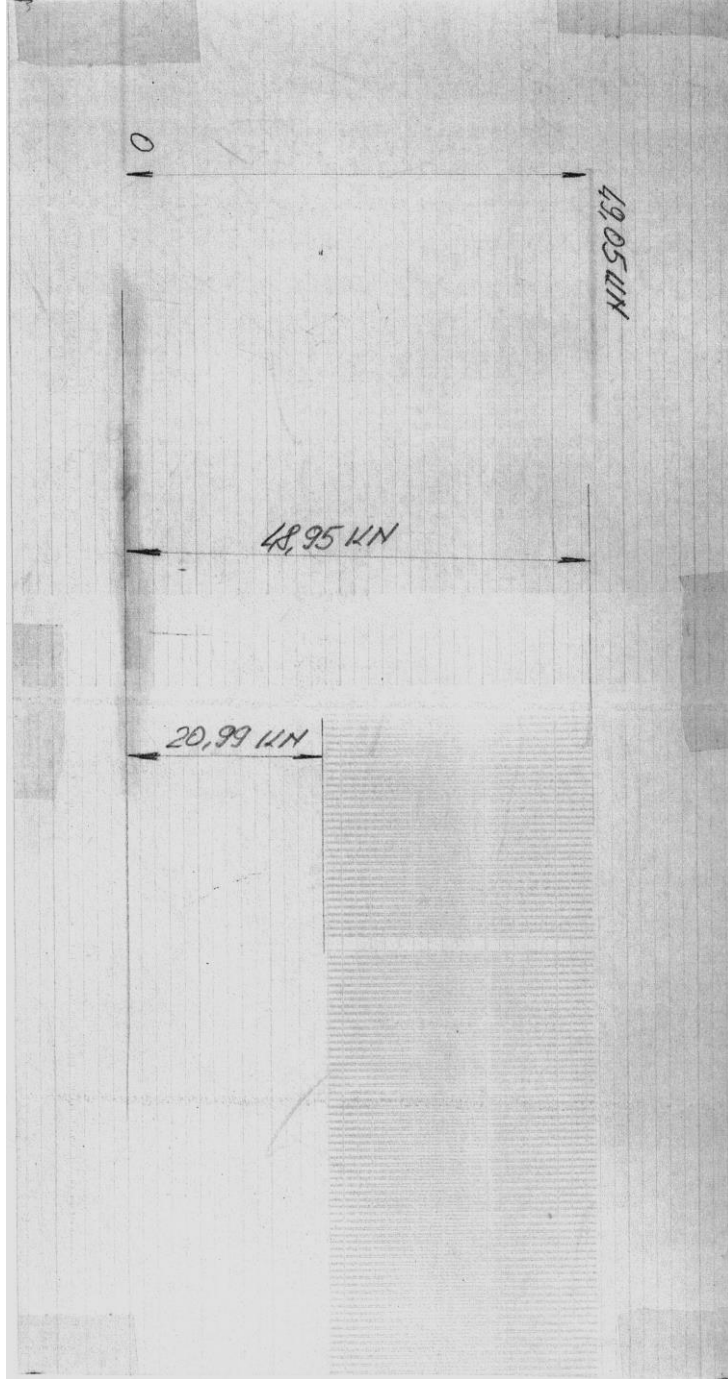


Fig. 6.37 Diagrama regimului de oboseală arc  $\varnothing 30$  (200 mii cicluri)

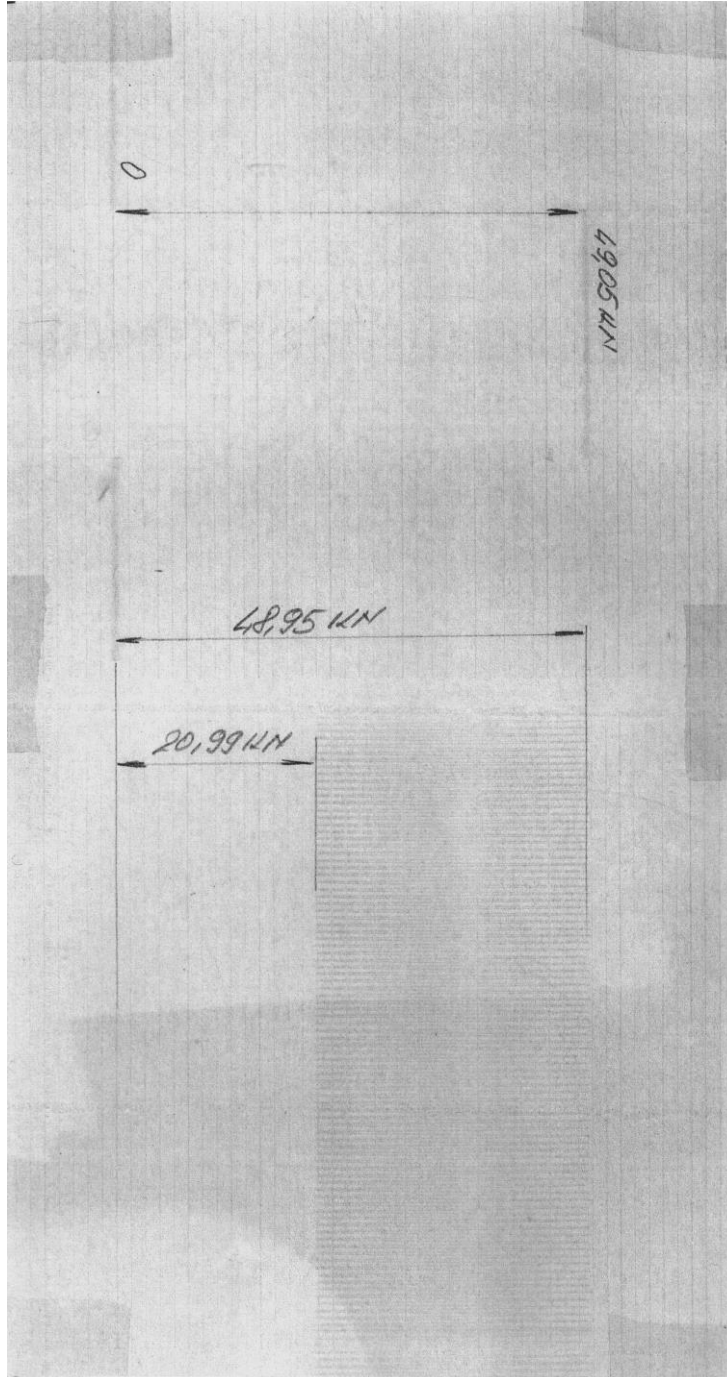


Fig. 6.38 Diagrama regimului de oboseală arc  $\Phi 30$  (300 mii cicluri)

Din analiza rezultatelor experimentale rezultă:

- pentru arcul  $\Phi 31$

După efectuarea încercării de oboseală s-a efectuat diagrama statică a arcului  $\Phi 31$  și s-au constatat următoarele:

- la forța de 47,168 kN s-a obținut o cursă de 127 mm;
- înălțimea liberă a arcului este de 419,5 mm;
- nu au apărut fisuri vizibile cu ochiul liber.

În concluzie arcul  $\Phi 31$  mm a răspuns favorabil la încercarea de oboseală. Această diagramă se găsește în fig. 6.39.

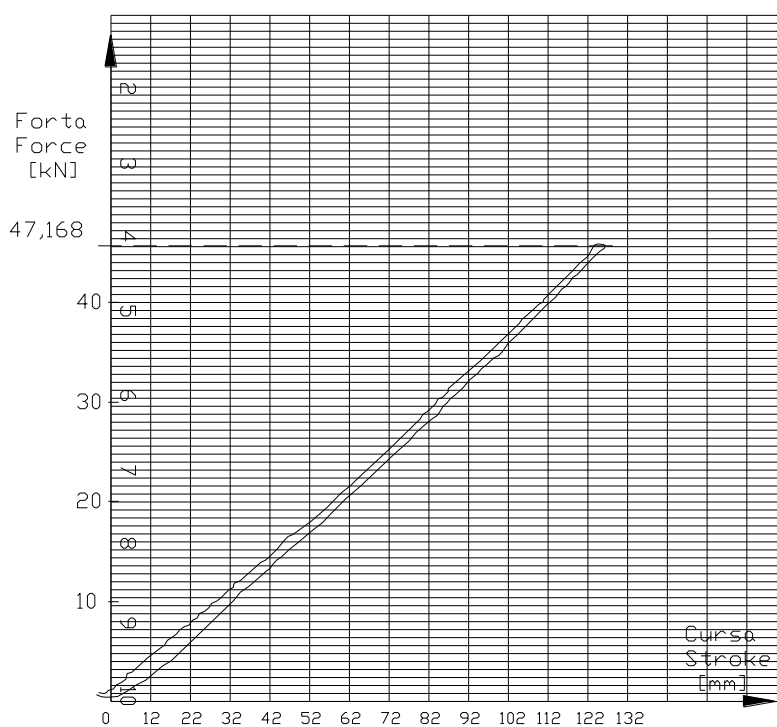


Fig. 6.39. Diagrama statică după efectuarea încercării la oboseală  
Arc  $\Phi 31$

Încercările au fost întrerupte la arcul  $\Phi 30$  mm după 366500 cicluri de solicitare întrucât arcul s-a rupt. Rezultă evident că acest arc nu a corespuns la încercările de oboseală deoarece s-a rupt înainte de a atinge numărul de cicluri impus de 371118 cicluri.



### 6.5 Concluzii

În urma studiului experimental efectuat se desprind următoarele concluzii:

- ruperea datorată solicitării la oboseală se produce fie în spira de capăt fie în general la prima spirală activă unde în mod practic apar cele mai mari solicitări;
- pozițiile diferitelor zone de rupere și împrăștierea mare a lor conduc la concluzia că ruperea prematură la oboseală este favorizată de mai mulți factori tehnologici ce acționează fie separat fie simultan;
- variațiile mari ale dimensiunilor formei geometrice a arcului precum și elemente ce vizează starea suprafeței (rugozitate datorată durificării cu bile, imprimări pe suprafață apărute în timpul deformării plastice sau în timpul încărcării datorită contactului punctiform în zona spirelor de capăt) și nivelul tensiunilor interne pot fi evident cauze ce să conducă la ruperi premature;
- din analiza suprafețelor de rupere rezultă că fisura se poate amorsa în fibra interioară a spirei ce prezintă reziduri provocate de dorn la realizarea arcului;
- microfisurile provocate de bile în timpul tratamentului de ecrusare pot fi amorse de fisură ce să determine o micșorare a rezistenței la oboseală;
- eventualele exfolieri pot fi cauza propagării fisurii de la suprafață spre interior;
- încercările de oboseală efectuate pentru arcul  $\varnothing 31\text{mm}$  și  $\varnothing 24,4\text{mm}$  pentru care s-a urmărit respectarea întru totul a tehnologiei de execuție au răspuns pozitiv neconstatându-se nici o defecțiune după aplicarea regimurilor de încercare ce urmau să ratifice rezistența la oboseală a acestor arcuri.

## CAPITOLUL 7

# ÎNCERCĂRI SPECIFICE PENTRU DETERMINAREA FIABILITĂȚII

### 7.1. Concepte fundamentale

#### 7.1.1. Conceptul de fiabilitate

Fiabilitatea este un domeniu interdisciplinar care studiază legile degradării în timp a elementelor și sistemelor tehnice. Teoria fiabilității este o știință relativ nouă, dezvoltarea sa având loc cu precădere în cea de-a doua jumătate a secolului al XX-lea.

Noțiunea de fiabilitate, numită inițial siguranță în funcționare, s-a desprins din conceptul mai larg de calitate; noțiunea a apărut în mod natural pentru a exprima dorința beneficiarilor de a utiliza un produs sau sistem tehnic cât mai mult, adică timpul în care acesta este apt să îndeplinească funcția pentru care a fost creat să fie cât mai îndelungat. La achiziționarea unui produs sau sistem tehnic, utilizatorii doresc conservarea în timp a caracteristicilor de calitate ale acestuia; se poate spune deci că fiabilitatea reprezintă calitatea unui produs extinsă în timp, [48].

*FIABILITATEA este aptitudinea unui produs (sistem tehnic) de a îndeplini o funcție, o misiune sau un serviciu (specificate) în condiții date, de-a lungul unei durate de timp precizate.*

Este important de precizat că la îndeplinirea unei funcții, a unei misiuni sau a unui serviciu se au în vedere anumite standarde calitative ale acestor obiective. Un sistem tehnic este nefiabil nu doar în situația apariției unei defectări ci și în cazul în care parametrii de calitate ai misiunii, serviciului sau funcției îndeplinite nu se încadrează în limitele admisibile.

#### Clasificarea fiabilității

- a) din punct de vedere al etapei de realizare:
  - fiabilitatea previzională – determinată pe baza considerentelor legate de concepția și proiectarea sistemului tehnic, precum și pe baza fiabilității elementelor (componentelor) sale în condiții de exploatare prescrise;
  - fiabilitatea experimentală – determinată experimental în laboratoare, pe standuri de probă, fiind simulate condițiile din exploatare ;
  - fiabilitatea operațională – demonstrată de sistemul tehnic în condiții reale de exploatare ;
- b) din punct de vedere al modului de estimare:
  - fiabilitatea nominală – prescrisă în standarde, norme tehnice sau inscripționată pe produs ;
  - fiabilitatea estimată – determinată, cu un interval și un nivel de încredere pe baza datelor obținute fie experimental, prin încercări, fie prin observarea în exploatare a sistemului tehnic.

Fiabilitatea unui sistem tehnic nu este o caracteristică direct măsurabilă dar ea poate fi totuși exprimată din punct de vedere cantitativ astfel: dacă  $T$  este variabila aleatoare reprezentând timpul după care survine defectarea (echipamentul a funcționat fără defectare până la momentul  $T$ ), fiabilitatea  $R(t)$  se exprimă ca fiind probabilitatea de funcționare fără defectare în intervalul de timp  $(0, t)$  :

$$R(t) = P(T > t), \quad (7.1)$$

deci fiabilitatea este dată de probabilitatea ca momentul defectării să fie ulterior momentului de timp la care ne raportăm ("în viitor").

Pentru o singură unitate, funcția de fiabilitate  $R(t)$  poate avea doar valorile 1 sau 0 (îndeplinirea, respectiv neîndeplinirea condiției  $T > t$ ); analiza fiabilității se face însă pe loturi de produse identice, astfel că, pentru un produs de un anumit tip, funcția  $R(t)$  poate lua teoretic orice valoare în intervalul  $[0, 1]$ .

O atenție specială se acordă stabilirii nivelului optim al fiabilității, cel mai des abordat criteriu fiind cel economic; scopul optimizării în acest caz îl constituie obținerea unui raport fiabilitate-cost cât mai favorabil.

Costul ciclului de viață al unui echipament (costul global) are două componente cu tendințe contradictorii [7]: costul de fabricație (producție), care este cu atât mai mare cu cât fiabilitatea echipamentului este mai ridicată, și costul întreținerii, incluzând costurile pieselor de schimb, reparațiilor și reviziilor periodice, care este cu atât mai mare cu cât fiabilitatea produsului este mai scăzută (vezi figura 7.1), o fiabilitate mai mare implicând defecte mai rare și de mai mică amploare.

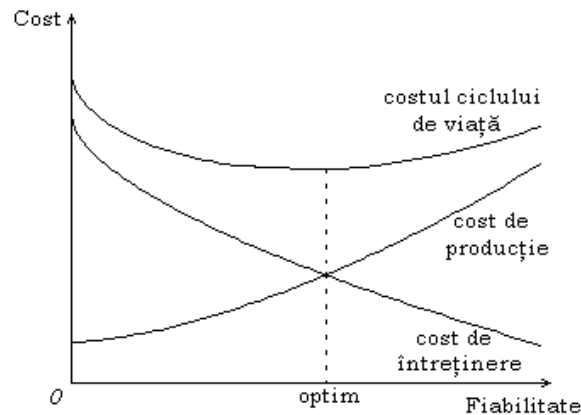


Fig. 7.1. Costul ciclului de viață.

