

**MINISTERUL EDUCAȚIEI, CERCETĂRII, TINERETULUI ȘI SPORTULUI
UNIVERSITATEA POLITEHNICA TIMIȘOARA**

**CONTRIBUȚII LA STUDIUL TENSIUNILOR ȘI AL
DEFORMĂȚILOR ARCURILOR ELICOIDALE ALE
VEHICULELOR FERROVIARE PENTRU OPTIMIZAREA
COMPORTĂRII ACESTORA ÎN EXPLOATARE**

Teza elaborată în vederea obținerii
titlului științific de doctor inginer
la
Universitatea “Politehnica” din Timișoara
în domeniul “INGINERIE MECANICĂ”
de către

Ing. Maria LĂUTARU

Conducător științific : Prof.dr.ing.EUR ING Tiberiu Dimitrie BABEU
Membru titular al Academiei de Științe Tehnice

Referenți științifici : Prof.univ.dr.ing. Mircea BEJAN
Prof.univ.dr.ing. Gheorghe Aurel GHERMAN
Conf.univ.dr.ing. Eugen GHITA

17 decembrie 2010

CUVÂNT ÎNAINTE

În stadiul actual al industriei constructoare de mașini arcurile cuprind un domeniu de aplicație din ce în ce mai larg. Ele intervin în componența celor mai importante mașini, mecanisme și dispozitive, iar studiul proiectarea și construcția lor constituie în general o problemă aparte prin specificul ei.

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

Odată cu creșterea vitezelor de circulație se impune o abordare directă a problemelor de siguranță în circulația vehiculelor feroviare. Aceasta impune un studiu aprofundat al elementelor elastice și în speță a arcurilor metalice care intră în componența suspensiei precum și a amortizorilor de șoc ce echipează vehiculele feroviare.

În mod imperativ se cere realizarea unor studii teoretice în faza de proiectare pe baza unor programe de simulare adecvate, cum este cel utilizat în lucrare (elemente finite, soft COSMOSWorks 2005), a căror rezultate pot conduce la concuzii edificatoare respectiv măsuri și soluții ce pot fi adoptate.

Cercetările experimentale prezentate în lucrare prezintă calitatea de a da o soluție finală asupra comportării în exploatare a arcurilor metalice asigurând în acest fel certitudinea fiabilității lor.

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 care alături de mijloacele experimentale cer 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 la tot pasul, aduc mulțumirile mele și respectul cuvenit conducătorului științific, mentorului meu prof.univ. dr.ing. EUR ING Tiberiu Dimitrie Babeu.

Pentru studierea atentă și pentru observațiile interesante, pertinente și constructive asupra tezei, sunt recunoscătoare și aduc mulțumiri referenților științifici oficiali.

De asemenea, în același context, vreau să-mi exprim stima și considerația alături de cele mai sincere și călduroase mulțumiri, față de toti cei care m-au încurajat și mi-au fost aproape pe tot parcursul pregătirii mele pentru susținerea prezentei teze de doctorat, prof.univ.dr.ing.Liviu Marșavina, prof.univ.dr.ing. Liviu Neguț,

prof.univ.dr.ing. Bordeasu Ilare și nu în ultimul rând colegilor mei din cadrul Regionalei de Transport Feroviar de Călători Timișoara pentru fructuoasele schimburi de idei purtate asupra temei, precum și tuturor acelor care au crezut în mine, care au avut bunăvoința de a analiza lucrarea și de a-mi comunica observațiile și sugestiile lor.

Nu în ultimul rând țin să mulțumesc familiei mele pentru încrederea și sprijinul moral acordat, pentru orele și zilele oferite ducerii la bun sfârșit a acestei lucrări.

CUPRINS

CUVÂNT ÎNAINTE	3
1. GENERALITĂȚI	
1.1. Importanța temei	8
1.2. Stadiul actual	9
1.2.1. Prima generație, anterior anului 1900	9
1.2.2. Generația a doua, după 1900	10
1.2.3. Generația a treia.	10
1.2.4. Generația a patra, apărută în anii 1964-1969.	11
1.2.5. Generația a cincea, după 1999.	11
1.3. Considerații generale privind elementele elastice metalice	13
1.4. Arcuri elicoidale	14
1.4.1. Elemente de calcul și proiectare a arcurilor elicoidale cilindrice	14
1.4.1.1. Caracteristica elastică	15
1.4.1.2. Randamentul și coeficientul de amortizare	16
1.4.1.3. Calculul arcurilor elicoidale cu spire strânse	18
1.4.2. Efecte dinamice la arcurile elicoidale cilindrice	20
1.4.3. Soluția numerică a propagării deformației în arcurile elicoidale cilindrice	22
1.4.3.1. Modelul matematic	22
1.4.3.2. Soluția numerică	24
1.4.4. Deplasările laterale ale arcurilor elicoidale	25
1.4.4.1. Calculul deplasărilor laterale ale arcurilor în stare nedeformată	27
1.4.5. Studiul energetic comparativ al arcurilor	34
1.4.6. Arcuri multiple	35
1.4.6.1. Arcuri elicoidale montate în serie	37
1.4.6.2. Arcuri elicoidale montate în paralel	39
1.5. Concluzii	40
2. ANALIZA TENSIUNILOR ȘI DEFORMĂȚIILOR ÎN ARCURI PRIN METODA ELEMENTULUI FINIT	
2.1. Fundamentarea modalității cu element finit	42
2.1.1. Bazele teoretice ale analizei tensiunilor și deformațiilor prin metoda elementului finit	42
2.2. Simularea cu ajutorul metodei elementului finit a încercării la compresiune a arcului elicoidal exterior al boghiului Y32 R	46
2.2.1. Modelul CAD al arcului.	46
2.2.2. Efectuarea simulării cu ajutorul Metodei Elementului Finit	47
2.3. Rezultate și concluzii	51
3. MATERIALE UTILIZATE LA FABRICAREA ARCURILOR ELICOIDALE CA ELEMENTE CE ECHIPEAZA VEHICULELE FEROVIARE	
3.1. Generalități	54
3.2. Arcuri elicoidale utilizate la vehiculele de cale ferată	57
3.2.1. Caracteristici fizice	57

3.2.2. Caracteristici geometrice	57
3.2.3. Caracteristici mecanice	58
3.3. Oțeluri pentru arcuri elicoidale formate la cald și tratate termic	59
3.3.1. Caracteristici cerute	59
3.3.2. Caracteristici mecanice	59
3.4. Probe	62
3.4.1. Numărul de eșantioane din produse	62
3.4.2. Eșantioane și epruvete	63
3.4.3. Metode de probă	65
3.4.4. Certificarea probelor	65
3.4.5. Defecte și toleranțe dimensionale	66
3.3. Concluzii asupra materialelor utilizate la confecționarea arcurilor elicoidale	66
4. CONTRIBUȚII LA TEHNOLOGIA DE FABRICARE A ARCURILOR ELICOIDALE	
4.1. Generalități	69
4.1.1. Condiții tehnice	69
4.2. Tehnologia de execuție a arcurilor elicoidale cilindrice de compresiune	70
4.3. Analiza tehnologiei de execuție	77
4.3.1. Prescripții de material și starea barelor	77
4.3.2. Tehnologia de înfășurare a arcurilor	79
4.3.3. Tratamentul termic de călire și revenire	80
4.3.4. Ecruisarea	81
4.4. Verificări efectuate în urma execuției arcurilor conform tehnologiei actuale	82
4.4.1. Materiale	82
4.4.2. Tratamentul termic al arcurilor	82
4.5. Concluzii	84
5. DETERMINAREA REGIMURILOR OPTIME DE TRATAMENT TERMIC ȘI A REZISTENȚEI LA OBOSEALĂ PENTRU ARCURILE ELICOIDALE CILINDRICE	
5.1. Determinarea regimurilor optime de tratament termic	85
5.1.1. Noțiuni generale	85
5.1.2. Testări de laborator	86
5.1.3. Tratamentul termic de călire	86
5.1.4. Tratamentul termic de revenire	88
5.2. Rezistența la oboseală și determinarea ei	89
5.3. Definiții, simboluri	90
5.4. Clasificarea mașinilor de încercare la oboseală	91
5.5. Clasificarea metodelor de încercare	92
5.6. Comportarea la oboseală a arcurilor elicoidale cilindrice	95
5.6.1. Arcul elicoidal de secțiune \varnothing 24.7 mm	95
5.6.2. Verificarea eficacității ecruisării	98
5.6.3. Analiza tehnologiei actuale	99
5.6.4. Verificarea experimentală a procesului de ecruisare	101
5.7. Concluzii	103

6. ÎNCERCĂRI SPECIFICE PENTRU DETERMINAREA FIABILITĂȚII. CREȘTEREA FIABILITĂȚII ȘI MENTENABILITĂȚII PRIN ASIGURAREA CALITĂȚII PRODUSULUI FINIT	
6.1. Concepte fundamentale	105
6.1.1. Conceptul de fiabilitate	105
6.1.2. Conceptele de mentenabilitate, mentenanța și disponibilitate	106
6.1.3. Conceptul de calitate	107
6.2. Modalități de creștere a fiabilității și mentenabilității	108
6.3. Probe amortizor aparat tracțiune pentru vagon AVA 200	109
6.3.1. Metodologia de încercare și rezultatul încercărilor	109
6.3.2. Încercarea de anduranță	112
6.4. Verificarea arcurilor elicoidale	114
6.5. Concluzii	118
7. CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII	
7.1. Concluzii	120
7.2. Contribuții personale	125
BIBLIOGRAFIE	127

CAPITOLUL 1

GENERALITĂȚI

1.1. Importanța temei

Din experiența acumulată de-a lungul anilor și din studiile efectuate am constatat ca o influență deosebită asupra căii ferate și asupra subansamblelor vehiculelor feroviare, o au arcurile de amortizare utilizate în construcția vehiculelor.

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

Odată cu creșterea vitezelor de circulație se impune o abordare directă a problemelor de siguranță în circulația vehiculelor feroviare. Aceasta impune un studiu aprofundat al elementelor elastice și în speță a arcurilor metalice care intră în componența suspensiei precum și a amortizorilor de șoc ce echipează vehiculele feroviare [14].

Datorită diferitelor defecte apărute la suspensia vagoanelor de cale ferată, suspensie formată din diverse tipuri de arcuri, am considerat necesar a efectua un studiu în ceea ce privește materialele, proiectarea și realizarea unor arcuri cu parametrii funcționali îmbunătățiți și performanțe superioare celor existente.

În mod imperativ se cere realizarea unor studii teoretice în faza de proiectare pe baza unor programe de simulare adecvate, cum este cel utilizat în lucrare (elemente finite, soft COSMOSWorks 2005 care este integrat în SolidWorks 2005.), a căror rezultate pot conduce la concuzii edificatoare respectiv măsuri și soluții ce pot fi adoptate.

Cercetările experimentale prezentate în lucrare prezintă calitatea de a da o soluție finală asupra comportării în exploatare a arcurilor metalice asigurând în acest fel certitudinea fiabilității lor.

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 care cer să ratifice fiabilitatea și rezistența lor în exploatare.

În vederea elaborării lucrării de față am efectuat o serie de cercetări teoretice și experimentale care alături de alte studii conținute în lucrare pot fi edificatoare în găsirea unor soluții în abordarea acestui domeniu.

1.2. Stadiul actual

Se cunosc de mult avantajele rulării roților pe o cale netedă și nedeformabilă din metal – calea ferată. Folosirea căii ferate pentru transportul mărfurilor și călătorilor a rezultat dintr-o necesitate economică, luând un avânt deosebit odată cu dezvoltarea industriei.

Una din principalele caracteristici ale transportului feroviar este că deplasarea încărcăturilor și călătorilor pe calea ferată necesită forțe de tracțiune mult mai mici decât pe căile de comunicație rutiere.

Pe lângă acest avantaj, dacă se consideră cheltuielile de încărcare-descărcare a vagoanelor precum și cheltuielile pentru transportul mărfurilor, rezultă că transportul pe calea ferată este mult mai rentabil în cazul produselor de masă și pe distanțe mari [14].

În ceea ce privește situația actuală la calea ferată circulația poate fi considerată ca un sistem colectiv ideal, sub conducere centrală. O putem asemăna cu o șosea izolată prevăzută cu semnale, asigurată prin roți cu buza de bandaj, independent de influența atmosferică sau alte influențe exterioare. În plus calea ferată permite o largă libertate personală în vehiculele în care se călătorește, deoarece ele au culoare, restaurante, paturi, cabine pentru toaletă, etc.

De asemenea sporirea populației de pe glob și mobilitatea mereu crescândă a persoanelor influențează într-o mare măsură structura circulației. În timp ce pe șosea circulația este anevoioasă, circulația pe calea ferată nu și-a spus ultimul cuvânt.

Din istoria transportului pe calea ferată, în transportul feroviar de călători, în România ar fi existat următoarele "generații" de vagoane:

1.2.1. Prima generație anterior anului 1900

Primele vagoane de călători care au circulat în 1969, pe teritoriul de atunci al României, au fost construite înainte de 1859, la fabrica "Ausbury" din Manchester-Marea Britanie.

Vagoanele de clasa 1 aveau 3 compartimente (cu câte 6 locuri în compartiment), erau capitonate, lungimea între tamponare era de 7.45 m, ampatamentul era de 3.5 m, iar greutatea (fără frâne) de 7.5 tf. Vagoanele de clasa a doua aveau 4 compartimente, cu câte 8 locuri în compartiment, lungimea între tamponare era de 7.17 m, ampatamentul 3.35 m iar greutatea (fără frâne) de 7 tf. Vagoanele de clasa a treia aveau 5 compartimente (cu câte 10 locuri în compartiment), lungimea între tamponare 8.38 m, ampatamentul 3.95 m iar greutatea (fără frâne) de 7.4 tf. Încălzirea vagoanelor de clasa I-a și a doua se realiza prin vase cu apă caldă, ce se introduceau în compartimente în stațiile terminus (și uneori în stația Comana, unde până la introducerea telegrafului, trenurile se încrucișau în mod obligatoriu), iar vagoanele de clasa a treia erau inițial neîncălzite, iar apoi prevăzute cu sobe cu lemne.

Iluminarea se realiza cu ulei de rapiță și nu existau instalații sanitare. Toate acestea erau vagoane pe două osii, cu carcasa din lemn,

iar compartimentele aveau uși exterioare, care dădeau direct afară pe cele două lungi trepte laterale.

1.2.2. Generația a doua, după 1900

Aici s-ar include trei tipuri:

-seria 17-22 - a fost realizată, între anii 1900-1914, la uzinele "Ganz es Tarsa" Budapesta, și au fost folosite ca vagoane de clasa 1. Principalele caracteristici ar fi: boghiuri model german, cu arcuri-foi, carcasa din lemn (acoperită cu tablă la exterior), frana pneumatică "Westhinghouse" (circuit de frână simplu și nemoderabilă la defrânare), iluminat electric (dinam, baterie de acumulator, becuri), încălzire cu aburi (sistem "Fiedmann"). Avea 7 compartimente, și două toalete. Viteza maximă era de 80 km/h, și, ca o curiozitate, aveau și iluminare cu becuri cu gaz.

-vagoanele de tip "Hecht". Au intrat în parcul CFR în anii 1923-1924 (fiind importate din Germania). Au fost folosite ca vagoane de clasa 1 și vagoane de dormit. Lungimea între tamponuri era de 20.610 mm (în cazul celor de clasă) sau 21.410 mm (în cazul celor de dormit). Soluțiile tehnice erau asemănătoare cu cele ale seriei 17-22, remarcându-se, în plus, instalația de iluminare de rezervă cu petrol lampant, cutia de ungere "Cosmovici", și sistemul de frânare cu vid (tip "Hardy").

-vagoanele de clasa a doua și a treia, construite, din 1927, la Arad. Aveau 9 compartimente, fiind asemănătoare cu "Hecht"-urile. Au fost folosite și ca vagoane-restaurant sau vagoane de bagaje.

-vagoanele speciale ale liniei Oravița-Anina, construite în 1930. Lungimea lor este de numai 7 m (pentru a se putea înscrie în curbele cu raze chiar de 114 m), fiind ulterior echipate cu boghiuri "Y-25".

1.2.3. Generația a treia.

Aici se includ "Dimitroavele" (seria 29-20, respectiv 29-22). Au fost produse cu începere din 1943 la Arad. Aveau o lungime între tamponuri de 20.850 mm, erau primele vagoane românești cu carcasa complet metalică, boghiul era de tipul "Goerlitz-ușor" (cu arcuri-foi și arcuri elicoidale), viteza maximă de 100 km/h, frâna pneumatică tip "HKIP" (circuit de frânare dublu, și erau primele vagoane ale CFR cu frâna moderabilă la defrânare), dublată și de o frână mecanică de mână, iluminarea electrică cu becuri, încălzire cu aburi. Aveau 9 compartimente, băncile din lemn (acoperite cu perne de burete+mușama- la clasa a doua, respectiv burete+pluș, la clasa 1). Au fost folosite un timp și ca vagoane de clasa 1, și chiar ca vagoane de dormit.

Modernizările aduse în 1998 au constat în: transformarea din vagon compartimentat, în vagon salon, scaune din plastic (mai greu de vandalizat!), iluminare cu tuburi de neon (în locul celei cu becuri), generator electric nou, refacerea conductelor și radiatoarelor de încălzire.

1.2.4. Generația a patra, apărută în anii 1964-1969.

Aici se încadrează seriile: -19/20- 47/57, vagon-compartimentat de clasă, realizat la Arad, după proiectul francez "Corail" Boghiurile sunt de tipul "Minden-Deutz" (cu suspensii din arcuri elicoidale și amortizor hidraulic), lungimea între tamponaie 24.500 mm, viteza maximă 140 km/h, iluminarea electrică cu tuburi de neon, încălzirea atât cu aburi cât și electrică (la 1500 Vcc, 800 A; primele vagoane românești cu încălzire electrică), finisaje cu pal melaminat. Frâna este de tipul KE-GPR.

Au de obicei 10 compartimente (cu 8 locuri la clasa a doua și șase la clasa 1). La clasa a doua sunt banchete cu burete+vinilin, iar la clasa 1- scaune individuale, cu burete+plus.

-vagoanele-restaurant și cele de poștă-bagaje, derivând din cele anterioare;

-vagoanele de dormit ale seriilor 60-41, 60-50 și 70-50;

-vagoanele etajate ale seriei 26-26.

Au o lungime de 26.800 mm, boghiuri de tipul "Goerlitz-6-K-dO"), viteza maximă de 120 km/h, frâna de tipul "KE-P-A" (cu franare progresivă), iar capacitatea de transport este de 48 locuri la etaj și 64 la parter.

-rama TE (sau "cuplu etajat"), compus din 4 unități, 13 osii, 200 tone. Are 215 locuri la clasa a doua și 55 la clasa 1. Alături de vagoanele seriei 26-26, au fost folosite în compunerea celebrelor trenuri "curse muncitorești".

1.2.5. Generația a cincea, după 1999.

Principalele îmbunătățiri aduse ar fi: folosirea noilor tipuri de boghiuri (cu suspensie pe pernă de aer, frâna cu disc sau sabot pe șină), frâna electropneumatică (care permite sporirea vitezei până la 160 km/h), iar la nivelul confortului, folosirea noilor tipuri de finisaje (cu aluminiu, sticla, etc) și introducerea aerului condiționat.

Pe lângă multitudinea de tipuri de boghiuri utilizate la ora actuală în compunerea sistemului de rulare la vagoanele de călători, o preponderență importantă o au boghiurile Y 32.

Boghiurile Y 32 au fost proiectate să satisfacă toate condițiile impuse de UIC pentru boghiurile care sunt utilizate la vagoanele de călători care circulă cu viteza de până la 200 Km/h. Există trei modele de boghiu Y 32 fabricate sub licența ALSTOM DDF:

Modelul Y 32 R destinat să echipeze vagoanele de pasageri Z1 tip AVA 200, cu o viteză de până la 200 Km/h.

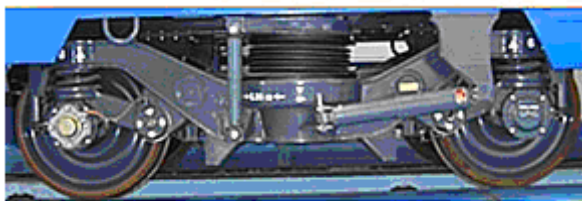


Fig. 1.1. Boghiu Y 32 R

Modelul Y 32 RS folosit pentru echiparea noilor vagoane de călători tip Z2 sau. Y modernizate care circulă cu o viteză de până la 160 Km/h. Acest model poate înlocui vechile tipuri de boghiuri MD sau Gorlitz, cu modificări minime ale carcasei.



Fig. 1.2. Boghiu Y 32 RS

Modelul Y 32 RI destinat să echipeze noile vagoane de călători cușetă de tip Z2 care circulă cu o viteză de până la 160 Km/h.



Fig. 1.3. Boghiu Y 32 RI

Elementele de succes ale acestor boghiuri sunt: : confortul excepțional, capacitatea de circulație la viteze mari, siguranța în exploatare, costul scăzut al mentenanței, adaptabilitatea. Elementul primordial al confortului oferit de aceste boghiuri îl constituie suspensia de tip metal – cauciuc. Boghiurile din familia Y 32 au fost concepute și proiectate să răspundă diverselor cerințe decurgând din utilizarea a diferitelor tipuri de frâne, legături la sasiu, suspensii etc. ASTRA Vagoane Călători produce o gamă de boghiuri din familia Y32: Y 32 R care echipează vagoane Z1 de 200 km/h, Y 32 RS care înlocuiesc boghiurile MD sau Gorlitz pe vagoanele modernizate pentru viteza de 160 km/h, și Y 32 RI care echipează vagoanele cușetă Z2 cu viteza de 160 km/h.

1.3. Considerații generale privind elementele elastice metalice

Asamblările elastice se realizează prin interpunerea pieselor numite arcuri între două sau mai multe componente mecanice.

Arcurile sunt organe de mașini caracterizate prin deformații elastice mari, deformații ce permit acumularea unei energii potențiale ce urmează apoi a fi restituită (parțial sau integral) prin efectuarea unui lucru mecanic, în cadrul unui anumit sistem tehnic [6].

Prin forma specifică și prin limita de elasticitate înaltă a materialului permit:

- a) o deformație mare sub acțiunea sarcinii exterioare, care determină înmagazinarea unei mari cantități de energie potențială de deformație (elastică);
- b) revenirea totală sau parțială la forma inițială sub acțiunea forțelor elastice, la încetarea acțiunii sarcinii exterioare.

Revenirea la forma inițială a arcului depinde de:

- a) frecările interne, la arcurile din materiale nemetalice (de exemplu, la arcurile din cauciuc,);
- b) frecările externe, care apar între părțile în contact ale arcului metalic (de exemplu, la arcurile cu foi, arcurile inelare etc.).

Datorită scopurilor multiple în care sunt utilizate aceste organe de mașini, criteriile pentru alegerea unui anumit tip de arc într-un anumit scop, sunt foarte variate. La sarcinile folosite ca elemente motoare cât și la cele folosite ca amortizoare, criteriul de bază în alegerea și optimizarea acestor organe de mașini este, desigur, energia de deformație acumulată și restituită.

Arcurile elicoidale prezintă un grad mare de utilizare a materialului, tehnologia de fabricare și reparare este relativ simplă, nu necesită întreținere în exploatare și sunt sensibile la perturbații mici. De asemenea un avantaj al acestora îl reprezintă faptul că elasticitatea transversală a arcului poate fi folosită la asigurarea rapelului transversal al cutiei vehiculului, ca în cazurile boghiurilor moderne de mare viteză. În acest caz, datorită lipsei frecării dintre spire, arcurile elicoidale nu amortizează oscilațiile și de aceea este necesar ca suspensia care conține acest tip de arcuri să cuprindă și amortizoare [7].