Costul ciclului de viață (costul global) se obține însumând cele două componente. De remarcat că, din punct de vedere al beneficiarului, costul de producție se află într-o legătură de directă proporționalitate cu costul de achiziție.

Soluția optimă din punct de vedere economic corespunde costului global minim.

Criteriul costului minim nu este însă întotdeauna respectat atunci când se decide achiziționarea unui sistem tehnic. În multe cazuri, importanța economică și

socială a serviciului furnizat de echipamentul respectiv prevalează față de criteriul economic. Achiziționarea unui produs se face deci doar după o analiză care să țină cont atât de costuri cât și de implicațiile economice și sociale ale unor eventuale defectări în timpul serviciului.

### 7.1.2. Conceptele de mentenabilitate, mentenanță și disponibilitate

Produsele pot fi împărțite în două categorii:

- produse nereparabile (de unică folosință);
- produse reparabile (cu restabilire).

În cazul primei categorii, comportarea produselor în exploatare este caracterizată doar de parametrii funcționării fără defectare (interesează doar repartiția timpilor de funcționare până la prima defectare, care este și singura).

Din cea de-a doua categorie fac parte în general produsele complexe (sisteme tehnice), având un număr mare de componente, aici regăsindu-se majoritatea echipamentelor industriale, inclusiv vehiculele de cale ferată. În acest caz, comportarea în timpul utilizării este caracterizată atât de parametrii funcționării fără defectare cât și de parametrii reparării (parametrii restabilirii stării de bună funcționare); ca rezultat direct al bunei funcționări și al caracteristicilor restabilirii se obțin parametrii de disponibilitate.

Prin urmare, pentru sistemele tehnice reparabile este necesară introducerea unor noi concepte, strâns legate de conceptul de fiabilitate: mentenabilitate, mentenanță, disponibilitate.

*MENTENABILITATEA este caracteristica unui sistem tehnic de a putea fi rapid readus în stare de bună funcționare după o defectare.*

Mentenabilitatea poate fi exprimată cantitativ într-un mod asemănător cu cel utilizat anterior în cazul fiabilității: dacă  $T$  este variabila aleatoare reprezentând timpul de restabilire a stării de bună funcționare după o defectare a unui sistem tehnic, mentenabilitatea  $M(t)$  se exprimă ca fiind probabilitatea de efectuare a reparației în intervalul de timp  $(0, t)$ :

$$M(t) = P(T < t), \quad (7.2)$$

deci mentenabilitatea este dată de probabilitatea ca momentul încheierii reparației să fie anterior momentului de timp la care ne raportăm.

*MENTENANȚA reprezintă totalitatea activităților desfășurate de beneficiar în vederea menținerii sau restabilirii stării de bună funcționare a unui sistem tehnic.*

Mentenanța poate fi :

- *preventivă* (planificată) : presupune supravegherea bunei funcționări și efectuarea periodică a reviziilor (avându-se în vedere – după caz – reglaje, înlocuiri ale pieselor de uzură, gresare, schimbarea uleiului, etc.) ;
- *corectivă* : presupune readucerea echipamentului în stare de bună funcționare, prin înlocuirea componentelor defecte și efectuarea de reparații.

Mentenabilitatea și mentenanța sunt două noțiuni inseparabile, mentenabilitatea cuantificând calitatea acțiunilor de mentenanță, însă ele nu trebuie să fie confundate: dacă mentenabilitatea reprezintă proprietatea unui sistem tehnic de a fi ușor de întreținut și de reparat, mentenanța presupune operațiile propriu-zise de întreținere și de reparare.

În sensul cel mai general, *DISPONIBILITATEA* unui sistem tehnic se definește ca fiind probabilitatea ca acesta să fie apt de funcționare la un moment dat.

Disponibilitatea unui sistem tehnic depinde de fiabilitatea și de mentenabilitatea acestuia. Un nivel ridicat al fiabilității (probabilitate mare de funcționare fără defectare) și al mentenabilității (probabilitate mare de restabilire rapidă a stării de bună funcționare) atrage după sine o disponibilitate superioară.

Caracteristica de disponibilitate, ce presupune defecte puține (rare) și rapid remediabile, constituie de fapt cerința principală a utilizatorului sistemului tehnic (produsului).

### **7.1.3. Conceptul de calitate**

Conceptul de calitate poate fi definit în multe moduri, literatura de specialitate oferind diferite variante în acest sens, în diversele definiții calitatea fiind identificată cu: gradul de satisfacere al consumatorului, conformitatea față de specificație, satisfacerea unei necesități, capacitatea de a îndeplini o funcție specificată, satisfacerea în totalitate a beneficiarilor, etc.

Conform standardului ISO 8402, *CALITATEA* reprezintă ansamblul de proprietăți și caracteristici ale unui produs sau serviciu care îi conferă acestuia capacitatea de a satisface cerințele exprimate sau implicite ale cumpărătorilor.

O importanță deosebită o are și nivelul tehnic al produselor, el fiind o componentă importantă a calității. Un produs cu un nivel tehnic care nu se situează la cel de vârf existent pe plan mondial (sau cel puțin pe plan național sau regional) nu este competitiv și nu poate fi considerat produs de calitate.

Din punct de vedere al etapei de realizare a calității deosebim calitatea proiectată, calitatea fabricației și calitatea livrată.

Prin urmare, conceptul de calitate are aspecte diferite în funcție de momentul la care ne referim din viața produsului. În faza de proiectare, calitatea se identifică cu viabilitatea din punct de vedere tehnic și economic a produsului și cu măsura în care acesta răspunde necesităților sociale. În faza de fabricație, calitatea este dată de conformitatea produsului cu documentația tehnică, ea fiind influențată de procesul tehnologic, echipamentele de producție utilizate, calificarea și conștiinciozitatea personalului, organizarea controlului tehnic de calitate, etc.

După achiziționarea de către consumator (beneficiar), în timpul utilizării produsului, calitatea se identifică cu fiabilitatea și cu mentenabilitatea acestuia. Întrucât o fiabilitate ridicată (o probabilitate mare de funcționare fără defectare) și o mentenabilitate mai bună (o probabilitate mai mare de restabilire a stării de bună funcționare – după o defectare – într-o durată de timp dată) conduc la un nivel superior al disponibilității echipamentului, se poate spune că, în timpul exploatarei produsului, calitatea acestuia se identifică cu disponibilitatea sa.

Este necesar să se facă distincție între calitatea producției și calitatea produselor; calitatea producției se referă în exclusivitate la procesul de fabricație și ea înglobează toate aspectele calitative ale producției; calitatea produselor este rezultatul direct al calității producției, ea fiind calitatea percepută de către consumator.

Calitatea are în vedere, pe lângă proprietățile intrinseci ale produsului, și aspectele economice legate de realizarea și utilizarea acestuia, o atenție specială fiind acordată optimizării din punct de vedere economic a calității. Cel mai des utilizat criteriu de optimizare este acela al minimizării costului calității. Problema costului calității se pune în mod diferit la producător și la beneficiar, primul având în

vedere realizarea (fabricarea) unor produse de calitate, iar cel de-al doilea urmărind să beneficieze de servicii de calitate de pe urma produsului achiziționat.

Componentele costului calității sunt indicate în figurile 7.2 - pentru producător și 7.3 - pentru beneficiar [2], fiind evidențiat nivelul optim din punct de vedere economic al calității.

Fie că problema costului calității se pune la producător sau la beneficiar, se constată că o investiție inițială mai mare în calitate conduce la cheltuieli ulterioare - pentru remedierea defectelor și pentru întreținere - substanțial reduse.

#### 7.1.4. Modalități de creștere a fiabilității și a mentenabilității

Experiența arată că de-a lungul vieții unui sistem tehnic costurile de exploatare depășesc cu mult costul de achiziție al acestuia. Întrucât fiabilitatea și mentenabilitatea influențează în mod decisiv costurile de exploatare, este important ca realizarea de echipamente cât mai sigure și cât mai ușor și mai rapid reparabile să reprezinte obiectivul principal al producătorului.

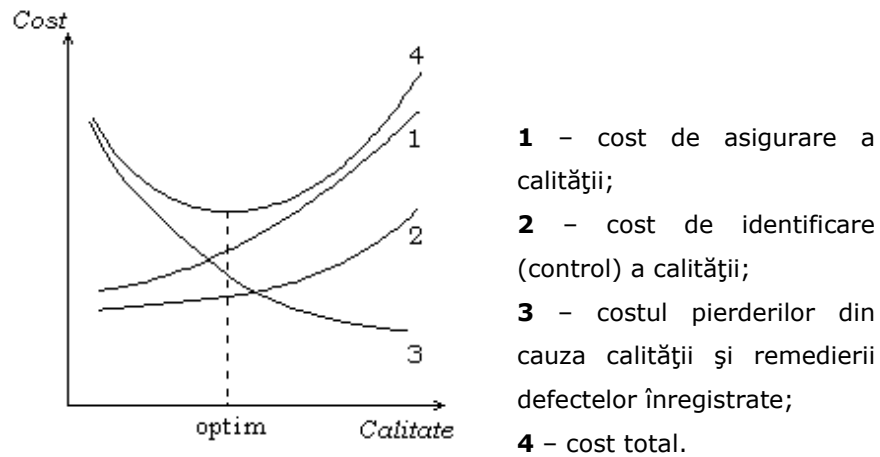


Fig. 7.2. Costul calității la producător.

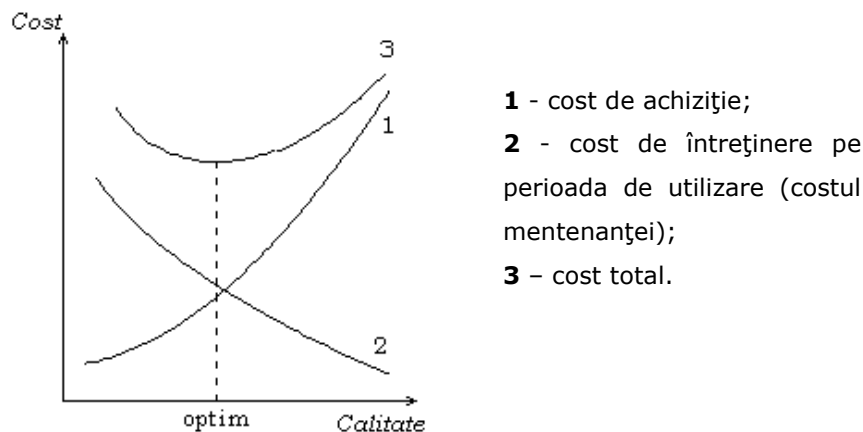


Fig. 7.3. Costul calității la beneficiar.

Măsurile pentru asigurarea fiabilității și mentenabilității trebuie să fie luate avându-se în vedere toate fazele prin care trece un sistem tehnic: proiectare, fabricație, exploatare.

**PROIECTARE:**

- analiza atentă a cerințelor pieței (potențialilor utilizatori);
- stabilirea corectă a tuturor solicitărilor (mecanice, electrice, termice, chimice, etc.) ce intervin și verificarea capacității structurii de a rezista acestora;
- simplificarea, pe cât posibil, a schemelor și utilizarea unor componente fiabile în cadrul acestora;
- utilizarea schemelor cu consecințe limitate la defectare și luarea de măsuri în vederea facilitării reparațiilor;
- evaluarea obiectivă a capacității tehnico-organizatorice a producătorului de a realiza produsul proiectat având caracteristicile dorite.

**FABRICAȚIE:**

- perfecționarea tehnologiei de fabricație;
- automatizarea pe cât posibil a producției;
- aprovizionare tehnico-materială corespunzătoare din punct de vedere al calității;
- ridicarea calificării personalului;
- organizarea unui control tehnic eficace și reglarea statistică a calității producției.

**EXPLOATARE:**

- elaborarea metodelor optime de exploatare;
- colectarea, înregistrarea și prelucrarea datelor referitoare la comportarea produsului în exploatare;
- asigurarea legăturii cu producția și cu proiectarea pentru perfecționarea continuă a produsului pe baza experienței din exploatare.



Producătorul mai trebuie să țină cont de faptul că modificările care se fac în fazele timpurii ale dezvoltării produsului sunt mult mai ieftine decât cele care se efectuează ulterior, când echipamentul se află în fazele de producție și exploatare. De asemenea, la concepția unui produs nou, utilizarea unor componente, subansambluri sau tehnologii verificate în timp - cu condiția ca acestea să fie corespunzătoare din punct de vedere al nivelului tehnic - conduce la creșterea fiabilității produsului.

### 7.1.5. Indicatori de fiabilitate

În paragraful de față se prezintă principalii indicatori de fiabilitate, exprimați prin relații de calcul ale valorilor lor teoretice pentru cazul neparametric, adică în situația în care nu se face apel la legea de repartiție a timpului de bună funcționare. Indicatorii se determină prin prelucrarea datelor experimentale rezultate din observarea funcționării unei mulțimi de echipamente identice, exploatate sau încercate în condiții similare.

Valorile teoretice, numite și valori adevărate, ale indicatorilor de fiabilitate se obțin doar considerând întreaga populație, adică toate produsele de același tip. În caz contrar, adică în situația în care se studiază doar eșantioane ale populației, se obțin estimări ale valorilor teoretice ale indicatorilor de fiabilitate.

Se notează cu  $n(t)$  numărul de produse identice aflate în stare de bună funcționare după scurgerea unui timp  $t$  de la punerea lor în funcțiune. Numărul total de produse observate (testate) este dat de numărul inițial de produse, puse în funcțiune la momentul  $t = 0$ , adică  $n(0)$ .

**1. Funcția de fiabilitate**  $R(t)$  se definește ca probabilitate de bună funcționare în intervalul de timp  $(0, t)$ , care se exprimă prin raportul dintre numărul de produse care au funcționat fără defectare până la momentul  $t$  și numărul total de unități supuse testării:

$$R(t) = P(T > t) = \frac{n(t)}{n(0)}, \quad (7.3)$$

$T$  fiind variabila aleatoare reprezentând timpul de bună funcționare până la defectare.

**2. Funcția de defectare**  $F(t)$  se definește ca probabilitate de defectare în intervalul de timp  $(0, t)$ :

$$F(t) = P(T < t). \quad (7.4)$$

Întrucât buna funcționare și defectarea sunt evenimente contrare, între funcția de fiabilitate și funcția de defectare există relația:

$$R(t) + F(t) = 1, \quad (7.5)$$

de unde rezultă:

$$F(t) = 1 - R(t) = \frac{n(0) - n(t)}{n(0)}, \quad (7.6)$$

dar diferența  $n(0)-n(t)$  reprezintă numărul de produse defectate în intervalul de timp  $(0, t)$ , prin urmare funcția de defectare se exprimă prin numărul de unități care s-au defectat până la momentul  $t$  raportat la numărul total de produse.

Fiind definite ca probabilități, funcția de fiabilitate  $R(t)$  și funcția de defectare  $F(t)$  iau valori în intervalul  $[0,1]$  și au proprietățile:

$$R(0) = 1; \quad R(\infty) = 0;$$

$$F(0) = 0; \quad F(\infty) = 1.$$

$R(t)$  este o funcție descrescătoare iar  $F(t)$  o funcție crescătoare în timp. Reprezentarea grafică a celor două funcții este dată în figura 7.4.

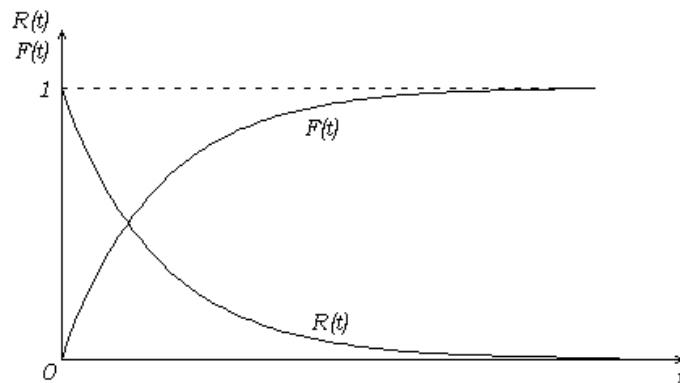


Fig. 7.4. Variația în timp a funcțiilor de fiabilitate și de defectare.

**3. Densitatea de probabilitate a defectărilor  $f(t)$**  (densitatea repartiției timpului de bună funcționare) se definește ca raportul dintre probabilitatea de defectare într-un interval de timp și mărimea intervalului considerat:

$$f(t) = \frac{P(t < T \leq t + \Delta t)}{\Delta t}. \quad (7.7)$$

Probabilitatea de defectare în intervalul  $(t, t + \Delta t)$  este:

$$P(t < T \leq t + \Delta t) = F(t + \Delta t) - F(t) = \frac{n(0) - n(t + \Delta t)}{n(0)} - \frac{n(0) - n(t)}{n(0)} = \frac{n(t) - n(t + \Delta t)}{n(0)}$$

rezultând

$$f(t) = \frac{n(t) - n(t + \Delta t)}{n(0)\Delta t}. \quad (7.8)$$

Cu relația (7.8) se determină valoarea medie a densității de probabilitate a defectărilor în intervalul de mărime  $\Delta t$ . Pentru a obține valoarea instantanee se trece la limită:

$$f(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{n(t) - n(t + \Delta t)}{n(0)\Delta t}. \quad (7.9)$$

**4. Rata de defectare**  $\lambda(t)$  (rata defectărilor), numită uneori și intensitatea de defectare, se definește prin probabilitatea ca un produs aflat în stare de bună funcționare la momentul  $t$  să se defecteze în intervalul  $(t, t + \Delta t)$ , raportată la mărimea intervalului considerat:

$$\lambda(t) = \frac{P(t < T \leq t + \Delta t / T > t)}{\Delta t}. \quad (7.10)$$

Numărătorul expresiei (7.10) constituie o probabilitate condiționată care se scrie, ținând cont și de faptul că  $P(T > t) = R(t)$ ,

$$\begin{aligned} P(t < T \leq t + \Delta t / T > t) &= \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{R(t)} = \frac{\frac{n(0) - n(t + \Delta t)}{n(0)} - \frac{n(0) - n(t)}{n(0)}}{\frac{n(t)}{n(0)}} = \\ &= \frac{n(t) - n(t + \Delta t)}{n(t)} \end{aligned}$$

prin urmare

$$\lambda(t) = \frac{n(t) - n(t + \Delta t)}{n(t)\Delta t}, \quad (7.11)$$

aceasta fiind expresia ratei medii de defectare în intervalul de mărime  $\Delta t$ ; și în acest caz, valoarea instantanee se obține în situația unui interval elementar de timp:

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{n(t) - n(t + \Delta t)}{n(t)\Delta t}. \quad (7.12)$$

Rata de defectare este practic o densitate de probabilitate a defectărilor actualizată continuu, fapt care se evidențiază prin compararea relațiilor (7.9) și (7.12).

**5. Media timpului de bună funcționare**  $MTBF$  (sau timpul mediu de bună funcționare) reprezintă media aritmetică a timpilor de bună funcționare demonstrați de cele  $n(0)$  unități observate:

$$MTBF = \frac{1}{n(0)} \sum_{i=1}^{n(0)} t_i . \quad (7.13)$$

**6. Dispersia timpului de bună funcționare**  $\sigma^2$  exprimă abaterea valorilor timpului de bună funcționare față de valoarea medie:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n(0)} \sum_{i=1}^{n(0)} (t_i - MTBF)^2 . \quad (7.14)$$

**7. Abaterea medie pătratică a timpului de bună funcționare** este rădăcina pătrată a dispersiei

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} = \sqrt{\frac{1}{n(0)} \sum_{i=1}^{n(0)} (t_i - MTBF)^2} . \quad (7.15)$$

**8. Cuantila timpului de bună funcționare**  $t_\alpha$  este definită ca fiind timpul până la care s-au defectat  $\alpha n(0)$  produse. Valoarea corespunzătoare cuantilei  $t_\alpha$  a funcției de fiabilitate este:

$$R(t_\alpha) = 1 - F(t_\alpha) = 1 - \frac{\alpha n(0)}{n(0)} = 1 - \alpha . \quad (7.16)$$

Se precizează că indicatorii de mai sus au fost prezentați făcându-se referire la timpul de funcționare, aceasta fiind situația cea mai frecventă în practică. În funcție de tipul sistemului tehnic analizat, timpul de funcționare poate fi înlocuit cu numărul de kilometri parcurși, numărul de cicluri de funcționare, etc.

### 7.1.6. Controlul fiabilității

#### 7.1.6.1. Teste cenzurate și trunchiate

Principala problemă a controlului fiabilității o constituie durata mare de timp a observațiilor sau încercărilor, cuprinsă între momentul punerii în funcțiune a echipamentelor testate și momentul defectării ultimului dintre ele.

Pentru reducerea perioadei de observare (încercare) se pot însă efectua teste care să nu mai necesite defectarea tuturor unităților eșantionului. Astfel, perioada de testare poate avea o durată limitată, prestabilită (cazul *testelor trunchiate*) sau poate dura până la defectarea unui număr prestabilit de echipamente (cazul *testelor cenzurate*). Ambele tipuri de teste pot fi cu înlocuire sau fără înlocuire, după cum unitățile care se defectează sunt înlocuite sau nu.

De interes în cadrul acestor teste este timpul total de funcționare, care reprezintă suma timpilor de funcționare ai tuturor unităților testate.

În cazul testelor cenzurate fără înlocuire, fiecare defectare determină scăderea cu o unitate a numărului de sisteme tehnice (elemente) aflate în funcționare. Dacă numărul inițial de unități (volumul eșantionului) este  $n$ , iar  $r$  este numărul prestabilit de defectări după care observațiile sau încercările încetează (durata testului fiind dată deci de timpul de funcționare  $t_r$  al elementului cu defectarea de ordin  $r$ ), atunci timpul total de funcționare este alcătuit din suma timpilor de funcționare ai celor  $r$  elemente defectate:

$$\sum_{i=1}^r t_i$$

și suma timpilor de funcționare ai celor  $(n - r)$  elemente aflate încă în funcționare la finalul testului, durata de funcționare a fiecăruia dintre ele fiind egală cu durata testului  $t_r$ :

$$(n - r) t_r .$$

Prin urmare, timpul total de funcționare în cazul testelor cenzurate fără înlocuire este:

$$TTF = \sum_{i=1}^r t_i + (n - r) \cdot t_r . \quad (7.17)$$

Ținând cont de faptul că ultimul element defectat a demonstrat același timp de funcționare ca și cele rămase în funcțiune relația (7.17) se mai scrie:

$$TTF = \sum_{i=1}^{r-1} t_i + (n - r + 1) \cdot t_r .$$

În cazul testelor cenzurate cu înlocuire elementele defectate se înlocuiesc, astfel încât de-a lungul perioadei de testare funcționează în permanență  $n$  unități. În consecință, timpul total de funcționare în acest caz este:

$$TTF = n t_r \quad (7.18)$$

În cazul testelor trunchiate fără înlocuire, încercările sau observațiile au o durată prestabilită (fie aceasta  $T$ ). Dacă de-a lungul acestei perioade se defectează  $r$  unități din totalul de  $n$ , timpul total de funcționare este alcătuit din suma timpilor de funcționare ai elementelor defectate și suma timpilor de funcționare ai celor  $(n - r)$  nedefectate, care au funcționat astfel întreaga perioadă de testare  $T$ :

$$TTF = \sum_{i=1}^r t_i + (n - r) \cdot T . \quad (7.19)$$

În cazul testelor trunchiate cu înlocuire, de-a lungul perioadei de testare  $T$  funcționează în permanență  $n$  unități. Rezultă:

$$TTF = nT. \quad (7.20)$$

### 7.1.6.2. Planuri de control simplu

Indicatorul de fiabilitate cel mai ușor de verificat și, prin urmare, cel mai des avut în vedere în cadrul planurilor de control, este media timpului de bună funcționare *MTBF*. Pentru determinarea acestuia, în cazul unui eșantion constituit din *n* unități identice, trebuie doar să se calculeze media aritmetică a celor *n* timpi de bună funcționare înregistrați. Aceasta presupune însă o durată mare de testare, trebuind să se aștepte defectarea ultimei unități a eșantionului.

Având în vedere necesitatea reducerii perioadei de testare, se pot utiliza pentru verificarea fiabilității două planuri de control simplu [2]:

- Planul [*n*, *r*, *MTBF<sub>a</sub>*]

Este un plan de control simplu cenzurat, parametri săi fiind:

- n* – volumul eșantionului (numărul de unități testate);
- r* – numărul de ordine al defectării care conduce la oprirea testării;
- MTBF<sub>a</sub>* – referința pentru *MTBF* (valoarea minimă admisibilă a mediei timpului de bună funcționare).

Planul constă în:

- testarea simultană, în condiții similare, a *n* unități identice;
- înregistrarea primilor *r* timpi de bună funcționare (primelor *r* momente de defectare), după defectarea de ordinul *r* testarea încetând;
- calculul mediei timpului de bună funcționare (ca estimatie)

$$\hat{MTBF} = \frac{TTF}{r};$$

- compararea valorii calculate cu referința *MTBF<sub>a</sub>*;
- luarea deciziei:
  - dacă  $\hat{MTBF} \geq MTBF_a$ , lotul este corespunzător din punct de vedere al fiabilității;
  - dacă  $\hat{MTBF} < MTBF_a$ , lotul este necorespunzător din punct de vedere al fiabilității.

- Planul [*n*, *T*, *ra*]

Este un plan de control simplu trunchiat, parametri săi fiind:

- n* – volumul eșantionului;
- T* – durata testării;
- ra* – numărul maxim admisibil de defectări.

Planul constă în:

- testarea simultană, în condiții similare, a *n* unități identice;
- contorizarea defectărilor de-a lungul perioadei de testare *T*;
- compararea numărului de defectări înregistrate (*r*) cu referința *ra*;

- luarea deciziei:
  - dacă  $r \leq ra$ , lotul este corespunzător din punct de vedere al fiabilității;
  - dacă  $r > ra$ , lotul nu este corespunzător din punct de vedere al fiabilității.

## 7.2. Probe amortizor aparat tracțiune pentru vagon AVA 200

Amortizorul pentru aparat tracțiune vagon AVA 200 a fost supus încercărilor de flexibilitate și anduranță conform normelor internaționale UIC 827.2.

### 7.2.1. Echipamente de testare

Pentru a realiza proba de flexibilitate s-a utilizat o presă hidraulică EP 400, clasa de precizie 0,1 de fabricație Leipzig -Germania, iar pentru proba de anduranță s-a utilizat o presă hidraulică PHC 60 de fabricație Târgu Jiu - România.

Pentru măsurarea temperaturii s-a utilizat termometru cu contact tip TERMA 1 de fabricație Germania.

### 7.2.2. Metodologia de încercare și rezultatele încercărilor

Încercarea de flexibilitate a fost realizată conform cerințelor UIC 827-2.

Amortizorul a fost așezat pe masa mașinii de încercat după care s-au efectuat trei comprimări la cursa maximă indicată.

În continuare s-au efectuat 20 de comprimări la cursa maximă, menținută 30 secunde, efectuându-se apoi diagrama statică.

Valorile caracteristicilor obținute pentru amortizor sunt următoarele:

- $We = 18,525 \text{ KJ}$ ,  $V/a = 13,325 \text{ KJ}$ ,  $\eta = 71,92\%$ ;
- forța de precomprimare la cursa de 28 mm este de 20 K;
- forța la cursa de 45 mm este de 330 KN;
- forța la cursa de 65 mm este de 570 KN;
- s-a utilizat unsoare tf230 Ca 2 EPM.

Analizând rezultatele prezentate se constată că se încadrează în cerințele impuse de normele UIC.

În figura 7.5 s-a prezentat diagrama amortizorului după proba de flexibilitate, ce a fost supus la încercarea de anduranță conform fișei UIC 827-2.

Amortizorul a fost supus următorului program :

- 200 cicluri cu o sarcină de 85 % din energia înmagazinată;
- 1200 cicluri cu o sarcină de 50 % din energia înmagazinată;
- 3000 cicluri cu o sarcină de 25 % din energia înmagazinată.

Acest program a fost repetat de 3 ori.

Valorile obținute în urma aplicării ciclurilor de încercări sunt următoarele :

- după programul nr. 1 – figura 7.6

$We = 18,2 \text{ KJ}$ ;



262 Încercări specifice pentru determinarea fiabilității - 7

$W_a = 13 \text{ KJ}$ ;  
 $\eta = 71,42 \%$ ;  
forța de precomprimare este de 20 KN ;  
forța la cursa de 45 mm este de 380 KN;  
forța la cursa de 65 mm este de 560 KN;  
s-a utilizat unsoare U 230 Go 2 EPM.

- după programul nr. 2 de solicitare – figura 7.7

$W_e = 17,98 \text{ KJ}$   $W_a = 13,02 \text{ KJ}$ ;  
 $\eta = 72,41 \%$ ;  
forța de precomprimare este de 20 KN;  
forța la cursa de 45 mm este de 380 KN;  
forța la cursa de 62 mm este de 580 KN;  
s-a utilizat unsoare Shell Alvania EP-1.

- după programul nr. 3 de solicitare – figura 7.8

$W_e = 17,08 \text{ KJ}$ ;  
 $V_a = 12,51 \text{ KJ}$ ;  
 $\eta = 73,24 \%$ ;  
forța de precomprimare este de 20 KN;  
forța la cursa de 45 mm este de 380 KN;  
forța la cursa de 61 mm este de 560 KN;  
s-a utilizat unsoare Shell Alvania EP-1.

În timpul încercării de durabilitate s-a urmărit ca temperatura maximă să nu fie mai mare de 60° C. Frecvența de aplicare a solicitării a fost de 1,8 cicluri pe minut.

Temperatura de lucru a fost între 50° C și 55° C.

Frecvența a fost de 1,8 cicluri/minut.

În timpul încercărilor s-au constatat comportări diferite ale setului de arcuri funcție de tipul de unsoare utilizat inițial; unsoare U 230 Ga 2 EPM și cu unsoare Shell Alvania EP-1.

Pentru a clarifica această comportare diferită a setului de arcuri în funcție de tipul de unsoare utilizat, am efectuat încercarea de penetrație conform normelor europene în vigoare.

În urma încercării s-au obținut următoarele rezultate :

Tip unsoare	Determinarea penetrației conf.norm.europene (10 <sup>-1</sup> mm)	
	Determinat	Valoare impusă
U 230 Ca2 EPM	185 - 200	260 - 300
Shell Alvania Ep - 1	280 - 290	

Se constată că unsoarea Shell Alvania Ep – 1 răspunde cerințelor.

*Proba de anduranță de 5000 cicluri*

**1.** Am efectuat un program de 5000 de cicluri conform fișei UIC 827.2 cu amortizorul notat nr.1 care în prealabil a fost supus la încercarea de anduranță de 3 x 4400 cicluri.

Regimul de pulsare este conform fișei UIC 827.2 (85 % din energia potențială de deformație înmagazinată cu frecvența de 1.8 cicluri/minut). S-a folosit tipul de unsoare Shell Alvania EP-1, iar temperatura de lucru a fost cuprinsă între 50 - 55°C.