Comparativ cu arcurile metalice elicoidale, arcurile lamelare prezintă avantajul amortizării oscilațiilor datorită frecării dintre lamele, care ia naștere în momentul în care sunt supuse unei forțe exterioare și prin deformarea arcului se produce alunecarea dintre lamele. Arcul înmagazinează 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, fapt care ne determină să concluzionăm că arcul este insensibil la perturbații mici. Datorită acestui fapt s-a restrâns domeniul de utilizare a arcurilor lamelare la vehiculele care nu necesită realizarea unui confort ridicat.

Proiectarea și dimensionarea diferitelor tipuri de arcuri este precedată de un studiu teoretic al oscilațiilor vehiculului la care sunt utilizate, în urma căruia se stabilesc principalele date de calcul ca : caracteristica arcului, solicitări, săgeți impuse, frecvențe perturbatoare, etc.

1.4. Arcuri elicoidale

Arcurile elicoidale sunt asamblări elastice executate, de regulă, din bare înfășurate după o elice pe un corp de înfășurare. Funcție de tipul acestuia pot avea diverse forme : cilindrice, conice, parabolice, etc. La suspensia vehiculelor feroviare se utilizează, de regulă arcurile elicoidale cilindrice cu secțiunea spirei circulară sau dreptunghiulară având caracteristica (sarcină-deformație) liniară.

Suprafețele de așezare ale arcului se realizează prin subțierea capetelor acestuia astfel încât prin prelucrarea capetelor arcului să se poată asigura centrarea sarcinii, micșorându-se pericolul de flambaj [36].

O deosebită atenție trebuie acordată proiectării arcurilor elicoidale destinate vehiculelor feroviare de mare viteză, dat fiind faptul că la aceste arcuri există pericolul apariției unor tensiuni considerabile datorate efectelor dinamice care iau naștere atunci când frecvența perturbațiilor exterioare coincide cu una din frecvențele proprii ale arcului.

1.4.1. Elemente de calcul și proiectare a arcurilor elicoidale cilindrice

Funcțiunile arcurilor sunt:

- a) readucerea pieselor la poziția inițială, prin folosirea energiei potențiale de deformație (arcurile de suspensii, arcurile de ambreiaj, arcurile de supape etc.);
- b) exercitarea unei forțe permanente de apăsare (arcurile de ambreiaj, arcurile din sistemele de reglare etc.);
- a) amortizarea șocurilor și vibrațiilor (arcurile cu foi multiple, arcurile din cauciuc etc.);
- b) modificarea rigidității ansamblului în care sunt interpușe arcurile; ca urmare, se modifică și frecvențele proprii ale ansamblului, astfel încât sistemul să funcționeze cât mai bine din punct de vedere al vibrațiilor;
- c) măsurarea unor mărimi: forțe sau momente de torsiune (cheile dinamometrice mecanice).

Se observă că aceste funcțiuni sunt diverse, ceea ce determină largă aplicabilitate în tehnică a arcurilor, în cele mai diverse domenii ale construcției de mașini și cu cele diferite forme, materiale și dimensiuni [6].

Acumulările de energie din timpul deformațiilor se folosesc în scopuri diverse ca :

- element motor sau acumulator de energie, prin redarea energiei înmagazinate pentru acționarea altor elemente din lanțul cinematic;
- amortizor de șocuri și vibrații când energia de mișcare a unei mase în mișcare se consumă prin frecarea în arc;
- element pentru asigurarea îmbinării elastice între două sau mai multe elemente dintr-un lanț cinematic;
- element de fixare, respectiv pentru exercitarea unei forțe permanente constante sau variabile după tensionarea arcului.

Proprietățile arcurilor precum și aspectele privind existența frecărilor specifice arcurilor se desprind din analiza caracteristicii elastice a arcului.

1.4.1.1. Caracteristica elastică

Reprezintă dependența dintre sarcina aplicată și deformația corpului asupra căruia se aplică sarcina [11]. Dependența poate să fie între forța F și deformația liniară f , sau între momentul de răsucire M_t și deformația unghiulară θ .

$$F = f (f) \text{ sau } M = \varphi (\varphi) \quad (1.1)$$

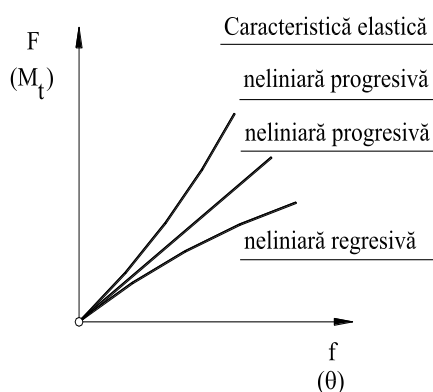


Fig..1.4. Forme de bază de caracteristici elastice

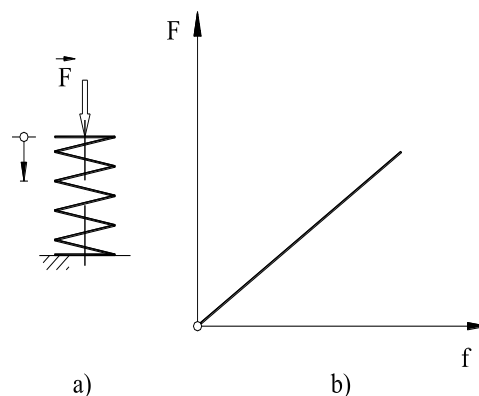


Fig. 1.5. Caracteristica elastică liniară a unui elicoidal cilindric
a) schema arcului; b) caracteristica elastică.

În figura 1.4. se pot observa tipurile de bază ale caracteristicii elastice a arcurilor elicoidale cilindrice astfel :

- cazul ideal când variația este liniară adică rigiditatea este liniară;
- cazul în care cu creșterea deformației crește rigiditatea arcului (caracteristica neliniară progresivă);
- cazul în care cu creșterea deformației scade rigiditatea arcului (caracteristica neliniară regresivă).

rigiditatea arcului însemnând raportul dintre creșterea valorii forței exterioare aplicate și creșterea deformației. ($c = dF / df$)

Caracteristica elastică a arcului elicoidal cilindric de compresiune cu solicitarea principală de răsucire, reprezentat simplificat în fig.1.5. a. și care preia o sarcină liniară F și are deformația liniară f , este liniară (fig. 1.5. b), astfel că nu apar pierderi prin frecare.

Datorită rolului pe care îl au, arcurile trebuie să prezinte două calități și anume:

- să aibă o rezistență ridicată pentru a putea suporta sarcinile statice și dinamice la care sunt supuse.

- să aibă elasticitate ridicată astfel încât sub acțiunea șocurilor prin deformare elastică să înmagazineze o cantitate însemnată de lucru mecanic pe care să îl redea, cât mai redus, atunci când șocul încetează iar arcurile revin la forma și dimensiunile inițiale [7].

Rezistența arcului elicoidal cilindric este influențată de către indicele arcului în sensul că odată cu creșterea acestuia, tensiunea din arc (tangentială și de forfecare) scade și invers, după cum se observă din formula (1.2.):

$$\tau = \tau_1 \left(1 + \frac{1}{2i} \right) \quad (1.2)$$

$$i = \frac{D_m}{d} \quad (1.3)$$

Tensiunea de calcul se determină cu formula (1.4.):

$$\tau_c = \frac{K}{K_1 K_2} \frac{8 D_m P}{\pi d^3} \quad (1.4)$$

în care:

K - reprezintă coeficientul de formă

K_1 - coeficientul de durată care se stabilește funcție de numărul total de oscilații pe întreaga perioadă de exploatare

K_2 - coeficientul de siguranță care are diferite valori funcție de gradul de importanță al arcului.

1.4.1.2. Randamentul și coeficientul de amortizare

Caracteristicile elastice neliniare cu buclă histerezis permit definirea a două mărimi importante pentru procesele vibratorii sau de amortizare: randamentul arcului și coeficientul de amortizare [11],[17]. Pentru definirea acestor mărimi, se consideră următoarele lucruri mecanice considerând reprezentarea din fig.1.6.:

- lucrul mecanic al forței exterioare L_{ext} , egal cu aria suprafeței delimitate de curba de încărcare și axa deformației (hașura înclinată și verticală);
- lucrul mecanic al forței elastice L_{elast} , egal cu aria suprafeței închise de curba de descărcare și axa deformațiilor (hașura verticală);
- lucrul mecanic consumat prin frecare L_{fr} , care este aria suprafeței închise de buclă (hașura înclinată).

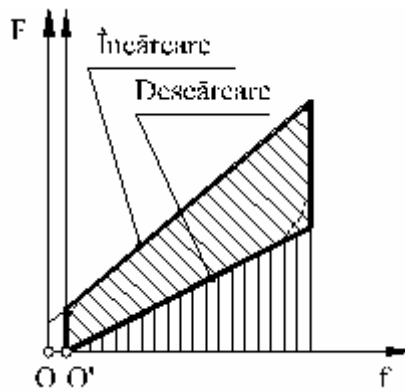


Fig.1.6. Caracteristica elastica neliniara cu bucla histerezis a unui arc

Există, evident:

$$L_{ext} = L_{elast} + L_{fr} \quad (1.5)$$

Putem acum defini:

a) randamentul arcului, prin expresia:

$$\eta = \frac{L_{elast}}{L_{ext}} \quad (1.6)$$

Acest randament reprezintă un indice al utilizării materialului, sau al eficienței acțiunii sarcinii. Într-adevăr, dacă randamentul este mic, atunci o parte din lucrul mecanic exterior este consumat pentru învingerea frecărilor. Acest randament trebuie să fie mare în situațiile în care deplasarea relativă realizată de arc trebuie să fie foarte exactă: arcurile de supapă, arcurile cheilor dinamometrice etc.;

b) coeficientul de amortizare, prin expresia:

$$\delta = \frac{L_{ext} - L_{elast}}{L_{ext} + L_{elast}} \quad (1.7)$$

Altfel spus, acest randament este raportul dintre lucrul mecanic consumat prin frecare și suma lucrurilor mecanice efectuate de sarcina exterioară și de sarcina elastică. Se mai poate scrie:

$$\delta = \frac{L_{ext} - L_{elast}}{L_{ext} + L_{elast}} = \frac{1 - \frac{L_{elast}}{L_{ext}}}{1 + \frac{L_{elast}}{L_{ext}}} = \frac{1 - \eta}{1 + \eta} \quad (1.8)$$

Se mai observă că:

$$\eta + \delta = 1 \quad (1.9)$$

Adică randament mic înseamnă amortizare puternică și, în mod corespunzător, un coeficient de amortizare mare. Acest coeficient de amortizare trebuie să fie cât mai mare dacă este de interes o amortizare puternică, fiind asigurat, de exemplu, de arcurile de suspensii, arcurile inelare, arcurile din cauciuc etc.

1.4.1.3. Calculul arcurilor elicoidale cu spire strânse

În fig.1.7 sunt prezentate elementele geometrice ale unui arc elicoidal cilindric cu spire strânse de compresiune, cu secțiunea spirei rotundă de diametru d [19]. Unghiul de înclinare al spirei $\alpha_0 = 6...9^\circ$ este și unghiul elicei. Raportul $D/d = i$ se numește indicele arcului și are valori $i = [4,16]$ pentru arcurile înfașurate la rece și $i = [4, 10]$ pentru arcurile înfașurate la cald.

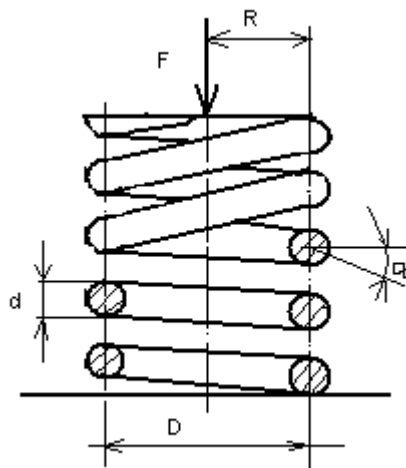


Fig. 1.7. Arc elicoidal cilindric cu spire strânse

Dacă unghiul de înclinare al elicei α este mare, în secțiunea firului se produc: forța axială, forța tăietoare, momentul încovoiator și momentul de răsucire. La arcul cu elice de înclinare mică unghiul α este mic, ceea ce face ca forța axială și momentul încovoiator să fie practic nule, iar momentul de răsucire și forța tăietoare, arătate în fig.1.8, să aibă valorile:

$$M_t = PR; T = P \quad (1.10)$$

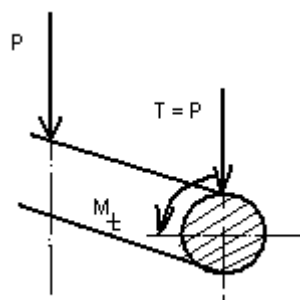


Fig. 1.8. Acțiunea momentului de torsiune și a forței tăietoare asupra elicei

Cu destulă exactitate calculul arcului elicoidal se face ținând seama numai de momentul de răsucire, ceea ce duce la următoarea relație de dimensionare :

$$W_{mec} = \frac{\pi d^3}{16} = \frac{PR}{\tau_a} \quad d = \sqrt[3]{\frac{16PR}{\pi\tau_a}} \quad (1.11)$$

Putem ține seama de efectul forței tăietoare P. Pe axa orizontală AC a secțiunii din fig.1.9., tensiunea tangențială, produsă de forța tăietoare P, are valoarea maximă dată de formula :

$$\tau_2 = \frac{4}{3} \frac{P}{\pi d^2} = \frac{16P}{3\pi d^2} \quad (1.12)$$

În figură se observă că în punctul A are loc o tensiune tangențială maximă, punct în care tensiunea tangențială τ_2 se adună aritmetic cu tensiunea tangențială τ_1 :

$$\tau_{max} = \tau_1 + \tau_2 = \tau_1 \left(1 + \frac{d}{3R} \right) \quad (1.13)$$

Efectul forței tăietoare depinde deci de mărimea raportului $d/3R$; la arcurile unde acest raport este mic , efectul forței tăietoare este neglijabil și se folosește numai relația de determinare a diametrului d, dacă acest raport este relativ mare este necesară o verificare cu relația τ_{max} .

Studiul complet al arcului cere determinarea sageții, adică a scurtării sau lungirii pe direcția forței P. Aceasta se face egalând lucrul mecanic produs de forța tăietoare P când arcul suferă o săgeată statică f .

$$L = \frac{1}{2} Pf \quad (1.14)$$

cu energia de deformație dată de formula :

$$U = \frac{M_t^2 l}{2GI_p} = \frac{16M_t^2 l}{\pi Gd^4} \quad (1.15)$$

la care se fac substituțiile:

$$M_t = PR; \quad l = 2\pi Rn \quad (1.16)$$

$$U = \frac{32P^2 R^3 n}{Gd^4} \quad (1.17)$$

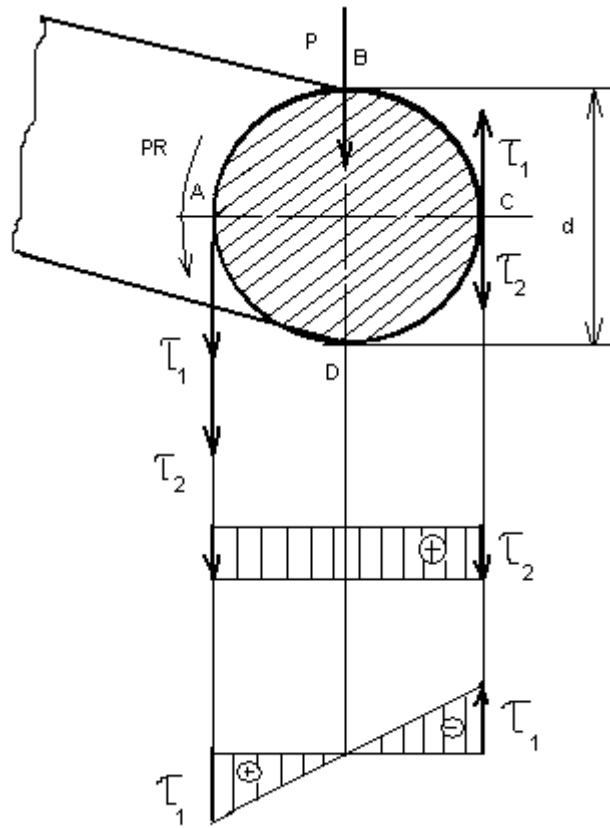


Fig. 1.9. Diagrama tensiunilor

Aplicând principiul conservării energiei obținem formula sageții arcului :

$$f = \frac{64PR^3n}{Gd^4} \quad (1.18)$$

sau în cazul variației de forță ΔP se calculează variația sageții Δf :

$$\Delta f = \frac{64\Delta PR^3n}{Gd^4} \quad (1.19)$$

În stadiul actual al construcțiilor de mașini arcurile cuprind un domeniu de aplicație larg intervenind în componența celor mai importante mașini, mecanisme și dispozitive [27]. Din calculul prezentat se observă că între sarcină și deformație există o relație liniară, fapt care ușurează calculele și servește la numeroare aplicații industriale.

1.4.2. Efecte dinamice la arcurile elicoidale cilindrice.

În general la calculul arcurilor nu se iau în considerare oscilațiile proprii ale arcului, adică se consideră că sarcina se aplică progresiv într-un timp mult mai mare decât perioada pulsațiilor proprii.[42],[23]. Această ipoteză nu este întotdeauna valabilă, exemplu concludent fiind cazul

vehiculelor feroviare, caz în care la arcurile suspensiei primare, când roata vehiculului trece peste neuniformități scurte ale căii de rulare (ex. îmbinări ale șinei de rulare) sau la viteze mari de mers, când se poate întâmpla ca frecvența perturbațiilor exterioare să coincidă cu una dintre frecvențele proprii ale arcului. În această situație, arcul poate suferii efecte dinamice suplimentare care măresc consistent efortul unitar al materialului arcului.

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

$$v_j = \frac{j}{2} \sqrt{\frac{c}{m}} \quad (1.20)$$

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

$$m = \frac{\pi^2 d^2 D_m n \gamma}{4g} \quad (1.21)$$

în care :

m - masa arcului

$g = 9,81 \text{ m/s}^2$ – accelerația căderii libere

Pentru arcuri din oțel cu greutatea specifică $\gamma = 7,85 \cdot 10^4 \text{ N/m}^3$ și $G = 8,1 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$, frecvența proprie corespunzătoare primului mod de vibrație (pentru $j = 1$) este :

$$v_1 = \frac{3,581 \cdot 10^4 d}{D_m^2 n} \quad (1.22)$$

în care diametrele d și D_m sunt exprimate în cm.

De exemplu, pentru un arc având $d = 2,8 \text{ cm}$, $D = 19,5 \text{ cm}$ și $n = 4$, se obține $v_1 = 65,92 \text{ Hz}$. Această valoare este însă în banda de frecvență care corespunde maselor nesuspendate ale vehiculelor feroviare, deci dacă arcul se află în suspensia primară, poate să apară pericolul rezonanței care să ducă chiar la apariția fenomenului de rupere a arcului.

Pentru reducerea eforturilor în arcuri datorate efectelor dinamice se pot folosi următoarele metode : mărirea frecvenței proprii a arcului prin modificarea parametrilor care intervin în relația (1.22.), concomitent cu micșorarea pasului spirelor în apropierea capetelor arcului, pentru a schimba frecvența proprie prin apropierea acestor spire în timpul oscilației sau interpunerea unor plăci de cauciuc între suprafețele de sprijin ale arcului și suprafețele de fixare.

La solicitarea arcurilor sub sarcini aplicate brusc apar tensiuni tangențiale suplimentare datorate undei de soc produse la impact, care străbate cu viteză mare spirele active și se reflectă în spirele de reazem, fenomenul repetându-se de câteva ori. Mărimea acestor tensiuni suplimentare nu depinde de dimensiunile arcului ci numai de viteza V_s a impactului.

În acest caz :

$$\tau_s = V_s \sqrt{\frac{2\gamma G}{g}} \quad [\text{N/m}^2] \quad (1.23)$$

Relația (1.23) nu ține seama de reflexia undei de șoc în spirele de reazem și de lovirea spirelor active între ele.

1.4.3. Soluția numerică a propagării deformației în arcurile elicoidale cilindrice

Ecuatiile specifice pentru evidențierea oscilațiilor axiale și de rotație sunt două ecuații neliniare, hiperbolice, parțial diferențiale de ordinul doi în care eforturile axiale și de rotație sunt considerate principalele variabile dependente [2],[23].

Datorită acestui fapt, 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 [17],[58].

Pentru a rezolva problema neliniară a arcului elicoidal este folosită metoda neliniară caracteristică. Studiul arcului elicoidal are nevoie de două stadii : static și dinamic. Pentru a simplifica analiza, presupunem că materialul este elastic. Soluția analitică a ecuațiilor statice ale arcurilor elicoidale cilindrice a fost făcută de Love.

1.4. 3.1. Modelul matematic

Ecuatiile care descriu comportările dinamice unidimensionale neliniare ale arcurilor elicoidale pot fi adaptate de la modelul analitic dezvoltat de Phillips și Costello [1],[2]. Aplicând teoria analizei dimensionale și ecuația de mișcare unui element de arc între două secțiuni x și $x+dx$ (fig.1.10), supus la forțe axiale F și la tracțiuni T , rezultă următoarele ecuații de mișcare ale arcurilor:

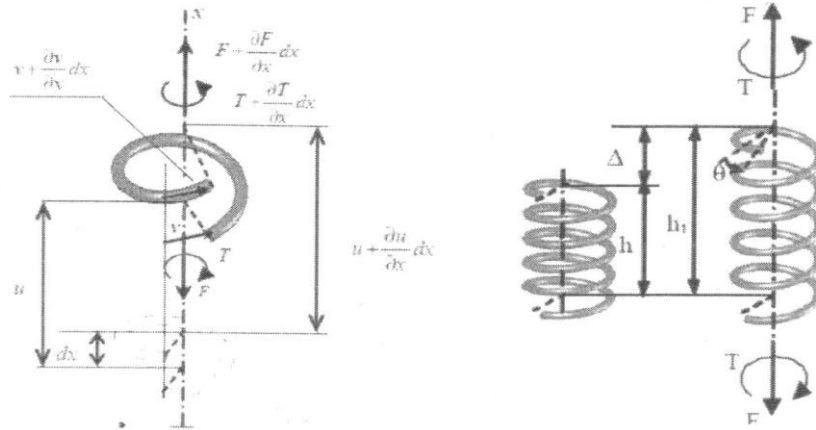
$$a \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + b \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = e \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (1.24)$$

$$b \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + c \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = e \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \quad (1.25)$$

unde : u este deplasarea axială a arcului, $v = r\theta$ este rotația deplasării arcului, r este raza elipsoidei care definește arcul, x este coordonata axială, t este timpul.

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

$$a = \frac{r^2}{EI} \frac{\partial F}{\partial E} = (v_x \sin \alpha + \cos \alpha) (\sin \alpha) \left\{ \begin{array}{l} \frac{-v}{1+v} (v_x \sin \alpha + \cos \alpha) \\ \cos^2 \alpha \\ + \left[1 - (1+u_x)^2 \sin^2 \alpha \right]^{3/2} \end{array} \right\} \quad (1.26)$$



a. diagrama unui element liber al arcului b. Deformația statică a arcului
Fig. 1.10. Descrierea arcului elicoidal

$$b = \frac{r^2}{EI} \frac{\partial F}{\partial \beta} = \frac{r}{EI} \frac{\partial T}{\partial \varepsilon} = \sin^2 \alpha \left\{ \begin{array}{l} \frac{(1+u_x) \cos^2 \alpha}{\left[1 - (1+u_x)^2 \sin^2 \alpha \right]^{1/2}} \\ - \frac{\cos \alpha}{1+v} - \frac{2v}{1+v} (1+u_x) (v_x \sin \alpha \cos \alpha) \end{array} \right\} \quad (1.27)$$

$$c = \frac{r}{EI} \frac{\partial T}{\partial \beta} = \sin \alpha \left[1 - \frac{v}{1+v} (1+u_x)^2 \sin^2 \alpha \right] \quad (1.28)$$

$$e = \frac{Mr^2}{Elh} \quad (1.29)$$

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, ν este coeficientul lui Poisson al materialului de arc și α este unghiul elipsei arcului în poziție inițială.