**2.** După 500 de cicluri amortizorul a fost reuns cu unsoare Shell Alvania EP-1.

**3.** La numărul 878 de cicluri s-a rupt inelul exterior nr. 3 față de suprafața de sprijin jos.

S-a schimbat inelul rupt, s-a reuns amortizorul cu unsoare Shell Alvania EP-1 și s-a continuat proba de anduranță. Temperatura de lucru este cuprinsă între 50 - 55°C.

**4.** După fiecare 500 cicluri aplicate amortizorul a fost uns cu unsoare Shell Alvania EP-1, păstrându-se temperatura de lucru cuprinsă între 50 - 55°C.

**5.** La numărul de 1910 cicluri s-a rupt inelul exterior nr. 2 față de suprafața de sprijin jos. S-a înlocuit inelul rupt, s-a reuns cu unsoare Shell Alvania EP-1 și s-au continuat încercările. Temperatura de lucru este cuprinsă între 50 - 55°C.

**6.** La numărul 2040 de cicluri s-au rupt inelele exterioare 4 și 5 față de suprafața de sprijin jos. În consecință programul de încercări a fost întrerupt.

Programul de încercări a continuat cu încercarea de anduranță de 5000 cicluri asigurându-se un regim de solicitare conform UIC 827.2 (85 % din energia potențială de deformație înmagazinată și o frecvență de 1,8 cicluri/minut) cu un set de amortizor notat nr. 2 în stare nouă. În prealabil s-a efectuat proba de flexibilitate conform fișei UIC 827.2 și încercările de anduranță de 3 x 4400 cicluri. După încercarea de flexibilitate și de anduranță 3 x 4400 de cicluri energia potențială de deformație înmagazinată nu a scăzut sub limitele prescrise, elementele amortizorului nu au prezentat crăpături sau rupturi. Diagrama statică se găsește în figura 7.9.

Programul de încercări de 5000 de cicluri s-a desfășurat astfel:

**1.** Am efectuat un program de 5000 cicluri cu amortizorul notat nr. 2 uns cu unsoare Shell Alvania EP-1, temperatura de lucru fiind cuprinsă între 50 - 55°C.

**2.** După fiecare 500 cicluri amortizorul se unge cu unsoare Shell Alvania EP-1. Temperatura de lucru este cuprinsă între 50 - 55°C.

**3.** La numărul de 2076 cicluri s-a rupt inelul exterior nr. 5 față de suprafața de sprijin jos, s-a înlocuit inelul rupt, s-a uns cu unsoare Shell Alvania EP-1 și s-a continuat proba cu temperatura de lucru între 50 - 55°C.

**4.** La numărul de 2612 cicluri s-a rupt inelul exterior nr. 4 față de suprafața de sprijin jos. S-a schimbat inelul rupt, s-a reuns amortizorul cu unsoare Shell Alvania EP-1 și s-a continuat proba. Temperatura de lucru este cuprinsă între 50 - 55°C.

**5.** La numărul de 4060 cicluri s-au rupt inelele exterioare nr. 5 și 6, Programul de încercări a fost oprit.

Atât amortizorul nr. 1 cât și amortizorul nr. 2 au răspuns favorabil la încercarea de flexibilitate și de anduranță 3 x 4400 de cicluri. La încercarea de anduranță de 5000 de cicluri întrucât au apărut pe parcursul încercărilor 4 rupeuri de inele apreciez conform cerințelor impuse de normele internaționale că amortizorul nu corespunde condițiilor tehnice impuse din punct de vedere al fiabilității. În consecință consider că este necesară urmărirea mai atentă în scopul respectării tehnologiei de execuție și a tratamentului termic aplicat.

Amortizor cu 3 inele cu fantă pentru aparat tracțiune pt. vagon AVA-200

S-a utilizat:

unsoare U-230 Ca 2 EPM  
 $W_e = 18,525 \text{ KJ}$   
 $W_a = 13,325 \text{ K}$   
 $\eta = 71,92$

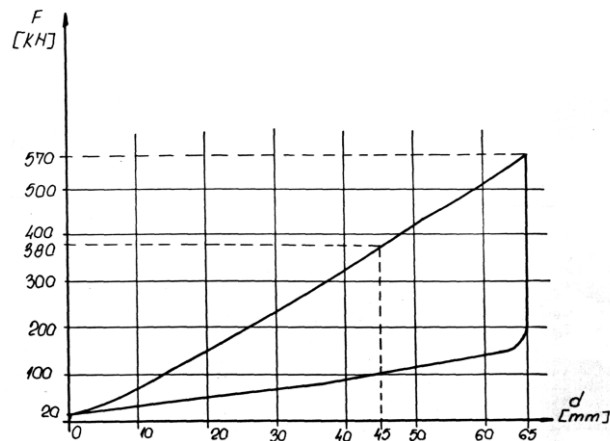


Fig.7.5

Amortizor cu 3 inele cu fantă pentru aparat tracțiune pt. vagon AVA-200

După ciclul nr.1 de solicitare s-a utilizat:

unsoare U-230 Ca2 EPM  
 $W_e = 18,2 \text{ KJ}$   
 $W_a = 13 \text{ KJ}$   
 $\eta = 71,42\%$

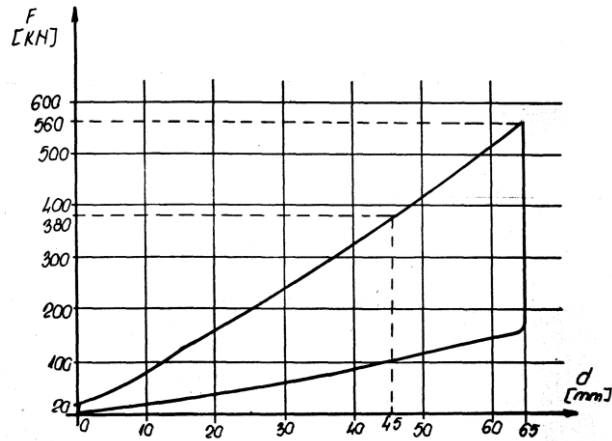


Fig.7.6

Amortizor cu 3 inele cu fantă pentru aparat tracțiune pt. vagon AVA-200

După ciclul nr.2 de solicitare s-a utilizat:

unsoare Shell Alvania EP-1

$W_e=17,98$  Kj

$W_a=13,02$  Kj

$\eta=72,41\%$

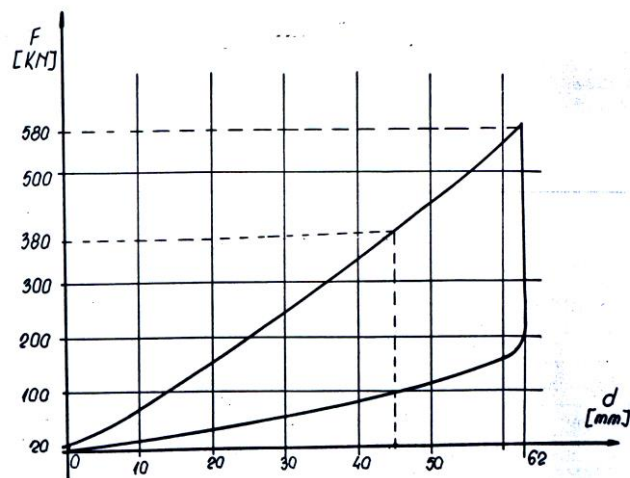


Fig.7.7

Amortizor cu 3 inele cu fantă pentru aparat tracțiune pt. vagon AVA-200

După ciclul nr.3 de solicitare s-a utilizat:

unsoare Shell Alvania EP-1

$W_e=17,08$  Kj

$W_a=12,52$  Kj

$\eta=73,24\%$

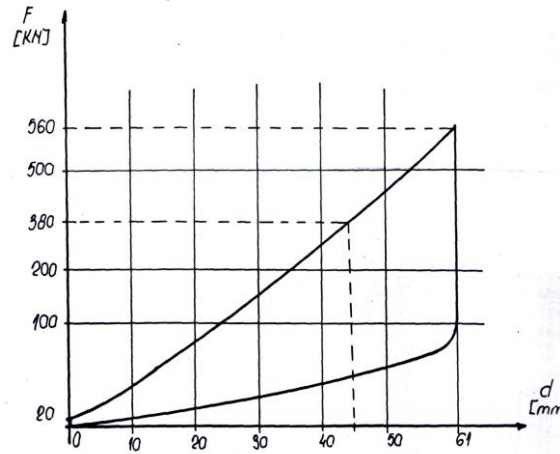


Fig.7.8

Amortizor cu 3 inele cu fantă pentru aparat tracțiune pt. vagon AVA-200

S-a utilizat:

unsoare Shell Alvania EP-1

$W_e=20,15$  Kj

$W_a=14,3$  Kj

$\eta=70,96\%$

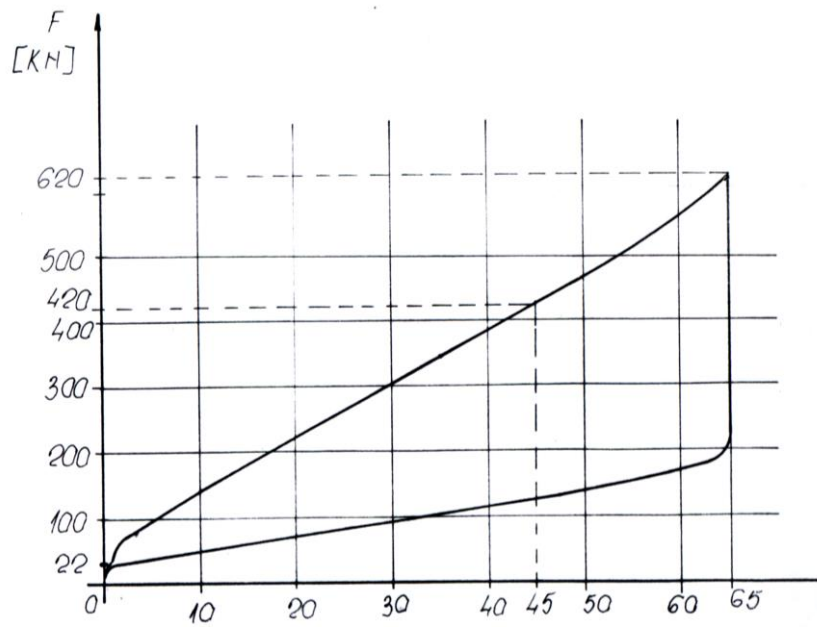


Fig.7.9

### 7.3. Verificarea arcurilor elicoidale

S-au verificat două tipuri de arcuri elicoidale cu următoarele dimensiuni:

- arcul nr. 1 260 x 163 x 31mm<sup>3</sup> (înălțimea arcului x diametrul exterior al arcului x sârma  $\Phi$ );
- arcul nr. 2 234 x 115 x 24mm<sup>3</sup>.

La cele două arcuri s-au efectuat următoarele testări, respectiv verificări:

- testare cu pulbere magnetică asupra defectelor longitudinale și transversale conform UIC 822;
- determinarea compoziției chimice;
- determinarea valorilor caracteristice ale încercării la întindere/la tracțiune conform DIN 10002-1;
- determinarea durității conform DIN EN ISO 6506-1, [62];
- determinarea energiei de rupere conform DIN EN 10045, la încercarea de reziliență;
- verificarea preciziei dimensionale;
- determinarea diagramelor statice;
- test de verificare de anduranță conform normelor DB, TZF 35.

*Testarea cu pulbere magnetică* s-a efectuat după îndepărtarea vopselei de protecție anticorozivă. În urma testărilor efectuate conform UIC 822 nu s-au constatat la primul tip de arc urme de rupturi (crestături). La al doilea tip de arc au existat urme longitudinale și transversale.

*Determinarea compoziției chimice* s-a efectuat prin extragerea materialului de probă dintr-o zonă aflată la mijlocul arcului. Prin utilizarea unui spectrometru de emisie de tip Spectrolab M, respectiv a unui aparat de absorbție infraroșu, tip METALYT CS 100/1000 (pentru conținutul de carbon și de sulf), s-au stabilit pentru compoziția chimică a materialului utilizat valorile din tabelul 7.1:

Tabelul 7.1

Element	Arc 1	Arc 2	Valorile prescrise pentru materialul 50CrV4 conform DIN 17221 [%]
C	0,50	0,50	0,47 – 0,55
Si	0,35	0,34	0,15 – 0,40
Mn	0,95	0,95	0,7 – 1,1
P	0,007	0,007	≤ 0,030
S	0,008	0,007	≤ 0,030
Cr	1,02	1,02	0,9 – 1,2
Mo	0,02	0,02	-
Ni	0,10	0,10	-
Cu	0,17	0,17	-
V	0,11	0,11	0,10 – 0,20

Materialul utilizat la cele două tipuri de arcuri verificate corespunde în ceea ce privește compoziția chimică cerințelor DIN 17221 pentru marca de oțel 50CrV4.

*Încercarea la întindere* s-a făcut cu epruvete de forma B8 x 40 pentru arcul nr.1 și cu epruvete de forma B6 x 30 pentru arcul nr. 2 în acord cu DIN 50125. rezultatele încercărilor efectuate pe ștandul de tip UTS 100 sunt trecute în tabelul 7.2.

Tabelul 7.2

Proba	Limita de întindere $R_{p0,2}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Rezistența la întindere $R_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Întinderea la rupere $A_5$ [%]
1	1511	1636	9,0
2	1548	1712	9,3

Testarea durtății s-a făcut pe două macroprobe prelevate la fiecare tip de arc din zona de mijloc având o lățime de circa 12mm. S-a determinat durtatea Brinel în trei poziții, poziția 1 aflată la 2mm sub suprafața arcului, poziția 3 aflată în centrul secțiunii transversale, iar poziția 2 în zona de mijloc dintre 1 și 3. Rezultatele măsurătorilor sunt în tabelul 7.3.

Tabelul 7.3

Poziția	Durtatea HB 2,5/187,5 la arcuri	
	1	2
1	477	488
2	483	493
3	459	495
Valoarea medie	473	492
Abaterrea standard	± 12,3	± 3,5
Valorile prescrise	424 - 488	424 - 488

Se constată o distribuție aproximativ omogenă a durtății și pentru arcul nr. 2 o depășire a valorii maxime admise de 488 HB prescrisă.

Încercarea de reziliență s-a făcut cu trei epruvete prelevate din fiecare arc având forma și dimensiunile conform DIN EN 10045-1. În urma încercărilor s-au obținut rezultatele din tabelul 7.4:

Tabelul 7.4

Nr. probă	Temperatură de testare [°C]	Energia de rupere KU [J]			Valoarea medie [J]	Abaterrea standard
		1	2	3		
1	RT	13	14	12	13	± 1,0
2	RT	12	13	12	12	± 0,6
Valori precise cf. UIC 821 V pt. marca de oțel 50CrV4	RT	Valoare individuală ≥ 9 (minimum 75% din 13J)			≥ 13	-

RT = 20°C

Se constată că rezultatele obținute pentru arcul nr. 1 respectă întrutotul valorile, iar arcul nr. 2 are energia de rupere medie de 12J, valoare mai mică decât valoarea prescrisă de 13J.

Verificarea preciziei dimensionale s-a realizat prin determinarea înălțimii arcului în patru puncte distribuite pe diametru. Rezultatele experimentale sunt trecute în tabelele 7.5 și 7.6.



Tabelul 7.5

Arcuri de compresiune (interior) $\Phi 24$				
Număr arc	Punct de măsurare 1 (mm)	Punct de măsurare 2 (mm)	Punct de măsurare 3 (mm)	Punct de măsurare 4 (mm)
1	234	234	232	234
2	235	235	233	234
3	235	234	234	234

Tabelul 7.6

Arcuri de compresiune (exterior) $\Phi 31$				
Număr arc	Punct de măsurare 1 (mm)	Punct de măsurare 2 (mm)	Punct de măsurare 3 (mm)	Punct de măsurare 4 (mm)
1	261	260	259	262
2	261	261	260	262
3	262	263	260	261

*Determinarea diagramelor statice.* În figurile 7.11 și 7.12 sunt prezentate diagramele arcurilor elicoidale.