Din ecuațiile de mai sus se poate vedea că undele de propagare sunt mici, coeficienții având valori aproximative.

$$a = \left(1 - \frac{\nu}{1+\nu} \cos^2 \alpha \right) \sin \alpha, \quad b = -\frac{\nu}{1+\nu} \sin^2 \alpha \cos \alpha, \quad (1.30)$$

$$c = \left(1 - \frac{\nu}{1+\nu} \sin^2 \alpha \right) \sin \alpha$$

1.4.3.2. Soluția numerică

Soluția numerică a problemei apărute în ecuațiile (1.24) și (1.25) 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 din rezultate se vor obține numeric. Ecuațiile (1.24) și (1.25) pot fi transformate într-un sistem de ecuații diferențiale sau sub formă de matrice ca cea de jos :

$$\begin{bmatrix} a & 0 & b & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ b & 0 & c & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ dx & dt & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & dx & dt & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & dx & dt & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & dx & dt \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \partial u_x / \partial x \\ \partial u_x / \partial t \\ \partial v_x / \partial x \\ \partial v_x / \partial t \\ \partial u_t / \partial x \\ \partial u_t / \partial t \\ \partial v_t / \partial x \\ \partial v_t / \partial t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ du_x \\ dv_x \\ du_t \\ dv_t \end{bmatrix} \quad (1.31)$$

Direcțiile caracteristice sunt determinate din alegerea determinantului matricei :

$$(ac - b^2) \left(\frac{dt}{dx} \right)^4 - (a + c) \left(\frac{dt}{dx} \right)^2 + 1 = 0 \quad (1.32)$$

Ecuația de mai sus are patru rădăcini care sunt :

$$\left(\frac{dt}{dx} \right)_{1,2} = + \left[\frac{(a + c) \mp \sqrt{(a - c)^2 + 4b^2}}{2(ac - b^2)} \right]^{1/2} \quad (1.33)$$

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

Când se folosește teoria liniară se obține :

$$\left(\frac{dx}{dt} \right)_{1,3} = \pm cf = \pm \sqrt{\frac{Eh}{Mr^2} \sin \alpha} = \pm \sqrt{\frac{\sin \alpha}{e}} \quad (1.34)$$

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

Cele patru rădăcini au definit ecuațiile (1.33) și (1.34) și au determinat un sistem hiperbolic. Forma canonică a acestui sistem poate fi determinată prin înlocuirea unei coloane în matricea (1.31) și prin atribuirea valorii 0 determinantului.

Astfel rezultă următoarea ecuație în forma diferențială :

$$\left\{1 - c \left(\frac{dt}{dx}\right)^2\right\} \Delta u_x + \left\{b \left(\frac{dt}{dx}\right)^2\right\} \Delta v_x - \left\{1 - c \left(\frac{dt}{dx}\right)^2\right\} \left(\frac{dt}{dx}\right) \Delta u_t - \left\{b \left(\frac{dt}{dx}\right)^3\right\} \Delta v_t = 0 \quad (1.35)$$

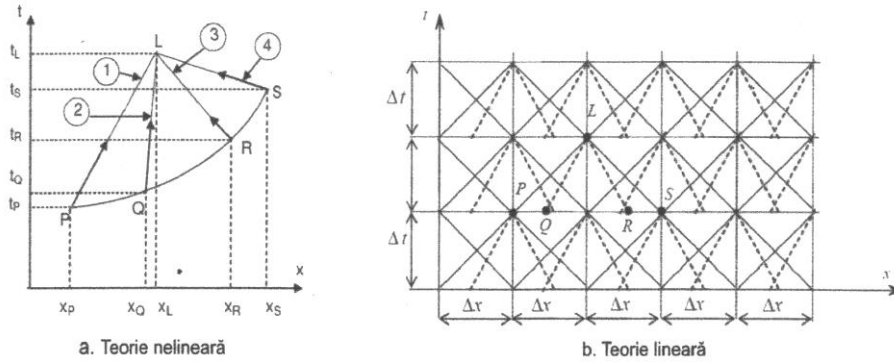


Fig. 1.11. Metoda caracteristicilor arcului, c_f și c_s sunt constanți.

Valorile necunoscutele (u_x, v_x, u_t și v_t) în orice punct L la fel cum este prezentat în figura 1.11, 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 (1.36) [42]. Cu toate că caracteristicile sunt curbate din cauza neliniarității ecuațiilor (1.24) și (1.25), se presupune că LP, LQ, LR și LS sunt linii drepte. De aici ecuația devine :

$$\left[1 - c \left(\frac{dt}{dx}\right)_{1,P}^2\right] (u_{xL} - u_{xP}) + \left\{b \left(\frac{dt}{dx}\right)_{1,P}^2\right\} (v_{xL} - v_{xP}) - \left[1 - c \left(\frac{dt}{dx}\right)_{1,P}^2\right] \left(\frac{dt}{dx}\right)_{1,P} (u_{tL} - u_{tP}) - \left\{b \left(\frac{dt}{dx}\right)_{1,P}^3\right\} (v_{tL} - v_{tP}) = 0 \quad (1.36)$$

Unde u_{xL}, v_{xL}, u_{tL} și v_{tL} au valori necunoscute în punctul L; u_{xP}, v_{xP}, u_{tP} și v_{tP} sunt valori cunoscute în punctul P; și $(dt/du_x)_{1,P}$ este panta caracteristicilor 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 (1.36) pot fi determinate valorile u_{xL}, v_{xL}, u_{tL} și v_{tL} în orice punct L. Trebuie notate valorile în punctele P, Q, R și S și calculate prin interpolare liniară.

1.4.4. Deplasările laterale ale arcurilor elicoidale

În cazul unei lungimi mari V a arcului liber în raport cu raza R, acesta poate să-și piardă stabilitatea în direcția perpendiculară pe axa arcului, rezultând deplasări laterale ale acestuia[5], fenomen cunoscut sub numele de flambaj. Instabilitatea mai este influențată de :

- modul cum sunt fixate capetele arcului;
- de secțiunea spirei;
- de direcția forței aplicate în raport cu secțiunea spirei;
- de direcția forței aplicate în raport cu axa arcului.

În practică apar frecvent două tipuri de flambaj sau de instabilitate laterală a arcurilor elicoidale de compresiune. Primul se referă la un arc cu capetele fixe, (fig.1.12) cazul A, ce rămân pe aceeași axă, comprimat între două plăci obligate să rămână paralele. În cazul B din figura 1.12, un capăt al arcului este fix pe o placă, iar celălalt este obligat să rămână pe placa paralelă, dar cele două capete nu mai rămân pe aceeași axă. Al doilea capăt se poate deplasa lateral, dar nu se poate roti [5]

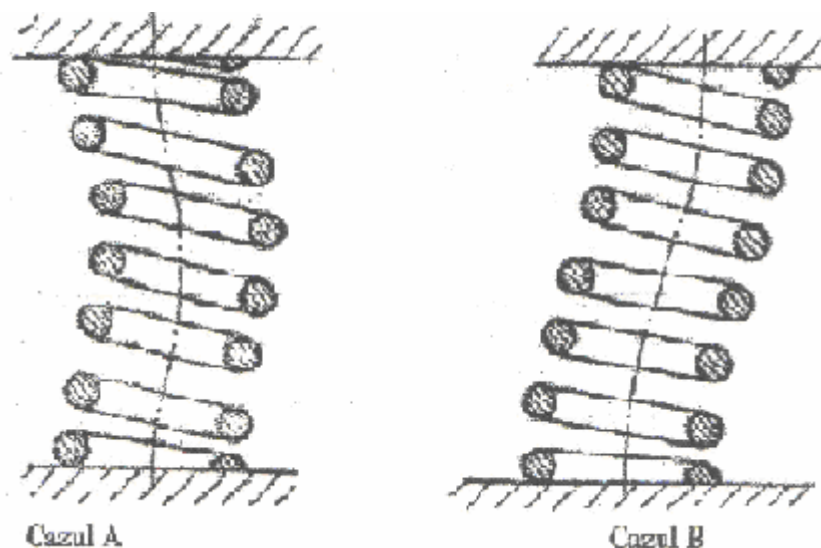


Fig. 1.12. Moduri de flambaj ale arcurilor elicoidale cilindrice de compresiune

Cazul B se fosește în mod deosebit atunci când arcurile sunt utilizate ca izolatori de vibrații pentru susținerea unui echipament.

Un studiu teoretic al deplasărilor laterale ale arcurilor elicoidale de compresiune arată că deformația critică σ_{cr} , adică deformația la care apare instabilitatea, depinde de lungimea l_0 , de raportul l_0/D și de modul de fixare a capetelor arcului. Raportul σ_{cr}/l_0 este reprezentat în funcție de raportul l_0/D în figura 1.10. Curbele sunt trasate pentru cazurile A și B. Astfel cu ajutorul raportului l_0/D se poate găsi raportul σ_{cr}/l_0 .

Sarcinile de flambaj atât în cazul A cât și în cazul B sunt ceva mai mici decât cele reprezentate în figura 1.12 datorită faptului că extremitățile arcului nu sunt perfect fixate cum se presupune în teorie. Rezultatele încercărilor arcurilor cu capete care pivotează, obligate să rămână axial, concordă cu cele date de curba din cazul B.

După cum observăm din diagrama trasată în figura 1.13, nu apare nici o instabilitate dacă arcul din cazul B este comprimat până la atingerea spirelor cu condiția ca raportul dintre lungimea liberă și diametrul mediu al spirei să fie mai mic de aproximativ 2,7, iar în cazul A raportul să fie aproximativ 5,3 [6].

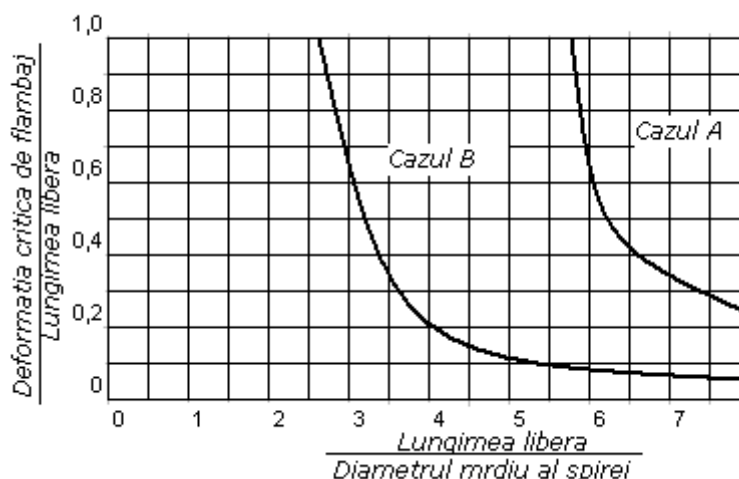


Fig. 1.13. Diagrama pentru determinarea deformației critice de flambaj a arcurilor elicoidale cilindrice de compresiune

Pentru arcurile elicoidale cilindrice cu secțiunea circulară, verificarea la flambaj se face cu ajutorul diagramei prezentate în figura 1.14 în funcție de coeficientul de zveltete $\lambda = l_0/D_m$ și coeficientul de arcuire $a = f/l_0$.

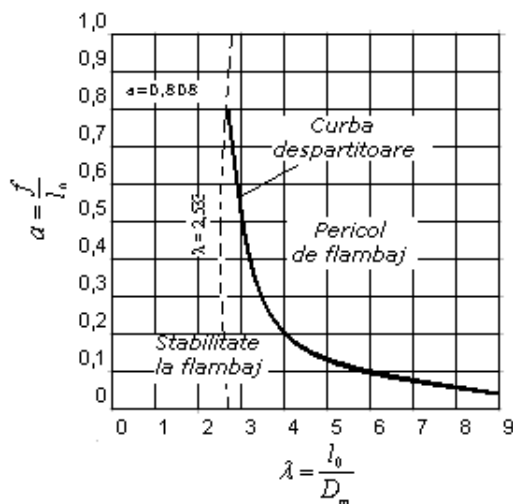


Fig. 1.14. Diagrama de stabilitate pentru arcurile elicoidale cilindrice de compresiune cu secțiune circulară

Schema de calcul a arcului elicoidal cilindric de compresiune de secțiune circulară este prezentată în tabelul 1.1.

1.4.4.1. Calculul deplasărilor laterale ale arcurilor în stare nedeformată

Fenomenul deplasării laterale a arcului elicoidal este unul dintre fenomenele mai puțin cercetate în literatura de specialitate. El este provocat în principal de excentricitatea centrului elastic al capetelor arcului sau chiar de existenței unei componente transversale (laterale) [10]. Așa cum reiese din figura 1.15 și figura 1.12. (cazul B), săgeata laterală f_q se

calculează de exemplu, după S. Gross, pentru o forță P de compresie și Q laterală cu relația :

$$f_q = \frac{Q}{P} \frac{q}{K_1} \left(1 + \frac{P}{S} \right) \operatorname{tg} \left(K_1 \frac{L}{2} \right) - L \quad (1.24)$$

destul de complicată, în care : $K_1 = \frac{P}{B} \left(1 + \frac{P}{S} \right)$ (1.25)

B fiind rigiditatea la încovoiere și S rigiditatea la torsiune

Pentru secțiunea circulară :

$$B = \frac{D^4 G}{32 \left(1 + 2 \frac{G}{E} \right) IR} L = \frac{2R^2 K}{1 + 2 \frac{G}{E}} L \quad (1.26)$$

pentru oțel când : $\frac{G}{E} = 0,386$, avem :

$$B = \frac{D^4 G}{64 \frac{G}{E} IR^3} L = \frac{K}{\frac{G}{E}} L = \frac{KEL}{G} \quad (1.27)$$

$$S = 2,59KL$$

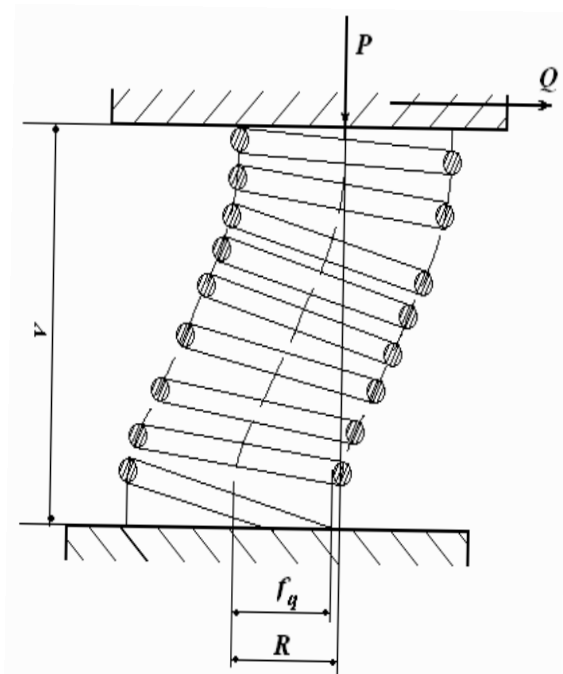


Fig. 1.15. Deplasare laterală la arcuri elicoidale utilizate ca izolatori de vibrații

Pentru calculul de ordinul I al deplasărilor laterale, rezultatele obținute la început de C.E. Crede și preluate de Wahl-Fisher [5], nu pot explica decât în proporție de 25 % din rezultatele experimentale, acestea acuzând în cazul deplasărilor mari o flexibilitate laterală mult mai mare decât cea circulară.

Pentru a reproduce calculul de ordinul I al arcului de pantă γ ($\operatorname{tg} \gamma = \frac{p}{2\pi R} = \frac{H}{R}$), confecționat din seria de N spire complete, înfășurate pe cilindrul de rază R , cercetările făcute arată că flexibilitatea integrală a arcului în stare nedeformată este bine aproximată de flexibilitatea unei bare drepte (figura 1.16) având aceeași lungime și proprietăți elastice reprezentabile direct în termenii flexibilității la torsiune-încovoiere ale sârmei elicoidale (figura 1.17).

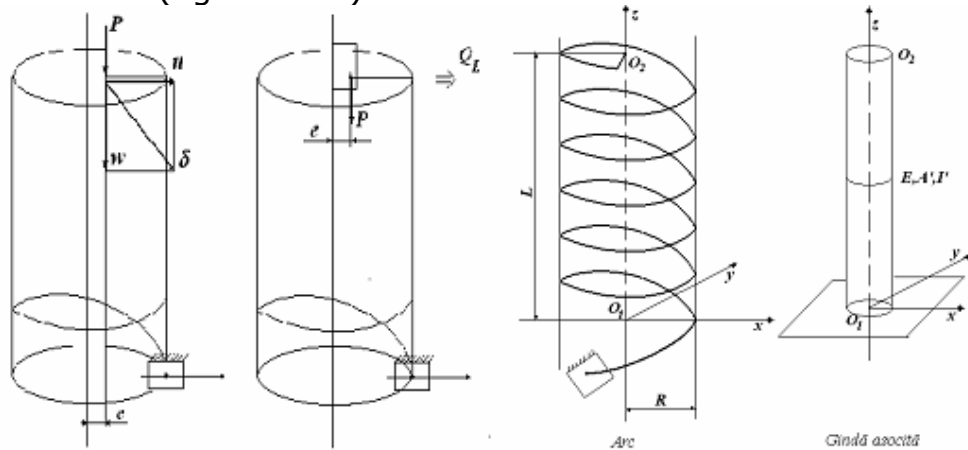


Fig. 1.16

În cadrul acestei aproximații ce explică "exact" calculul întreprins de C.E. Crede – preluat apoi de S. Gross și Wahl-Fisher, rezultă clar termenul de cuplare între deplasarea laterală și excentricitatea e a încărcării axiale realizat prin flexibilitatea mixtă :

$$d_{15} = d_{24} = \frac{9}{10} \frac{SL^2}{GI_p} \quad (1.28)$$

astfel, încărcarea excentrică axială a capătului liber provoacă deplasarea laterală:

$$U_L = \frac{SR^2}{GI_p} \left[\frac{9}{20} \frac{Le}{R^2} - \left(\frac{h}{R} \right) \right] P \quad (1.29)$$

a cărei împiedicare induce forța laterală :

$$Q_L = - \frac{\left(\frac{9}{20} \right) \frac{Le}{R^2} - \left(\frac{h}{R} \right)}{\frac{3}{10} \left(\frac{L}{R} \right)^2 + \frac{2}{5}} P \quad (1.30)$$

Tabelul 1.1.

Nr. crt.	Parametrii principali ai arcului	Simbol	Unitate de măsură	Relații de calcul
1	Indicele arcului	i		Se admite constructiv : $i \in (4...12)$
2	Gradul de asimetrie	R		$R = F_1/F_2$
3	Coeficient de corecție	K		STAS 7067-87
4	Rezistența admisibilă	τ_a	MPa	STAS 7067-87
5	Diametrul barei de arc	d	mm	$d = \sqrt{\frac{8KF_2i}{n\tau_a}}$
6	Diametrul mediu al arcului	D	mm	$D_m = id$
7	Modul de elasticitate	G	MPa	STAS 7067-87
8	Numărul de spire active	n		$n = \frac{Gd^4 f_2}{8D_m^3 F_2}$
9	Numărul total de spire	n_i		$n_r = 1,5$ pt. $n < 7$ $n_r = 1,5...3,5$ pt. $n > 7$
10	Unghiul elicei	α	grade	$tg \alpha = \frac{1}{\pi D_n}$
11	Pasul arcului	t	mm	$t = \pi D_m tg \alpha$
12	Înălțimea în stare liberă	H_0	mm	$H_0 = tn + (n_r - 0,5)d$
13	Înălțimea la blocare	H_b	mm	$H_b = (n + n_r)d$
14	Sarcina de încercare	F_3	N	$F_3 = \frac{\pi d^3 \tau_a}{8D_m}$
15	Săgeata de montaj	f_1	mm	$f_1 = \frac{8D_m^3 n}{Gd^4} F_2$
16	Săgeata de lucru	f_2	mm	$f_2 = \frac{8D_m^3 n}{Gd^4} F_2$
17	Înălțimea la încercare	H_3	mm	$H_3 = H_b + (0,12 \div 0,15)nd$
18	Lungimea desfășurată	l	mm	$l = \frac{\pi D_m (n + n_r)}{\cos \alpha}$

Avem în limitele aproximației de ordinul I, relația de liniaritate între suruburile omogene deplasare-forță din capătul liber O_2 , $\hat{\delta}_2$ și \hat{F}_2 .

$$\hat{\delta}_2 = \{u \quad v \quad w \mid L\theta_x \quad L\theta_y \quad L\theta_z\}$$

$$\hat{F}_2 = \left\{ X \quad Y \quad Z \mid \frac{M_x}{L} \quad \frac{M_y}{L} \quad \frac{M_z}{L} \right\} \quad (1.31)$$

$$\hat{\delta}_2 = D_{22} \cdot \hat{F}_2$$

Unde D_{22} este matricea real simetrică de flexibilitate.

Pentru grinda arcului elicoidal matricea real simetrică de flexibilitate este de forma

$$D_{22} = \begin{bmatrix} \frac{L^2}{3EI'} + \frac{1}{GA'} & & & & & \frac{L^2}{2EI'} \\ & \frac{L^2}{3EI'} + \frac{1}{GA'} & & & & -\frac{L^2}{2EI'} \\ & \frac{h}{R} & & \frac{1}{EA'} & & \\ & & -\frac{L^2}{2EI'} & & \frac{L^2}{EI'} & \\ \frac{L^2}{2EI'} & & & & & \frac{L^2}{EI'} \\ & & & & & \frac{L^2}{GI'} \end{bmatrix} \quad (1.32)$$

iar pentru arcul elicoidal, angajând doar flexibilitățile la torsiune-încovoiere ale sârmei, pentru $\frac{1}{EI} \cong \frac{4}{5GI_p}$ se obține matricea real-simetrică de flexibilitate pentru seria de spire plane de lungime L.