*Test de încercare de duranță.* Regimul de pulsație pentru cele două arcuri este prezentat în tabele 7.7 și 7.8.

Tabelul 7.7

Arcuri de compresiune (interior) $\Phi 24$					
Treapta de sarcină	Lungimea sub sarcina statică [mm]	Cursa superioară [mm]	Cursa inferioară [mm]	Cursa [mm]	Număr de cicluri
1	$L_1 = 203$	$L_0 = 217.8$	$L_u = 188.2$	$\pm 14.8$	$2.0 \times 10^6$
2	$L_1 = 203$	$L_0 = 218.4$	$L_u = 187.6$	$\pm 15.4$	$1.0 \times 10^6$
3	$L_1 = 203$	$L_0 = 219.5$	$L_u = 186.5$	$\pm 16.4$	$1.0 \times 10^6$

Tabelul 7.8

Arcuri de compresiune (exterior) $\Phi 31$					
Treapta de sarcină	Lungimea sub sarcina statică [mm]	Cursa superioară [mm]	Cursa inferioară [mm]	Cursa [mm]	Număr de cicluri
1	$L_1 = 200$	$L_0 = 210.5$	$L_u = 189.5$	$\pm 10.5$	$2.0 \times 10^6$
2	$L_1 = 200$	$L_0 = 212.6$	$L_u = 187.4$	$\pm 12.6$	$1.0 \times 10^6$
3	$L_1 = 200$	$L_0 = 216.7$	$L_u = 183.3$	$\pm 16.7$	$1.0 \times 10^6$

În timpul încercărilor de duranță au fost verificate în mod continuu regimul de pulsare și a fost contorizat numărul de cicluri. Rezultatele testelor de duranță sunt cuprinse în tabelele 7.9 și 7.10.

Tabelul 7.9

Arcuri de compresiune (interior) $\Phi 24,4$		
Număr arc	Joc de pulsație	Observații
1	1128000	Ruptură la prima treaptă de sarcină
2	3354000	Ruptură la a treia treaptă de sarcină
3	1249000	Ruptură la prima treaptă de sarcină

Tabelul 7.10

Arcuri de compresiune (exterior) $\Phi 31$		
Număr arc	Joc de pulsație	Observații
1	4000000	Treapta de sarcină 1-3 trecută
2	4000000	Treapta de sarcină 1-3 trecută
3	4000000	Treapta de sarcină 1-3 trecută

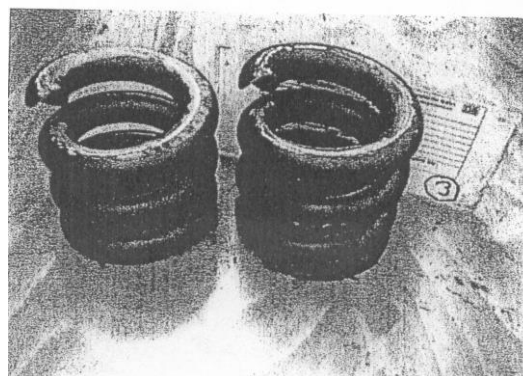
Analizând rezultatele experimentale obținute am desprins următoarele concluzii:

- arcurile  $\Phi 31$  au răspuns pozitiv la încercarea de durabilitate și nu au fost constatate defecte, fisuri sau rupturi;
- la arcurile  $\Phi 24,4$  au fost constatate rupele ale arcului în dreptul primei spire sau la nivelul spirei tei spre patru (aproximativ mijlocul arcului). Rupera arcurilor a fost pentru arcul 1 și 3 în timpul primei trepte de sarcină aplicată, iar pentru arcul 2 la a treia treaptă de sarcină aplicată.

Ca și concluzie finală se impune să remarc că răspunsul negativ la proba de durabilitate a arcului  $\Phi 24,4$  se datorează depășirii valorilor impuse pentru duritate și a neîncadrării în limitele prescrise pentru reziliență semnalate anterior. Se impune respectarea cu strictețe a caracteristicilor mecanice ale materialului prin respectarea tehnologiei de execuție și a tratamentului termic aplicat. Astfel se poate garanta o fiabilitate adecvată acestor tipuri de elemente elastice ce echipează boghiurile vehiculelor feroviare.

În figura 7.10 sunt prezentate fotografiile ale arcurilor elicoidale după testul de verificare la durabilitate.

①

Figura 7.10. Fotografiile arcurilor elicoidale  $\Phi 24$

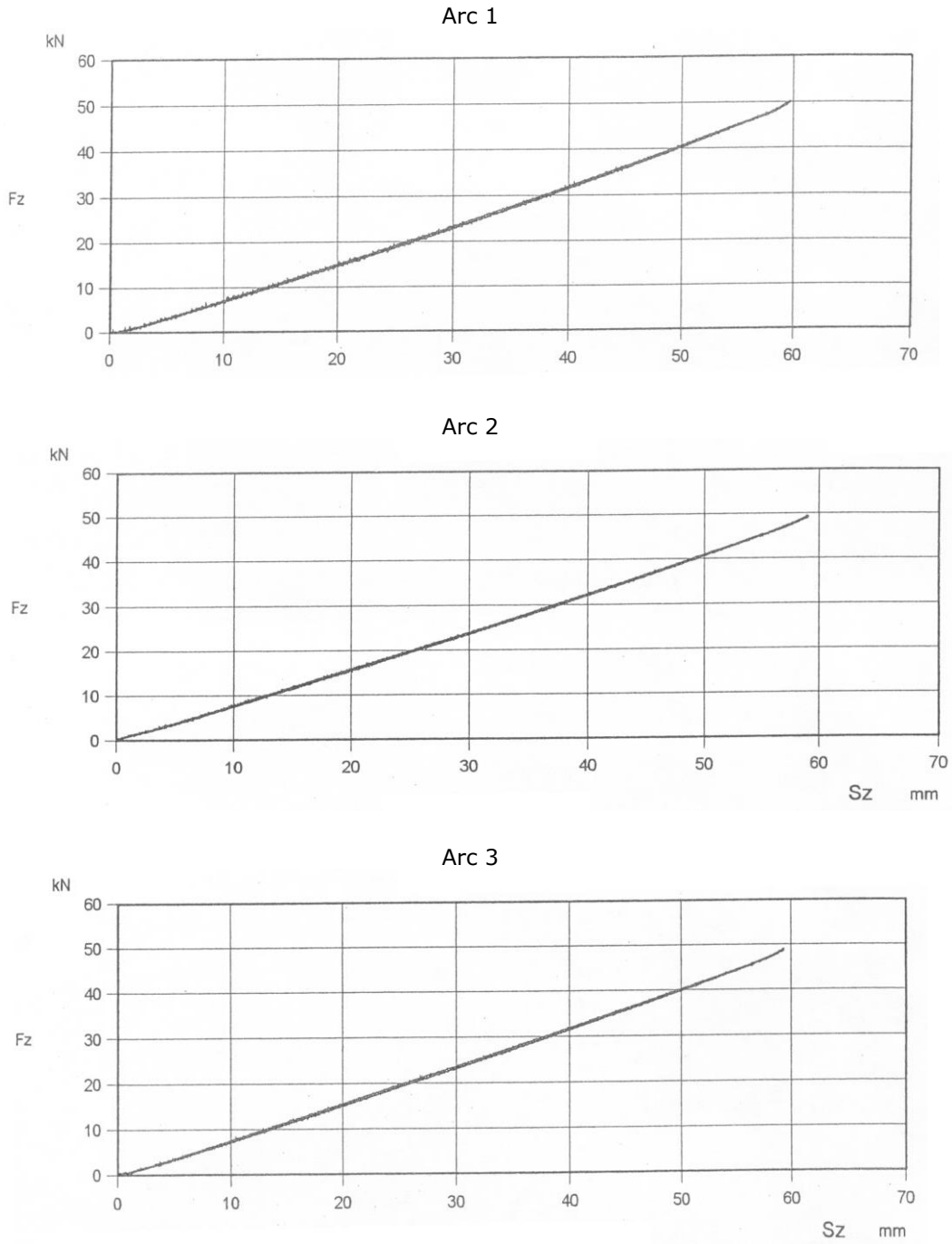


Figura 7.11. Diagramele arcurilor elicoidale  $\Phi 24$

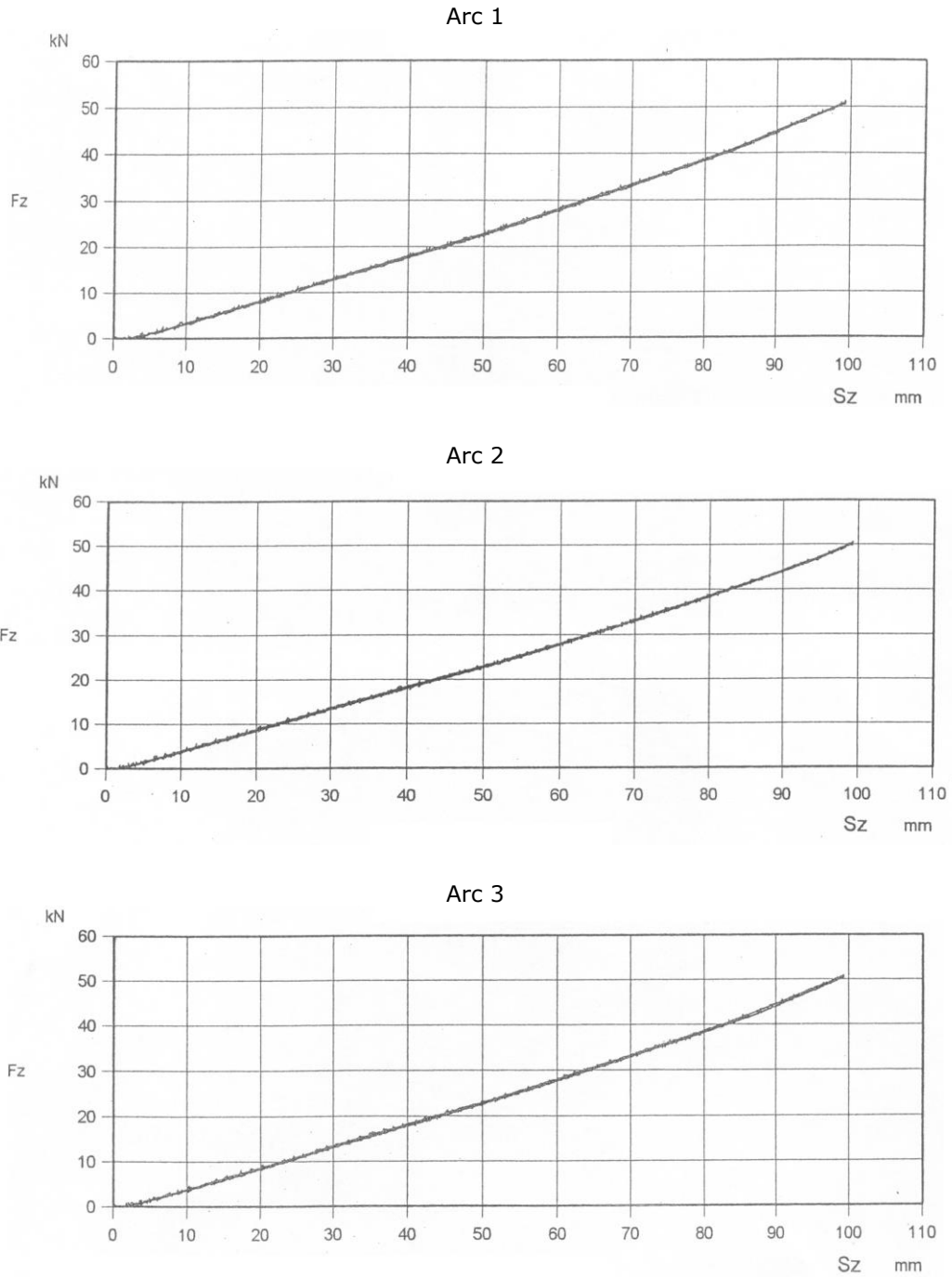


Figura 7.12. Diagramele arcurilor elicoidale  $\Phi 31$

## 7.4 Concluzii

Pentru a controla fiabilitatea unui sistem tehnic sunt necesare informații privind comportarea acestuia în timpul utilizării (funcționării) sale. Interesează în special timpul de bună funcționare demonstrat de diferitele unități. Ideal din punct de vedere al corectitudinii rezultatelor ulterioare - obținute prin prelucrarea datelor înregistrate - ar fi ca informațiile să se refere la întreaga populație adică la totalitatea sistemelor tehnice de același fel. În practică însă, se are în vedere de obicei doar un eșantion, adică o parte a populației.

Informațiile necesare pentru controlul fiabilității se pot obține fie prin observarea (urmărirea) comportării în exploatare a echipamentelor în cauză, fie prin încercarea acestora. Încercările se fac asupra prototipurilor și seriei zero, dar se pot aplica și loturilor din producția curentă, adică produselor lansate deja în fabricație.

De dorit este ca datele referitoare la comportarea sistemului tehnic analizat să rezulte în urma exploatării reale a acestuia, dar acest lucru nu este întotdeauna posibil, informațiile obținute în acest mod fiind de multe ori incomplete sau insuficient de precise. În plus, există și dezavantajul duratei mari de timp între momentul începerii observării și momentul încheierii acesteia, fiind necesar să se defecteze toate unitățile observate. Există astfel riscul ca rezultatele obținute prin prelucrarea datelor înregistrate (indicatori de fiabilitate, componente nefiabile identificate, etc.) să nu mai prezinte mare importanță, sistemul tehnic analizat fiind în curs de uzare morală.

Modalitățile de verificare a fiabilității vehiculelor de cale ferată nu diferă de cele utilizate în cazul altor produse industriale complexe. Vehiculele feroviare au totuși o serie de particularități de care trebuie să se țină cont atunci când se stabilesc strategiile de control.

Astfel, vehiculele de cale ferată sunt sisteme tehnice complexe, cu durată de întrebuințare mare, viața în serviciu fiind de ordinul deceniilor, uzura lor morală fiind relativ lentă. Exploatarea materialului rulant se realizează într-un mod organizat, specific transportului feroviar, informațiile privind natura defectărilor și cronologia producerii acestora în exploatare fiind în principiu mai ușor de obținut decât în cazul altor produse industriale.

Sunt create deci premise pentru dezvoltarea unor bănci de date în care să se centralizeze toate informațiile necesare pentru efectuarea studiilor de fiabilitate pentru diferitele tipuri de vehicule. Ținând cont de importanța economico-socială a serviciului prestat de vehiculele feroviare și de implicațiile grave ale anumitor defectări, o astfel de activitate - de centralizare și prelucrare a datelor rezultate în urma exploatării materialului rulant - ar trebui să fie obligatorie.

Vehiculele de cale ferată sunt sisteme tehnice de mare complexitate, alcătuite din subansambluri care, la rândul lor, sunt compuse din elemente complexe sau/și subansambluri de rang inferior. De exemplu, arcurile metalice sunt elemente ale suspensiei vehiculului, suspensia intrând în componența boghiului, care, la rândul său, este un subansamblu al vehiculului. Această complexitate face ca în cazul unora dintre elemente să fie mult mai relevantă testarea separată a acestora. Revenind la exemplul anterior, mult mai eficace din punct de vedere al controlului și îmbunătățirii fiabilității este încercarea, pe standuri specializate, a amortizoarelor de vibrații, în loc să se aștepte defectarea acestora în timpul exploatării vehiculului. În cazul altor elemente, încercările sunt mai dificil de realizat, informațiile privind comportarea acestora fiind obținute în principal prin observarea în exploatare.