Flexibilitatea la relații :

$$D_{22} = 2\pi N \frac{R}{\cos \gamma} \begin{bmatrix} \frac{\phi_{10} + \phi_{20}}{2} \\ \frac{\phi_{10} + \phi_{20}}{2} \\ \phi_{30} \end{bmatrix} \quad (1.33)$$

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \phi_{10} & 0 & -\phi_{13} \\ 0 & \phi_{20} & 0 \\ -\phi_{13} & 0 & -\phi_{30} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \cos \gamma & 0 & \sin \gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \gamma & 0 & \cos \gamma \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{R^2}{GI_p} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{R^2}{EI} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{R^2}{EI} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \gamma & 0 & -\sin \gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \gamma & 0 & \cos \gamma \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} \frac{R^2}{GI_p} \cos^2 \gamma + \frac{R^2}{EI} \sin^2 \gamma & 0 & -\left(\frac{R^2}{GI_p} - \frac{R^2}{EI}\right) \cdot \sin \gamma \cos \gamma \\ 0 & \frac{R^2}{EI} & 0 \\ -\left(\frac{R^2}{GI_p} - \frac{R^2}{EI}\right) \cdot \sin \gamma \cos \gamma & 0 & \frac{R^2}{GI_p} \cos^2 \gamma + \frac{R^2}{EI} \sin^2 \gamma \end{bmatrix} \quad (1.34) \end{aligned}$$

Rezultatele experimentale acuză însă valori mici ale deplasării laterale degajate în această aproximație în special la deplasări verticale mari.

$$D_{22} = \frac{SR^2}{GI_p} \begin{bmatrix} \frac{3}{10}\left(\frac{L}{R}\right)^2 + \frac{2}{5} & & & & \frac{9}{10}\left(\frac{L}{R}\right)^2 \\ & \frac{3}{10}\left(\frac{L}{R}\right)^2 + \frac{2}{5} & & -\frac{9}{10}\left(\frac{L}{R}\right)^2 & \\ & \frac{h}{R} & & & 1 \\ & & -\frac{9}{10}\left(\frac{L}{R}\right)^2 & & \frac{9}{10}\left(\frac{L}{R}\right)^2 \\ \frac{9}{10}\left(\frac{L}{R}\right)^2 & & & & \frac{9}{10}\left(\frac{L}{R}\right)^2 \\ & & & & & \frac{9}{10}\left(\frac{L}{R}\right)^2 \end{bmatrix} \quad (1.35)$$

$$S = 2\pi N \frac{R}{\cos \gamma} = L \frac{R}{4 \cos \gamma} \quad \text{- lungimea sârmei} \quad (1.36)$$

Flexibilitatea cuplajelor translație- rotație :

$$D_{12} = (2\pi N)^2 \cdot \frac{R}{\cos \gamma} \cdot \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \frac{\phi_{10} + \phi_{20}}{4} \left(\frac{h}{R}\right) \quad (1.37)$$

Flexibilitatea la translație:

$$D_{11} = \frac{R}{\cos \gamma} \left(\begin{bmatrix} 1 \\ / & 1 & / \\ 1 \end{bmatrix} \cdot \frac{\phi_{10} + \phi_{20}}{2} \left(\frac{h}{R}\right)^2 \cdot \frac{(2\pi N)^3}{3} + \begin{bmatrix} \frac{\phi_{30}}{2} & 0 & \phi_{10} \left(\frac{h}{R}\right) \\ 0 & \frac{\phi_{30}}{2} & 0 \\ \phi_{10} \left(\frac{h}{R}\right) & 0 & \phi_{10} \end{bmatrix} \cdot 2\pi N \right) \quad (1.38)$$

Pentru flexibilitatea locală raportată la baza Frenet $[\bar{t} \quad \bar{n} \quad \bar{b}]$ diagonală – neglijând efectul local de întindere, compresiune și tăietor, reținând doar efectul torsiune-încovoiere, avem :

$$D_{AA} = \begin{bmatrix} \frac{1}{GI_p} \\ / & \frac{1}{EI_n} & / \\ \frac{1}{EI_b} \end{bmatrix}, \quad I_n = I_b = \frac{I_p}{2} \quad (1.39)$$

și pentru : $T_{OA}^D = (T_{OA}^D)^T = \begin{bmatrix} \underline{E} & \underline{OAX} \\ \underline{O} & \underline{E} \end{bmatrix}$ rezultă seria de N spire complete.

Conținând termenii liniari în lungimea sârmei $S = 2\pi N \frac{R}{\cos \gamma}$ proveniți din torsiune și încovoiere distribuită uniform pe elice și termenii pătratici și cubici în $L = 2\pi N h$ lungimea "barei asociate" coloanei de spire.

Flexibilitatea în deplasare provocată de momentul de încovoiere :

$$D_{15} = -D_{24} = -2\pi N \frac{R}{\cos \gamma} \cdot \frac{\phi_{10} + \phi_{20}}{4} \left(\frac{h}{R} \right) \quad (1.40)$$

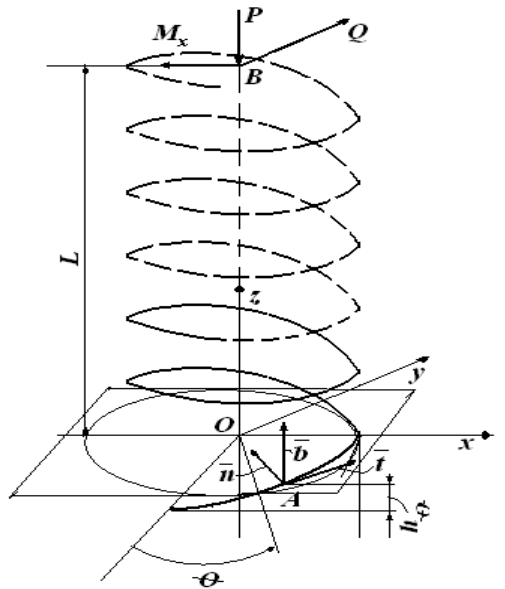


Fig. 1.17

Este de fapt cea determinată de Crede în anul 1951 și este inferioară celei reale.

$$\begin{aligned} \hat{\delta}_0 &= D_{00} \cdot \hat{F}_0 \\ \hat{\delta}_0 &= \left\{ u \quad v \quad w \quad \left| \quad R\theta_x \quad R\theta_y \quad R\theta_z \right. \right\} \\ \hat{F}_0 &= \left\{ X \quad Y \quad Z \quad \left| \quad \frac{M_x}{R} \quad \frac{M_y}{R} \quad \frac{M_z}{R} \right. \right\} \end{aligned} \quad (1.41)$$

$$\begin{aligned} D_{00} &= \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} \\ D_{12} & D_{22} \end{bmatrix} \text{ -matricea de flexibilitate integrală a seriei de spire} \\ D_{00} &= \left(\int T_{OA}^D \cdot D_{AA} \cdot t_{OA}^F \cdot ds \right) \cdot \hat{F}_0 \\ \hat{F}_0 &= T_{OB}^F \cdot \hat{F}_B = \begin{bmatrix} \underline{E} & \underline{O} \\ \underline{OBX} & \underline{E} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \overline{F}_B \\ \overline{M}_B \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (1.42)$$

Pentru a ne apropia de rezultatele experimentale, o teorie bună trebuie să antreneze în calcul „rotația spirei” de-a lungul deformației medii, adică modificarea flexibilității pe durata deformării. Este deci

necesar să deținem întâi răspunsuri reale ale arcului pentru a ajunge la ceva practic : o teorie bună [5].

În exploatarea feroviară, în timpul rulării pe lângă sarcina statică, arcul se încarcă suplimentar din mai multe cauze: forța centrifugă necompensată care acționează asupra părților suspendate ale vehiculului la trecerea prin curbe, presiunea vântului, forțele de inerție la pornirea și oprirea vehiculului, suprasarcina dinamică datorită oscilațiilor vehiculului.

Pentru a preveni defectarea arcurilor în exploatare, neparalelismul maxim între suprafețele de așezare ale arcurilor și înclinația maximă a axei arcului față de aceste suprafețe, nu trebuie să depășească 3 mm. La

arcurile cilindrice de compresiune de lungimi mari, pentru $\lambda_0 = \frac{l_0}{D_m} > 3$

poate să apară flambajul în timpul funcționării, ca atare se impune ghidarea arcurilor pe cepuri cilindrice sau tuburi.

1.4.5. Studiul energetic comparativ al arcurilor

Datorită scopurilor multiple în care sunt utilizate, criteriile pentru alegerea unui anumit tip de arc într-un anumit scop, sunt foarte variate.

La sarcinile folosite ca elemente motoare cât și la cele folosite ca amortizoare, criteriul de bază în alegerea și optimizarea acestor organe de mașini este, desigur, energia de deformație acumulată și restituită [3], [21].

Analiza energetică de deformație se va realiza pentru diverse tipuri de arcuri, frecvent utilizate în construcția de mașini, prin utilizarea, unui criteriu general de apreciere.

Energia de deformație pentru arcurile la care, în urma solicitării apar în principal tensiuni normale σ , se va scrie sub forma :

$$U = C.V. \frac{\sigma^2}{2E} \quad (1.43)$$

Pentru acele arcuri la care în urma solicitării, apar în principal tensiuni tangențiale τ , am căutat să punem expresia energiei acumulate de arc sub aceeași formă ca și relația de mai sus, ținând cont de legătura dintre E, G și ν (modulul de elasticitate longitudinal, transversal și coeficientul lui Poisson) și considerând cu aproximație $\sigma_a = 2\tau_a$.

Valoarea coeficientului de forma C, care reprezintă eficiența volumului specific, ne va da informații asupra modului în care se comportă fiecare arc ca acumulator de energie.

La anumite tipuri de arcuri coeficientul C are o anumită valoare, iar la alte tipuri de arcuri, coeficientul C depinde de anumiți parametrii, de exemplu coeficienții α și β ai lui Saint-Venant de la torsiunea barelor drepte, coeficienți ce caracterizează arcul din punct de vedere geometric sau coeficienți care tin seama de solicitarea arcurilor [6].

Luând în considerare caracteristica liniară a arcurilor, dependența energiei înmagazinată de arc, de volumul arcului $u = u(\nu)$ este tot liniară,

panta dreptei depinzând de tipul arcului, așa cum reiese din graficul din figura 1.18.

Reprezentarea grafică s-a realizat considerând valorile maxime pe care le poate lua coeficientul C al fiecărui arc, dacă materialul de arc are următoarele caracteristici :

$$\nu = 0,3; E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ MPa}; \sigma_{ai} = 600 \text{ MP.}$$

Diagrama obținută (fig.1.18.) este utilă în alegerea arcurilor ce acumulează o mai mare cantitate de energie.

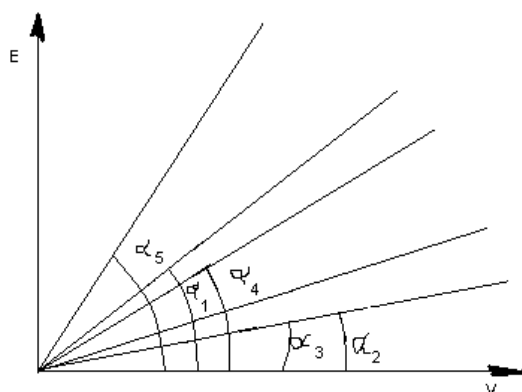


Fig. 1.18. Reprezentarea grafică a dependenței $E = f(V)$ pentru diferite tipuri de arcuri

Analiza energetică comparativă a fost sistematizată sub forma tabelară, prezentându-se în tabelele 1.2. și 1.3. pentru fiecare tip de arc expresia energiei elastice acumulate, expresia volumului arcului, eficiența de folosire a volumului și eficiența volumului specific la coeficientul de formă C .

Prin analiza prezentată se observă că două arcuri de tipuri diferite, realizate din același material și având același volum (aceiași greutate) pot acumula energii de deformare diferite.

1.4.6. Arcurile multiple

Arcurile multiple sunt sisteme de arcuri în montaje în serie, paralel sau mixt. Astfel de sisteme/ansambluri permit obținerea unei anumite caracteristici elastice într-un gabarit (radial sau axial) dat. Există în această idee montaje de arcuri în serie, în paralel și mixt (acesta din urmă nu se analizează) [6],[11].

Tabelul 1.2.

Tipul de arc	Arcul elicoidal cilindric cu secțiunea circulară	Arcul elicoidal cilindric cu secțiunea dreptungh.	Arcul elicoidal cilindric de răsucire cu secțiunea circulară	Arcul elicoidal cilindric de răsucire cu secțiunea dreptungh.
Caracteristici energetice				
Expresia energiei elastice "U"	$\frac{1}{4k^2} V \frac{\tau_i^2}{G}$ k-factor de corecție $k = k(i)$ $i = D/d$	$\frac{1}{2} \frac{\alpha^2}{k^2 \beta} V \frac{\tau_i^2}{G}$ k-factor de corecție $\alpha, \beta = f(h/b)$	$\frac{1}{8k^3} V \frac{\sigma_i^2}{E}$ $k = k(i)$ $i = D/d$	$\frac{1}{Gk^3} V \frac{\sigma_i^2}{E}$ $k = k(i)$ $i = D/d$
Volumul arcului "V"	$\frac{\pi d^2 R n}{2}$	$2\pi R n h b$	$\frac{\pi d^2}{4} l$	$b h l$
Eficiența de folosire a volumului (U / V)	$\frac{1}{4k^2} \frac{\tau_i^2}{G}$	$\frac{1}{2} \frac{\alpha^2}{k^2 \beta} \frac{\tau_i^2}{G}$	$\frac{1}{8k^3} \frac{\sigma_i^2}{E}$	$\frac{1}{Gk^3} \frac{\sigma_i^2}{E}$
Eficiența volumului specific $\left(\frac{U}{V} \frac{2E}{\sigma^2} \right)$	0,307 pt. i=50 0,247 pt. i=10 0,139 pt. i=3	0,188 pentru $h/b = 1$ și i = 50	0,215 pentru i = 13	0,287 pentru i = 13

Analiza arcurilor multiple care se face mai jos este generală, în sensul că este valabilă și pentru alte arcuri; ea este dezvoltată folosind tipul de arc elicoidal de compresiune cu solicitarea principală de răsucire deoarece permite o simplitate a reprezentării arcurilor și a folosirii caracteristicii elastice.