Pentru toate subansamblurile și elementele vehiculelor feroviare, observarea funcționării sau încercarea furnizează, pe lângă datele necesare pentru calculul indicatorilor de fiabilitate, și informații utile (frecvența, tipul și cauzele defectărilor) pentru creșterea fiabilității fiecărui subansamblu (element) în parte. Prin îmbunătățirea fiabilității acestora, fiabilitatea ansamblului (fiabilitatea vehiculului) va fi mai mare.

Cercetarea experimentală efectuată în scopul stabilirii fiabilității amortizorului destinat echipării tracțiunii vagonului AVA200 a reliefat faptul că amortizorii au răspuns favorabil la încercarea de flexibilitate și de duranță 3 x 4400 de cicluri. La încercarea de duranță de 5000 de cicluri întrucât au apărut pe parcursul încercărilor 4 rupeți de inele apreciez conform cerințelor impuse de normele internaționale că amortizorul nu corespunde condițiilor tehnice impuse din punct de vedere al fiabilității. În consecință consider că este necesară urmărirea mai atentă în scopul respectării tehnologiei de execuție și a tratamentului termic aplicat.

Încercările de duranță efectuate în scopul stabilirii fiabilității arcurilor elicoidale au condus la următoarele:

- arcurile Ø31 au răspuns pozitiv la încercarea de duranță și nu au fost constatate defecte, fisuri sau rupturi;
- la arcurile Ø24,4 au fost constatate rupeți ale arcului în dreptul primei spire sau la nivelul spirei tei spre patru (aproximativ mijlocul arcului). Rupera arcurilor a fost pentru arcul 1 și 3 în timpul primei trepte de sarcină aplicată, iar pentru arcul 2 la a treia treaptă de sarcină aplicată.

Ca și concluzie finală se impune să remarc că răspunsul negativ la proba de duranță a arcului Ø24,4 se datorează depășirii valorilor impuse pentru duritate și a neîncadrării în limitele prescrise pentru reziliență semnalate anterior. Se impune respectarea cu strictețe a caracteristicilor mecanice ale materialului prin respectarea tehnologiei de execuție și a tratamentului termic aplicat. Astfel se poate garanta o fiabilitate adecvată acestor tipuri de elemente elastice ce echipează boghiurile vehiculelor feroviare.

## CAPITOLUL 8

### CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE

#### 8.1 Concluzii

Arcurile metalice constituie elemente elastice cu o largă folosire atât la suspensia vehiculelor feroviare ca și izolatori de vibrații cât și la echiparea tampoanelor cuplelor centrale și sistemelor de legare ca izolatori de șoc. O particularitate a arcurilor metalice este că au în general o variație liniară a forței în funcție de săgeată. Rolul arcurilor metalice ce echipează suspensia sau izolatorii de șoc este de a înmagazina energie potențială de deformație și în consecință de a reduce efectele excitațiilor aplicate sistemului mecanic provocând fie reducerea amplitudinilor vibrațiilor atunci când sunt folosite în cadrul suspensiei, fie reducerea amplitudinii șocului atunci când sunt folosite în echiparea izolatoarelor de șoc. Marele impediment al arcurilor metalice este că la orice ciclu de funcționare energia potențială înmagazinată de deformație este redată complet sistemului mecanic sub formă de energie cinetică dacă nu sunt însoțite de elemente care să asigure amortizarea. De aceea în mod imperios desprindem două tipuri de arcuri metalice:

1. arcuri metalice fără amortizare care de regulă funcționează în paralel cu elemente elastice ce pot asigura o amortizare și în consecință posibilitatea disipării unei părți a energiei potențiale de deformație ce nu mai apare în imediat ciclul următor de oscilație. Aceste arcuri sunt arcurile de tip elicoidal, tip bară de torsiune.

2. arcuri metalice cum sunt arcurile cu foi sau de tip Ringfeder care datorită mișcării relative dintre anumite suprafețe, prin frecare columbiană dobândesc calitatea de amortizare și în consecință la fiecare ciclu de funcționare o parte din energia potențială de deformație este eliminată din sistemul mecanic cu consecințe evidente asupra scăderii nivelului amplitudinii excitației introduse în sistem.

Am prezentat tipurile de arcuri metalice utilizate la echiparea vehiculelor feroviare.

Comportarea dinamică atât pe direcție verticală cât și pe direcție transversală a arcurilor elicoidale, cel mai des folosite în echiparea suspensiei vehiculelor feroviare are o serie de particularități, prezentate prin metode de calcul ce pot fi utilizate de proiectanți.

Menționez necesitatea folosirii unor metode moderne de calcul, cum este cea a elementului finit, propunând utilizarea programului ALGOR. Totodată remarc faptul că rezultatele asupra tensiunilor determinate cu programul ALGOR au fost foarte apropiate de rezultatele experimentale.

Programul ALGOR folosește metoda tensiune la noduri, calculele utilizând tensiunile nodale, oferă o acuratețe mai mare decât calculele derivate din tensiunile interioare elementelor. Afișarea tensiunilor la noduri produce o reprezentare mai reală și mai practică a unui model supus unor sarcini, deoarece valorile tensiunilor în noduri sunt mai folositoare decât valorile tensiunilor pe un element întreg. Calcularea tensiunilor la noduri individuale corectează inconvenientele tensiunilor calculate pe elemente întregi. Aprecierea exactă a tensiunilor la noduri e foarte importantă mai ales când nodurile sunt pe suprafața sau pe marginea ansamblului analizat, deoarece aceste noduri coincid de obicei cu zonele critice ale modelului din



punct de vedere al rezistenței. În plus, la evaluarea rezultatelor tensiunilor programul oferă depistarea ușoară a zonelor critice în condițiile existenței valorilor tensiunilor: tensiune echivalentă von Mises, tensiune principală minimă, tensiune principală intermediară, tensiune principală maximă și a tensiunilor ce aparțin tensorului tensiunilor. În consecință compararea acestor rezultate teoretice cu eventuale rezultate experimentale este extrem de facilă.

Imprimarea proprietăților corespunzătoare unui oțel de arcuri se face fie prin tratament termic de călire-revenire, fie prin deformări plastice la rece (ecruisare).

Arcurile executate din semifabricatele durificate prin ecruisare se supun și ele unui tratament termic, și anume unei recoaceri de detensionare, care constă din încălzirea la 230 până la 400°C, urmată de răcire în aer. Acest tratament termic are drept scop eliminarea tensiunilor remanente, apărute cu ocazia operațiilor executate la rece: deformarea plastică a semifabricatului și înfășurarea arcului.

Capacitatea de arcuire a oțelurilor este determinată de modulul de elasticitate. Ca valori orientative se indică  $E = 0,21 \times 10^6 \text{ N/mm}^2$ .

Oțelurile pentru arcuri trebuie să aibă următoarele proprietăți:

- domeniu larg de deformare elastică;
- proprietăți foarte bune de plasticitate;
- rezistență la oboseală mare.

Caracteristicile cerute oțelurilor de arcuri se obțin prin două metode și anume:

- printr-o compoziție chimică adecvată – conținutul de C, Si, Mn mărite și alierea cu Cr și V, precum și alte elemente de aliere;
- printr-un tratament termic obligatoriu de călire și revenire medie sau în unele cazuri se poate face o călire izotermă obținându-se o bainită inferioară.

Pentru a obține un modul de elasticitate mare și o rezistență mare la oboseală arcurile trebuie să conțină un procent mare de Si (în acest caz 1,7%).

Arcurile elicoidale formate la cald sunt supuse unui tratament termic care cuprinde obligatoriu o călire, în apă sau ulei după categoria de oțel folosit, și o revenire urmată de o răcire lentă în aer liniștit. Tratamentul termic nu se efectuează decât după completa răcire - eliminarea căldurii de formare înfășurate.

În vederea asigurării unei mai bune calități a tratamentului termic, se recomandă a se determina în prealabil, temperaturile de călire și revenire în funcție de compoziția chimică reală a oțelului folosit și de a respecta aceasta cu +/- 10°C în cursul operațiilor de tratament termic. Acestea din urmă trebuie să fie conduse de așa manieră încât să evite toate deformațiile și toate formările de calamină ce ar putea influența buna comportare a arcurilor în exploatare și a asigura omogenitatea caracteristicilor arcurilor din aceeași fabricație.

Durabilitatea și comportarea în exploatare a arcurilor depind și de alți factori decât valorile caracteristicilor mecanice: starea suprafeței, gradul de decarburare (din timpul operației de tratament termic); lipsa incluziunilor nemetalice, călibilitatea, regimul tratamentului termic aplicat, omogenitatea structurii, protecția împotriva coroziunii.

Caracteristicile de exploatare sunt dependente de structurile obținute în urma tratamentului termic de călire și revenire medie (cel mai utilizat în cazul arcurilor foi sau elicoidale).

Conform EN 10089 - oțelul 60 Si 17 A (Arc 3) după operația de călire și revenire trebuie să posede următoarele caracteristici mecanice.

$R_m$  160 kgf/mm<sup>2</sup>;  $R_{p0,2}$  = 140 kgf/mm<sup>2</sup>; A%; Z=25%; HCR 40-45.

Structura de revenire medie care conferă aceste proprietăți mecanice este alcătuită din trostită și sorbită. Pentru a putea obține aceste proprietăți mecanice finale după revenirea medie, condițiile impuse oțelurilor după călire este următoarea:

- martensită de călire min 90% în centrul piesei;
- HRC min 50-52.

Pentru obținerea unei cantități mari de martensită, precum și o duritate mare a acesteia, oțelul trebuie să conțină o cantitate mare de C  $0,5 \div 0,65$ ; Mn  $0,8 \div 1\%$  și Cr  $0,3\%$  și V  $0,1 \div 0,2\%$ .

Aceste elemente C, Mn, Cr, V influențează călibilitatea oțelului acționând asupra vitezei critice de călire. Aceste elemente măresc cantitatea de martensită din oțeluri, se pot căli la martensită (martensita ajungând până în centrul piesei) piese cu grosimi mari, iar duritatea oțelului crește.

Viteza critică de călire este viteza minimă de răcire a unui oțel în timpul operației de călire pentru a se putea obține în structură o cantitate de martensită de călire (în caz contrar se pot obține constituenți cum ar fi: trostită, sorbită, perlită, bainită).

Tehnologia actuală de înfășurare nu asigură un pas constant al arcului, ulterior fiind necesară o operație manuală de închidere pe dorn de ajustat a spirelor de capăt și o ajustare a pasului. Operația de înfășurare, în varianta actuală, are încă rezerve de îmbunătățire, fiind necesară o mașină de înfășurat care să închidă automat spirele de capăt, excluzând o ulterioară corecție manuală. De asemenea, transportul coșului cu arcuri cu „manipulatorul” de la cuptorul de încălzire pentru călire până în bazinul cu ulei pentru răcire, necesită un timp relativ mare, care conduce la scăderea temperaturii arcurilor până sub limita admisă.

Pentru evitarea acestor neconformități, tratamentul termic de călire al arcurilor este recomandat să se facă în cuptoare cu bazine de răcire integrate, evitându-se astfel scăderea temperaturii prin transportarea lor și un control mai precis al temperaturii de călire.

Verificarea ecruisării se face cu o singură probă Almen. proba ALMEN nu poate indica eficacitatea procesului de ecruisare decât dacă este utilizată în condiții rigurose determinate.

Prelucrarea mecanică a suprafețelor de așezare, conform tehnologiei actuale, prin modul de prindere a arcului (în „universal”), contribuie la obținerea unor abateri mari de la paralelism și perpendicularitate, abateri care provoacă tensiuni mari în anumite zone ale arcului.

Propun o măsură de îmbunătățire a prelucrării mecanice a suprafețelor de așezare prin realizarea unei operații de polizare cu polizor specializat, cu răcire cu apă așa încât prelucrarea capetelor să fie realizată dintr-o singură operație crescând astfel productivitate.

Pentru creșterea rezistenței la oboseală a arcurilor am propus:

- modul de prindere a arcului (în universal) contribuie la obținerea unor abateri mari de la paralelism și de la perpendicularitate, abateri care provoacă tensiuni de valori mari în anumite porțiuni ale arcului ;
- ca urmare a deformării spirei sub acțiunea forței de așchiere, suprafața rezultată are o rugozitate mare și abateri mari de la planitate ;
- grosimea spirei în zona de capăt poate rezulta la valori mai mici decât cea impusă ;
- deformarea spirei în timpul strunjirii produce tensiuni mari în spirală, existând riscul de amorsare a unor fisuri.

Pentru îmbunătățirea acestei operații am calculat și proiectat un dispozitiv (dorn) nou care permite păstrarea invariantă în spațiu a axei de simetrie AS a arcului, precum și planul frontal PF (figura 3.20 și 3.21).

În urma cercetării efectuate se poate concluziona că procesul de deformare la cald (înfășurare) în varianta actuală, are încă rezerve de îmbunătățire și poate contribui la creșterea calității arcurilor analizate .

Pe măsura creșterii temperaturii de încălzire pentru deformarea plastică, structura devine mai grosolană, apărând ferita aciculară, care reduce mult proprietățile mecanice ale oțelului. Refacerea structurii se poate realiza prin aplicarea unui tratament termic de normalizare în urma căruia se obține o structură apropiată de cea inițială.

În urma cercetării efectuate remarc:

- cu parametrii din tehnologia actuală de călire s-a constatat că duritatea este mai mică decât cea scontată;
- este o „împrăștiere” mare a valorilor de duritate măsurate atât după călire cât și după revenire;
- valorile diferite ale durităților pe probe martor efectuate în atelierul societății se datorează, probabil, unei răcirii premature la deplasarea dintre cuptor și baie, eventual unei răcirii mai puțin energice în baie pentru unele probe;
- pentru îmbunătățirea tratamentului termic de călire și determinarea temperaturii optime de călire, am aplicat metoda „călirilor succesive” în intervalul 820...870 °C.

Din analiza rezultatelor obținute am considerat optimi următorii parametrii :

- temperatura de călire  $T_{inc} = 860$  °C;
- temperatura cuptorului  $T_{cuptor} = 880$  °C;
- durata de încălzire:  $t_{inc} = 30$  minute.

Cu acești parametrii am obținut o duritate mai ridicată, iar valorile acestor durități au fost într-un interval restrâns, practic în intervalul de precizie al aparatului de măsurat.

Pentru determinarea temperaturii optime de revenire s-a apelat la metoda încălzirilor succesive, în intervalul 350...550 °C, efectuate pe 5 probe, în condiții de laborator. Am ajuns la concluzia că intervalul optim pentru realizarea durității prescrise se întinde, din punctul de vedere a temperaturii, pe intervalul de 400-450 °C, care produce durități finale între 45 și 50 HRC.

De remarcat că, la acest tratament de revenire, valorile de duritate măsurate sunt, de asemenea, cu împrăștierea mai redusă, fapt datorat mai ales structurii de călire mai uniforme

Studiul metalografic relevă prezența unei structuri de revenire corecte, cu păstrarea parțială a aspectului acicular produs de călire, ușor estompat prin difuzia produsă la revenire.

Intervalul relativ mare de temperatură și de duritate acceptată, face posibilă adoptarea a două strategii diferite de abordare a producerii unor arcuri cu o rezistență la oboseală acceptabilă din punctul de vedere al încercărilor impuse:

1. varianta cea mai probabilă din punctul de vedere al datelor existente indică o posibilă cauză a rezistenței insuficiente la oboseală, existența microfisurilor din suprafață ca amorse de fisuri prin oboseală și care se propagă în timpul ciclurilor de oboseală distrugând prematur mare parte din secțiunea arcului. La aceste tipuri de arcuri cu solicitări importante de oboseală, unde se aplică tratamente de suprafață destinată reducerii probabilității de apariție superficială a microfisurilor

(așa cum par a fi cazurile analizate) o duritate mai redusă face ca ecruisarea să fie mai puternică, iar efectul tratamentului superficial mai semnificativ.

În concluzie, în cazul realizării unei căliri optime, trebuie să se adopte reveniri în jurul valorii de 450 °C/h, cu răcire în aer. Această măsură, împreună cu altele, la nivelul tehnologiei de ecruisare superficială cu bile, care se vor realiza separat, vor avea ca efect pregătirea superioară a suprafeței și îmbunătățirea comportării la oboseală.

2. dacă rezultă că arcul este suprasolicitat din punctul de vedere al calculului de rezistență, sau eventul în imediata apropiere a zonei de solicitare maxim admisibilă pentru solicitările de oboseală, este de dorit maximizarea proprietăților mecanice ale materialului, iar duritățile să fie maxime (spre 50 HRC), ceea ce va corespunde și unei rezistențe mecanice spre valori maxime. Îmbunătățirea condițiilor de suprafață prin ecruisare trebuie și în acest caz optimizate, ținând seama de duritățile mai mari ale arcului.

Eficacitatea ecruisării se determină cu ajutorul probei Almen. Proba Almen nu poate indica eficacitatea procesului de ecruisare decât dacă este utilizată în condiții riguros determinate.

Menționez necesitatea utilizării căilor de eliminare a microfisurilor în procesul de ecruisare:

- arcurile să aibă durități medii sau spre minim față de valoarea maxim acceptată (50 HRC);
- materialul bilelor să nu prezinte durități exagerate;
- diametrul bilelor să nu fie prea mare. O mențiune specială pentru distribuția acestor diametre, bilele trebuind să fie sortate, fără muchii sau ciupituri și fără alte deșeuri;
- presiunea de expulzare a bilelor să fie redusă, în cazul în care se constată apariția microfisurilor.

În tehnologia actuală se folosește o singură probă Almen, montată pe o porteprovă fixată pe un arc „martor”. Acest arc „martor” se ecruisează odată cu loturile de arcuri. Folosirea unei singure epruvete Almen nu poate determina eficacitatea ecruisării în toate zonele arcului (interior-exterior, sus-mijloc-jos).

Pentru îmbunătățirea procesului de ecruisare consider că trebuie :

- pentru tehnologia actuală trebuie folosite mai multe epruvete Almen, fixate pe porteprovete amplasate în diferite zone ale arcului, conform figurii 5.6.
- introducerea unei operații suplimentare de ecruisare la cald, ulterior celei de ecruisare la rece, introdusă de firma MAN GmbH din Munchen în colaborare cu Boehler Federn GmbH din Duesseldorf.

Pentru tehnologia actuală am determinat experimental timpul optim pentru ecruisarea arcurilor. Din analiza rezultatelor se observă că, pentru instalația „SIESSON - LEHMANN” utilizată, timpul optim este de 10 minute.

Pentru acest timp s-au obținut caracteristicile mecanice (rezistența la rupere și limita de curgere) cele mai ridicate. O durată mai mare scade aceste caracteristici și poate duce la apariția fisurilor de suprafață.

În urma studiului experimental efectuat asupra rezistenței la oboseală a arcurilor elicoidale se desprind următoarele concluzii:

- ruperea datorată solicitării la oboseală se produce fie în spira de capăt fie în general la prima spiră activă unde în mod practic apar cele mai mari solicitări;
- pozițiile diferitelor zone de rupere și împrăștierea mare a lor conduc la concluzia că ruperea prematură la oboseală este favorizată de mai mulți factori tehnologici ce acționează fie separat fie simultan;

- variațiile mari ale dimensiunilor formei geometrice a arcului precum și elemente ce vizează starea suprafeței (rugozitate datorată durificării cu bile, imprimări pe suprafață apărute în timpul deformării plastice sau în timpul încărcării datorită contactului punctiform în zona spirelor de capăt) și nivelul tensiunilor interne pot fi evident cauze ce să conducă la ruperi premature;

- din analiza suprafețelor de rupere rezultă că fisura se poate amorsa în fibra interioară a spirei ce prezintă reziduri provocate de dorn la realizarea arcului;

- microfisurile provocate de bile în timpul tratamentului de ecruisare pot fi amorse de fisură ce să determine o micșorare a rezistenței la oboseală;

- eventualele exfolieri pot fi cauza propagării fisurii de la suprafață spre interior;

- încercările de oboseală efectuate pentru arcul Ø31mm și Ø24,4mm pentru care am urmărit respectarea întrutotul a tehnologiei de execuție au răspuns pozitiv neconstatându-se nici o defecțiune după aplicarea regimurilor de încercare ce urmau să ratifice rezistența la oboseală a acestor arcuri.

Pentru a controla fiabilitatea unui sistem tehnic sunt necesare informații privind comportarea acestuia în timpul utilizării (funcționării) sale. Interesează în special timpul de bună funcționare demonstrat de diferitele unități. Ideal din punct de vedere al corectitudinii rezultatelor ulterioare - obținute prin prelucrarea datelor înregistrate - ar fi ca informațiile să se refere la întreaga populație adică la totalitatea sistemelor tehnice de același fel. În practică însă, se are în vedere de obicei doar un eșantion, adică o parte a populației.

Informațiile necesare pentru controlul fiabilității se pot obține fie prin observarea (urmărirea) comportării în exploatare a echipamentelor în cauză, fie prin încercarea acestora. Încercările se fac asupra prototipurilor și seriei zero, dar se pot aplica și loturilor din producția curentă, adică produselor lansate deja în fabricație.

De dorit este ca datele referitoare la comportarea sistemului tehnic analizat să rezulte în urma exploatarei reale a acestuia, dar acest lucru nu este întotdeauna posibil, informațiile obținute în acest mod fiind de multe ori incomplete sau insuficient de precise. În plus, există și dezavantajul duratei mari de timp între momentul începerii observării și momentul încheierii acesteia, fiind necesar să se defecteze toate unitățile observate. Există astfel riscul ca rezultatele obținute prin prelucrarea datelor înregistrate (indicatori de fiabilitate, componente nefiabile identificate, etc.) să nu mai prezinte mare importanță, sistemul tehnic analizat fiind în curs de uzare morală.

Modalitățile de verificare a fiabilității vehiculelor de cale ferată nu diferă de cele utilizate în cazul altor produse industriale complexe. Vehiculele feroviare au totuși o serie de particularități de care trebuie să se țină cont atunci când se stabilesc strategiile de control.

Astfel, vehiculele de cale ferată sunt sisteme tehnice complexe, cu durată de întrebuințare mare, viața în serviciu fiind de ordinul deceniilor, uzura lor morală fiind relativ lentă. Exploatarea materialului rulant se realizează într-un mod organizat, specific transportului feroviar, informațiile privind natura defectărilor și cronologia producerii acestora în exploatare fiind în principiu mai ușor de obținut decât în cazul altor produse industriale.

Sunt create deci premise pentru dezvoltarea unor bănci de date în care să se centralizeze toate informațiile necesare pentru efectuarea studiilor de fiabilitate pentru diferitele tipuri de vehicule. Ținând cont de importanța economico-socială a serviciului prestat de vehiculele feroviare și de implicațiile grave ale anumitor defectări, o astfel de activitate - de centralizare și prelucrare a datelor rezultate în urma exploatarei materialului rulant - ar trebui să fie obligatorie.

Vehiculele de cale ferată sunt sisteme tehnice de mare complexitate, alcătuite din subansambluri care, la rândul lor, sunt compuse din elemente complexe sau/și subansambluri de rang inferior. De exemplu, arcurile metalice sunt elemente ale suspensiei vehiculului, suspensia intrând în componența boghiului, care, la rândul său, este un subansamblu al vehiculului. Această complexitate face ca în cazul unora dintre elemente să fie mult mai relevantă testarea separată a acestora. Revenind la exemplul anterior, mult mai eficace din punct de vedere al controlului și îmbunătățirii fiabilității este încercarea, pe standuri specializate, a amortizoarelor de vibrații, în loc să se aștepte defectarea acestora în timpul exploatarei vehiculului. În cazul altor elemente, încercările sunt mai dificil de realizat, informațiile privind comportarea acestora fiind obținute în principal prin observarea în exploatare.

Pentru toate subansamblurile și elementele vehiculelor feroviare, observarea funcționării sau încercarea furnizează, pe lângă datele necesare pentru calculul indicatorilor de fiabilitate, și informații utile (frecvența, tipul și cauzele defectărilor) pentru creșterea fiabilității fiecărui subansamblu (element) în parte. Prin îmbunătățirea fiabilității acestora, fiabilitatea ansamblului (fiabilitatea vehiculului) va fi mai mare.

Cercetarea experimentală efectuată în scopul stabilirii fiabilității amortizorului destinat echipării tracțiunii vagonului AVA200 a reliefat faptul că amortizorii au răspuns favorabil la încercarea de flexibilitate și de duranță 3 x 4400 de cicluri. La încercarea de duranță de 5000 de cicluri întrucât au apărut pe parcursul încercărilor 4 ruperi de inele apreciez conform cerințelor impuse de normele internaționale că amortizorul nu corespunde condițiilor tehnice impuse din punct de vedere al fiabilității. În consecință consider că este necesară urmărirea mai atentă în scopul respectării tehnologiei de execuție și a tratamentului termic aplicat.

Încercările de duranță efectuate în scopul stabilirii fiabilității arcurilor elicoidale au condus la următoarele:

- arcurile  $\varnothing 31$  au răspuns pozitiv la încercarea de duranță și nu au fost constatate defecte, fisuri sau rupturi;
- la arcurile  $\varnothing 24,4$  au fost constatate ruperi ale arcului în dreptul primei spire sau la nivelul spirei tei spre patru (aproximativ mijlocul arcului). Rupera arcurilor a fost pentru arcul 1 și 3 în timpul primei trepte de sarcină aplicată, iar pentru arcul 2 la a treia treaptă de sarcină aplicată.

Ca și concluzie finală se impune să remarc că răspunsul negativ la proba de duranță a arcului  $\varnothing 24,4$  se datorează depășirii valorilor impuse pentru duritate și a neîncadrării în limitele prescrise pentru reziliență semnalate anterior. Se impune respectarea cu strictețe a caracteristicilor mecanice ale materialului prin respectarea tehnologiei de execuție și a tratamentului termic aplicat. Astfel se poate garanta o fiabilitate adecvată acestor tipuri de elemente elastice ce echipează boghiurile vehiculelor feroviare.

## 8.2 Contribuții personale

1. Am făcut un studiu asupra comportării dinamice atât pe direcție verticală cât și pe direcție transversală a arcurilor elicoidale cel mai des folosite în echiparea suspensiei vehiculelor feroviare. Studiul teoretic subliniază o serie de particularități ce pot fi utilizate în proiectarea acestor arcuri. Am prezentat metode de calcul atât în regim static cât și în regim dinamic pentru majoritatea tipurilor de arc ce pot fi

utilizate de proiectanți atunci când apare problema proiectării unui arc metalic cu anumite caracteristici impuse.

**2.** Subliniez faptul că m-am ocupat de folosirea unor metode moderne de calcul, cum este cea a elementului finit propunând utilizarea unui program pe care l-am agreat datorită conformității cu rezultatele experimentale pe care le-am obținut, programul ALGOR.

**3.** Am constatat că rezultatele asupra tensiunilor determinate cu programul ALGOR s-au dovedit a fi foarte apropiate de rezultatele experimentale. În baza studiilor teoretice prezentate în acest capitol ce au fost confirmate de studiile experimentale, consider că modul de abordare în proiectarea arcurilor metalice trebuie să se bazeze pe metoda elementului finit și chiar pe alte programe diferite de programul ALGOR utilizat de mine pentru că pot să constituie primul pas în proiectarea și desfășurarea cercetării propriuzise ce evident are ca scop stabilirea unei soluții finale, care să răspundă din punct de vedere al duranței necesare, respectiv al fiabilității.

**4.** O măsură de îmbunătățire a prelucrării mecanice a suprafețelor de așezare a arcurilor elicoidale este schimbarea tehnologiei, aceasta să se realizeze printr-o operație de polizare, respectiv utilizarea cu un polizor specializat, cu răcire cu apă. Astfel prelucrarea capetelor se poate realiza dintr-o singură operație (fără finisarea actuală) și o productivitate ridicată.

**5.** Din punct de vedere al rezistenței la oboseală a arcului consider ca fiind importante următoarele aspecte legate de prelucrarea mecanică :

- modul de prindere a arcului (în universal) contribuie la obținerea unor abateri mari de la paralelism și de la perpendicularitate, abateri care provoacă tensiuni de valori mari în anumite porțiuni ale arcului ;
- ca urmare a deformării spirei sub acțiunea forței de așchiere, suprafața rezultată are o rugozitate mare și abateri mari de la planeitate ;
- grosimea spirei în zona de capăt poate rezulta la valori mai mici decât cea impusă ;
- deformarea spirei în timpul strunjirii produce tensiuni mari în spiră, existând riscul de amorțire a unor fisuri.

În consecință propun măsuri tehnologice convenite aplicate la realizarea arcurilor elicoidale.

**6.** Pe baza analizelor și încercărilor se poate concluziona că procesul de deformare la cald (înfășurare) în varianta actuală, are încă rezerve de îmbunătățire și poate contribui la creșterea calității arcurilor analizate (în special la creșterea rezistenței la oboseală), prin următoarele căi :

- creșterea preciziei de înfășurare, care poate conduce la eforturi mai uniforme în spirele arcului și la evitarea contactului punctiform care poate genera amorțire la rupere;
- respectarea temperaturii minime de sfârșit de deformare (830 °C) pentru a se evita neuniformitățile structurale și apariția de fisuri;
- utilizarea unor scule și dispozitive (dorn de înfășurat, dorn de ajustat, masă de ajustat) fără defecte care ar putea să se imprime pe suprafața spirelor.
- controlul structurii și proprietăților nu numai pe probe martor ci și pe arcuri, pentru a se evidenția influența procesului de deformare asupra modificărilor structurale.

**7.** Pentru îmbunătățirea operației de înfășurare a arcului proiectat un dispozitiv (dorn) nou care permite păstrarea invariantă în spațiu a axei de simetrie a arcului, precum și planul frontal.



**8.** Am subliniat că pe măsura creșterii temperaturii de încălzire pentru deformarea plastică, structura devine mai grosolană, apărând ferita aciculară, care reduce mult proprietățile mecanice ale oțelului. Refacerea structurii se poate realiza prin aplicarea unui tratament termic de normalizare în urma căruia se obține o structură apropiată de cea inițială.

**9.** Analizând rezultatele obținute în urma studiului aplicat pentru tratamente termice propun ca fiind optimi următorii parametri :

- temperatura de călire  $T_{inc} = 860$  °C;
- temperatura cuptorului  $T_{cuptor} = 880$  °C;
- durata de încălzire:  $t_{inc} = 30$  minute.

Folosind acești parametri am obținut o duritate mai ridicată, iar studiul metalografic a confirmat calitativ prezența după călire a unei structuri de călire corespunzătoare dominată de martensită fină, cu aspect acicular.

**10.** Am ajuns la concluzia că intervalul optim al temperaturii de revenire este de 400 –450 °C, interval ce asigură valori ale durezzații cuprinse între 45 și 50 HRC, durezzații a căror valori sunt conform celor prescrise.

**11.** Intervalul relativ mare, de temperatură și de duritate acceptată la tratamentele termice, m-a determinat să adopt două strategii diferite de abordare a realizării unor arcuri cu o rezistență la oboseală conform cerințelor impuse:

- realizarea unei căliri optime și a unei reveniri în jurul valorii de 450 °C/h cu răcire cu aer. Această măsură, împreună cu o tehnologie adecvată de ecruisare superficială vor avea ca efect pregătirea superioară a suprafeței și îmbunătățirea comportării la oboseală.

- în condițiile unor solicitări mari la oboseală a arcurilor elicoidale este necesară creșterea caracteristicilor mecanice și a durezzații spre valori maxime. Cu atât mai mult condițiile de suprafață ale arcurilor obținute prin ecruisare trebuie să fie optime, ținând seama de durezzațiile mari adoptate pentru arc.

**12.** Totodată cercetările au relevat că îmbunătățirea rezistenței la oboseală poate fi realizată prin următoarele propuneri:

- ecruisarea la temperatură ambientă (la rece) și apariția unor dislocații sau linii de alunecare în rețeaua cristalină a aliajului metalic, care produc tensiuni de compresiune pe adâncimi de ordinul zecimilor de milimetri. Pe parcursul încercării arcului sau în exploatare are loc un fenomen de „descărcare” a acestor dislocații și diminuarea efectului pozitiv al ecruisării;

- carburile fine precipitate pe parcursul revenirii au efect pozitiv de fixare (pitting) al dislocațiilor și de „păstrare” a ecruisării, dar numai limitat acolo unde pozițiile dislocațiilor și ale precipitatelor coincid. Rezultă că precipitate mai fine și uniform distribuite (realizarea la temperaturi de revenire mai scăzute) vor avea un efect mai favorabil;

- dacă după ecruisarea la rece urmează o încălzire, aceasta va activa difuzia și deplasarea carburilor spre liniile de dislocație, ceea ce accentuează fixarea acestora și păstrarea ecruisării în timpul solicitării la oboseală a arcului;

- ecruisarea la cald mărește densitatea de dislocații și adâncimea stratului pe care se manifestă tensiunile remanente de compresiune.

**13.** Subliniez constatarea că ruperea datorată solicitării la oboseală se produce în spira de capăt, la prima spiră activă, sau în secțiunea de mijloc a arcului unde în mod practic apar cele mai mari solicitări. Acest fapt a fost confirmat atât de încercările la oboseală cât și de faptul că cele mai mari tensiuni rezultate din calculul cu programul ALGOR au existat în aceste zone.

**14.** Am constatat experimental că microfisurile provocate de bile în timpul tratamentului de ecruisare, eventualele exfolieri și reziduri provocate de dorn pot fi amorse de fisură ce să determine o micșorare a rezistenței la oboseală.

**15.** Remarc faptul că modalitățile de verificare a fiabilității vehiculelor de cale ferată nu diferă de cele utilizate în cazul altor produse industriale complexe. Vehiculele feroviare sunt sisteme tehnice complexe, cu durată de întrebuințare mare, viața în serviciu fiind de ordinul deceniilor, uzura lor morală fiind relativ lentă. Totodată prezintă o serie de particularități de care trebuie să se țină cont atunci când se stabilesc strategiile de control și programele de cercetare care să ateste fiabilitatea în condițiile respectării siguranței în circulație. De asemenea remarc faptul că în principiu datele privind natura defectărilor și cronologia producerii lor sunt mai ușor de obținut decât în cazul altor produse industriale.

**16.** Studiile experimentale asupra fiabilității amortizorului destinat echipării vagonului AVA 200 a reliefat faptul că acest tip de amortizor are fiabilitatea necesară doar în condițiile în care se respectă tehnologia de execuție, tratamentul termic aplicat și toate celelalte condiții ce determină o rezistență la oboseală optimă.

**17.** Remarc faptul că respectarea cu strictețe a caracteristicilor mecanice a materialului, a tehnologiei de execuție și a celorlalte tratamente aplicate constituie condiții ce pot asigura o rezistență la oboseală impusă din necesități de fiabilitate ale arcurilor metalice. Multitudinea încercărilor experimentale prezentate având concluzii negative dar și pozitive reliefează în mod flagrant acest lucru și dau valoare afirmației anterioare.

## BIBLIOGRAFIE

1. Ayadi S. , Hadj-Taieb E., Pluvinage G. - "The numerical solution of strain wave propagation in elastical helical springs".
2. Abott, M.B. - "An introduction to the method of the characteristics", American Elsevier New York, 1966.
3. Ayadi S., Hadj-Taieb E. - "Simulation numerique du comportement dynamique lineaire des ressorts helicoidaux", Transactions of the Canadian Society of Mechanical Engineering, In Press, 2006.
4. Babeu Tiberiu, ș.a. - "Analize și încercări pentru evaluarea duratei de viață a utilajelor", Ed. MIRTON, 1999, Timișoara.
5. Becker L.E. , Chassie G.G. , Cleghorn W.L. - "On the natural frequencies of helical compression springs", International Journal of Mechanical Sciences, vol. 44, 2002, p. 825-841.
6. Boiangiu D., Paizi Gh., Enescu N. - "Elementele elastice ale mașinilor", Editura Tehnică București 1967.
7. Burada C., Buga M., Crăsneanu Al. - "Elemente și structuri portante ale vehiculelor de cale ferată", Editura Tehnică București, 1980.
8. Buzdugan Gh., Blumenfeld M. - "Calculul de rezistență al pieselor de mașini" Editura Tehnică București, 1979.
9. Cartiș Ioan - "Tratamente termice - Tehnologie și utilaje", editura Facla, 1982, Timișoara.
10. Cartiș Ioan - "Tratamente termochimice", 1988, Timișoara.
11. Cartiș I., Radu I., Cojerean P. - "Studiul influenței ecruisării cu alice în exploatare a arcurilor spirale", contract cercetare.
12. Cartiș I., Udrescu. - "Tratamente termice, Îndrumător de laborator", Litografia IPTVT, 1989.
13. Cazaud R., ș.a. - "La fatigue des metaux", Ed. Dunod, Paris 1969.
14. Chou P.C., Mortimer R.W. - "Solution of one dimensional elastic wave problems by the method of characteristics", Journal of Applied Mechanics, Trans. ASME, vol. 34, 1967, p. 745-750.
15. Cioclov D. - "Rezistență și fiabilitate la solicitări variabile", Editura Facla, Timișoara, 1975.
16. Cioclov D. - "Mecanica ruperii materialelor", Editura Academică, 1977.
17. Copaci I., s.a. - "Studiu asupra determinării experimentale a caracteristicilor izolatoarelor de șoc destinați echipării vehiculelor feroviare", Lucrările științifice

- ale simpozionului internațional "Universitaria ROPET 2003", Petroșani, Inginerie Mecanică, ISBN 973-8260-37-X, pag. 85-90.
18. Copaci I., s.a. - "Rezistența la solicitări variabile care apar în exploatarea vehiculelor feroviare", Editura MIRTON, Timișoara, 2005.
19. Costello, G.A. - "Radial expansion of impacted helical springs", *Journal of Applied Mechanics*, Trans. ASME, vol. 42, 1975, p. 789-792.
20. Dammak F., Taktak M., Abid S., Dhieb A., Haddar M. - "Finite element method for the stress analysis of isotropic cylindrical helical springs", *European Journal of Mechanics A/Solids* 24, vol. 12, 2005, p. 1068-1078.
21. Dulămiță T., Vasile T., Mălăcea R. - "Utilajul și tehnologia tratamentelor termice", Editura Didactică și Pedagogică, 1981, București.
22. Forest P. - "Fatigue of metals", Pergamon Press, Oxford, 1962.
23. Frost N.E., ș.a. - "Metal Fatigue", Ed. Clarendon Press, Oxford 1974.
24. Gunther W. - "Schwingfestigkeit", VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1973.
25. Haas, T. - "Loading statistics as a basis of structural and mechanical design", *Engineers Digest*, 1962.
26. Hadj-Taieb E., Lili T. - "The numerical solution of the transient two-phase flow in rigid pipelines", *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, vol. 29, 199, p. 501-514.
27. Huțiu, Gh. - "Știința și ingineria materialelor - Analize și încercări", Editura Politehnică Timișoara, 2006.
28. Lawnicki J., Cutler V. - "Effects of understressing and coxing on the fatigue limit of a transverse butt-welded joint", *Journal of Testing and Evaluation*, vol. 9, nr. 1, 1981.
29. Lehmann R., Wirthgen G. - "Ein Verfahren zur Berechnung der Betriebsdauer dynamisch beanspruchter Bauteile aus Stahl", 1969, Mitteilungen.
30. Militaru, R. - "Arcuri elicoidale cu geometrie variabilă", Ed. Politehnică, Timișoara, 2002.
31. Mocanu D., ș.a. - "Încercarea materialelor", Editura Tehnică București, 1982.
32. Mottershead, J.E. - "The large displacements and dynamic stability of spring using helical finite elements", *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 24, Issue 9, 1982, p. 547-558.

- 
33. Nădășan Șt.,ș.a. - "Încercări și analize de metale", Editura Tehnică București, 1965.
34. Niku Lari A. - "Shot-Peening", International Conference on Shot Peening, Paris, 1981
35. Phillips J.W., Costello G.A. - "Large Deflections of impacted helical springs", The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 51, 1972, p. 967-972
36. Popa Dorel - "Cerințe impuse arcurilor pentru vagoane de cale ferată - criterii de alegere a materialelor", Referat nr. 1.
37. Popa Dorel - "Tehnologia și utilaje specifice utilizate la prelucrarea termică a arcurilor", Referat nr. 2.
38. Popa Dorel - "Contribuții la îmbunătățirea fiabilității arcurilor pentru vagoanele de cale ferată", Referat nr. 3.
39. Rusu O. - "Rezistența materialelor. Partea a III-a", Institutul Politehnic București, 1986.
40. Rusu O., Teodorescu M., Lașcu-Simion N. - "Oboseala metalelor. Baze de calcul", Editura Tehnică București, 1993.
41. Salvadis G., Feitzelmayer K., Ostermann M. - "The effect of thermomechanical surface treatment on fatigue behaviour of high strength spring steels", Materialprufung, 7-8/2001, ISSN: 0025-5300, p. 278-282, Carl Hanser Verlag Munchen
42. Sauvage, G. - "Statique et dynamique du ressort helicoidal", Revue Generale des Chemins de Fer, 104e Annee, 1985.
43. Sauvage, G. - "Determining the characteristics of helical springs for application in suspensions of railway vehicles", Vehicle System Dynamics, 13, 1984
44. Sauvage, G. - "Determining the characteristics of helical springs: a simplification for application to railway vehicles", Vehicle System Dynamics, 13, 1984
45. Sebeșan I., Copaci I., Tănăsoiu A., Olaru S. - "Asupra rigidității torsionale și siguranței deraierii boghiului Y25 Lsdi cu sarcina pe osie de 25t/osie", Simpozionul național de Material Rulant de Cale Ferată, Ediția a II-a, București 2004.
46. Sebeșan I., Hanganu D. - "Proiectarea suspensiilor pentru vehicule pe șine", Editura Tehnică București, 1993.
47. Sinha, S.K. , Costello, G.A. - "The numerical solution of the dynamic response of helical springs", International Journal for numerical methods in Engineering, vol. 12, 1978, p. 949-961.

48. Spiroiu M. - "Fiabilitatea și mentenanța vehiculelor feroviare", Editura MATRIXROM, 2006.
49. Stokes, V.K. - "On the dynamic radial expansion of helical springs due to longitudinal impact", Journal of Sound and Vibration, vol. 35, 1974, p. 77
50. Tănăsioiu A. - "Influența elasticităților structurilor portante ale vehiculelor de cale ferată asupra siguranței ghidării", Teză doctorat, București 2006.
51. Timoshenko, S. - "Resistance de materiaux", vol. I, II, Librairie Polytechnique G. Beranger, Paris-Liege, 1947, 1949.
52. Timoshenko, S., Gere, I. - "Mechanics of Materials", Third SI Edition, Chapman&Hall, 1992.
53. Tripa, P. - "Rezistența materialelor", vol. I, Ed. MIRTON, Timișoara, 1999.
54. Tripa, P. - "Rezistența materialelor", vol. II, Ed. MIRTON, Timișoara, 2000.
55. Trușculescu, M. - "Materialotehnica", Editura Politehnică Timișoara, 2005.
56. Wirthgen G. - "Vergleich einiger Berechnungs Verfahren zur Bestimmung der Betriebsdauer dynamisch beanspruchter Bauteile", Mitteilungen, 1970
57. Yildirim, V. - "An efficient numerical method for predicting the natural frequencies of cylindrical helical springs", International Journal of Mechanical Sciences, vol. 41, 1999, p. 919-939.
58. \*\*\*\*\* - ASTM E 466-82 - Conducting Constant Amplitude Axial Fatigue Test of Metallic Materials.
59. \*\*\*\*\* - ASTM E 606-80 - Constant-Amplitude Low Cycle Fatigue Testing.
60. \*\*\*\*\* - ASTM E 647-83 - Constant Load Amplitude Fatigue Crack Growth Rates Above 10<sup>-8</sup> m/cycle
61. \*\*\*\*\* - DIN 17221 - Oțeluri pentru arcuri.
62. \*\*\*\*\* - DIN EN 180 6506-1 - Testul de duritate Brinell (HB).
63. \*\*\*\*\* - ERRI B12 RP 17 - Program încercări rezistență pentru vagoane marfă.
64. \*\*\*\*\* - FIȘA UIC 510-3 - Încercări de rezistență pe stand la boghiuri pe două osii
65. \*\*\*\*\* - FIȘA UIC 517 - "Wagons - Organs de suspension - Normalisation", 2006.
66. \*\*\*\*\* - FIȘA UIC 822.0 - Specificația tehnică pentru furnitura de arcuri elicoidale de

67. \*\*\*\*\* - compresiune formate la cald pentru material rulant motor și remorcat  
- ISO/R 377 - "Steel and steel products - Location and preparation of samples and test pieces for mechanical testing", 1997.
68. \*\*\*\*\* - ISO/R 404 - "Steel and steel products - General Technical Delivery Requirements", 1992.
69. \*\*\*\*\* - ISO/R 642 - "Steel - Hardenability Test by end Quenching (Jominy Test)", 1999.
70. \*\*\*\*\* - ISO/R 79 - "Brinell Hardness Test (HB)", 1968.
71. \*\*\*\*\* - ISO/R 80 - "Rockwell Hardness Test (B and C scales)", 1968.
72. \*\*\*\*\* - EN 10060 - "Hot rolled round steel bars for general purposes - dimensions and tolerances on shape and dimensions", 2003.
73. \*\*\*\*\* - EN 10221 - "Surface quality classes for hot rolled bars and rods - technical delivery conditions", 1995.
74. \*\*\*\*\* - EN ISO 1143 - "Metals - Rotating bar bending fatigue testing", 1975.
75. \*\*\*\*\* - EN ISO 2162-3 - "Technical product documentation - Springs - Part 3: Vocabulary", 1996.
76. \*\*\*\*\* - EN 13906-1 - "Cylindrical helical springs made from round wire and bar - Calculation and Design - Part 1: Compression Springs", 2002.
77. \*\*\*\*\* - EN 13906-2 - "Cylindrical helical springs made from round wire and bar - Calculation and Design - Part 2: Extension Springs", 2001.
78. \*\*\*\*\* - EN 13906-3 - "Cylindrical helical springs made from round wire and bar - Calculation and Design - Part 3: Compression Springs", 2001.
79. \*\*\*\*\* - EN 10089 - "Hot-rolled steels for quenched and tempered springs - Technical deliver conditions", 2002.
80. \*\*\*\*\* - EN ISO 1099 - "Metallic materials - Fatigue testing - Axial force controlled method", 2006.
81. \*\*\*\*\* - EN 10270-2 - "Steel wire for mechanical springs - Part 2: oil hardened and tempered spring steel wire", 2001.
82. \*\*\*\*\* - EN 10270-1 - Steel wire for mechanical springs - Part 1: patented cold drawn unalloyed spring steel wire", 2001.