Tabelul 1.3.

Tipul de arc	Arcul inelar	Arcul disc
Caracteristici energetice		
Expresia energiei elastice "U"	$\frac{1}{2} \frac{\operatorname{tg}(\alpha + Q)}{\operatorname{tg} \alpha} V \frac{\sigma_i^2}{E}$ <p>Q – unghiul de frecare $\alpha = 14^0 \dots 17^0$ $Q = 7^0 \dots 9^0$</p>	$\frac{(1-\nu^2)r^2 \ln^2 r}{9\left(\frac{1+r}{1-r} + \frac{2}{\ln r}\right)(1-r^2)} V \frac{\sigma_i^2}{2E}$ <p>$r = d_i/d$</p>
Volumul arcului "V"	$V = V_e + V_i$ $V_e = 2\pi \frac{n-1}{2} A_e r_e$ $V_i = 2\pi \frac{n-1}{2} A_i r_i$ <p>A_i – secțiunea inelului interior A_e – secțiunea inelului exterior</p>	$\frac{\pi d^2}{4} s(1-r^2)$
Eficiența de folosire a volumului (U/V)	$\frac{1}{2} \frac{\operatorname{tg}(\alpha + Q)}{\operatorname{tg} \alpha} \frac{\sigma_i^2}{E}$	$\frac{(1-\nu^2)r^2 \ln r}{9\left(\frac{1+r}{1-r} + \frac{2}{\ln r}\right)(1-r^2)} \frac{\sigma_i^2}{2E}$
Eficiența volumului specific $\left(\frac{U}{V} \frac{2E}{\sigma^2}\right)$	<p>1,7 Pentru $\alpha = 14^0$ și $Q = 9^0$</p>	<p>0,175 pentru $r = 0,6$ 0,191 pentru $r = 0,65$ 0,208 pentru $r = 0,7$</p>

1.4.6.1 Arcuri elicoidale montate în serie

Un exemplu de montaj în serie este redat simplificat în fig. 1.19. În acest caz, gabaritul radial este dat. Pornind de la observația că forța este aceeași în oricare arc, și anume \vec{F} , se scrie sistemul de ecuații de mai jos:

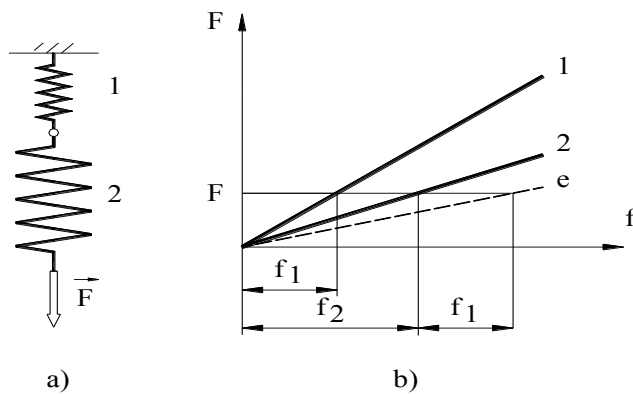


Fig. 1.19. Montaj de arcuri în serie (a) și caracteristicile elastice ale arcurilor individuale 1 și 2 și arcului echivalent e (b)

$$\begin{aligned} F &= F_1 = F_2; \\ f &= f_1 + f_2, \end{aligned} \tag{1.44}$$

Caracteristicile arcurilor 1 și 2 sunt trasate în ipoteza că acestea au același diametru al spirei în care: $F_{1(2)}$ sunt forțele care revin fiecărui arc când forța totală de încărcare este F ; $f_{1(2)}$ – săgețile fiecărui arc sub încărcare; f - săgeata arcului echivalent e al montajului.

Ecuția a doua (sumă de deformații) se poate dezvolta în funcție de rigiditățile arcurilor, $k_{1(2)}$, și cea a arcului echivalent, k :

$$f = f_1 + f_2 = \frac{F}{k_1} + \frac{F}{k_2} = \frac{F}{k} \tag{1.45}$$

Rezultă în final:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} \tag{1.46}$$

sau în forma cea mai generală pentru un număr de arcuri înseriate:

$$\frac{1}{k} = \sum_i \frac{1}{k_i} \tag{1.47}$$

Ecuțiile (1.44) transpuse grafic în fig. 1.19.b) permit trasarea caracteristicii elastice a arcului echivalent.

1.4.6.2. Arcuri elicoidale montate în paralel

Fie reprezentarea simplificată din fig.1.20 a unui montaj în paralel de arcuri, folosit într-un gabarit axial dat. O primă observație: cele două arcuri au sensurile de înfășurare diferite unul față de celălalt, pentru a se evita rotirea relativă a platformei de încărcare în raport cu baza de așezare a arcurilor[34].

Se pleacă de la sistemul de ecuații scris în ideea că acum deformația este aceeași la ambele arcuri.

$$\begin{aligned} F &= F_1 + F_2; \\ f &= f_1 = f_2. \end{aligned} \tag{1.48}$$

Prima ecuație (de forțe) devine prin transformări:

$$\begin{aligned} k f &= k_1 f + k_2 f \\ k &= k_1 + k_2 \end{aligned} \tag{1.49}$$

Arcurile 1 și 2 au sensuri inverse pentru evitarea rotirii platformei de încărcare.

Ultima expresie a rigidității arcului echivalent egală cu suma de rigidități, se scrie mai general:

$$k = \sum_i k_i \tag{1.50}$$

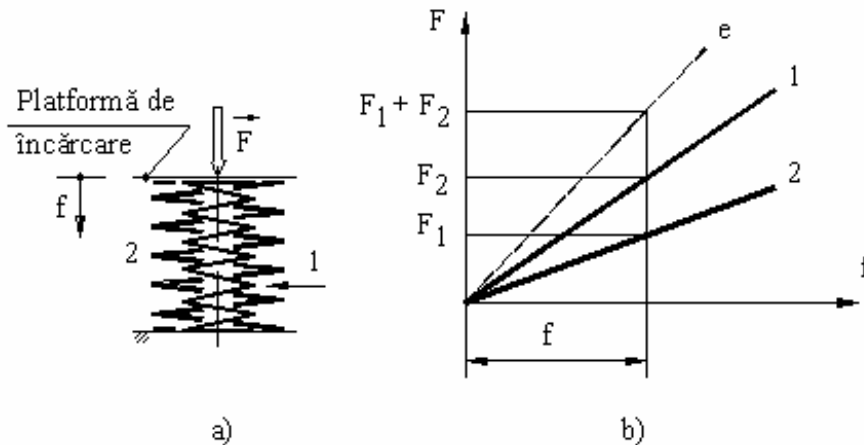


Fig. 1.20. Montaj de arcuri în paralel (a) și caracteristicile elastice ale arcurilor individuale 1 și 2 și arcului echivalent e (b)

Ecuatiile (1.48) transpuse grafic în fig. 1.20 b) permit trasarea caracteristicii elastice a arcului echivalent e .

1.5. Concluzii

Arcurile metalice sunt 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 sgeată. Rolul arcurilor metalice care echipează suspensia vehiculelor feroviare este de a înmagazina energia potențială de deformare și în consecință de a reduce efectele excitațiilor aplicate sistemului mecanic provocând fie reducerea amplitudinilor vibrațiilor atunci când sunt utilizate în componența suspensiei, fie reducerea amplitudinii șocurilor atunci când sunt folosite în echiparea izolatorilor de șoc.

Dupa o scurtă trecere în revistă a evoluției vehiculului feroviar și a locului ocupat de acesta în societatea contemporană este prezentat stadiul actual privind rolul, locul, soluțiile constructive și proiectarea arcurilor elicoidale ca părți componente ale suspensiei vagoanelor.

S-a studiat de asemenea comportarea dinamică atât pe direcție verticală cât și pe direcție transversală a arcurilor elicoidale cilindrice cel mai des folosite în echiparea suspensiei vehiculelor feroviare. Studiul teoretic prezentat subliniază o serie de particularități care pot fi utilizate în calculul de proiectare al acestor tipuri de arcuri. S-au prezentat metode de calcul atât în regim static cât și în regim dinamic pentru arcurile elicoidale cilindrice care pot fi utilizate de proiectanți în faza de proiectare, atunci când sunt impuse anumite caracteristici.

Soluția numerică a răspunsului dinamic a unui arc elicoidal presupune două ecuații neliniare parțial diferențiale hiperbolice. Pentru determinarea acestora se pot folosi 2 metode numerice și anume metoda curbilor caracteristice și metoda diferenței finite conservative. Phillips și Costello au pus în evidență ecuațiile mișcării în această situație. Semnificația oscilațiilor de torsiune la întinderea radială a unui arc elicoidal este prezentată în lucrarea lui Costello [1].

Sunt detaliați și exemplificați principalii parametri care se au în vedere la proiectarea clasică a arcurilor elicoidale reliefând limitările și neajunsurile aduse de metoda „alegerii dintre valorile recomandate de literatura de specialitate”.

Sunt prezentate pe larg metodele clasice utilizate în prezent la proiectarea arcurilor elicoidale, subliniindu-se faptul că, în această abordare, pentru fiecare soluție constructivă numărul mare de parametri care sunt „aleși” influențează negativ parametri produsului final, capacitatea de predicție a proiectantului fiind mult diminuată.

Deși, aparent, în alcatuirea suspensiei vehiculelor feroviare se regăsesc aceleași elemente fundamentale ca la începuturile acestuia, în fapt, în structura acestui subansamblu s-au produs mutații esențiale. Ele au fost promovate de constructori din necesitatea impusă de reglementările ecologice și de siguranță a circulației, dar și de dorința

utilizatorilor de a dispune de un vehicul feroviar silențios, economic și fiabil.

Complexitatea structurală și funcțională a elementelor ce intră în compunerea suspensiei vehiculelor feroviare, precum și multitudinea de interdependențe dintre caracteristicile acestora, depășesc de cele mai multe ori capacitatea proiectantului de a face modificările cerute de obținerea unor performanțe optime pentru sistemul proiectat.

În acest context, ținând seama de influențele negative ce le au metodele clasice de proiectare asupra modelării și obținerii unor performanțe superioare pentru suspensie, apare evidentă necesitatea utilizării unor metode moderne de calcul și proiectare asistată de calculator, cu ajutorul cărora se pot reprezenta mult mai fidel fenomenele reale ce apar în timpul exploatării.

CAPITOLUL 2

ANALIZA TENSIUNILOR ȘI DEFORMAȚIILOR ÎN ARCURI PRIN METODA ELEMENTULUI FINIT

2.1. Fundamentarea modălariei cu element finit

Esența analizei tensiunilor prin elemente finite o constituie înlocuirea corpului deformabil, respectiv a continuumului real printr-un sistem structural articulată ale cărei subregiuni sunt numite elemente finite și care, de fapt, sunt părți componente ale aceluși corp. Se poate deci vorbi de o structură de elemente finite ce substituie structura reală [59].

Un element este deci o regiune bine definită a corpului, dar nu numai atât. Este necesar ca proprietățile elementului să fie în mod adecvat formulate astfel încât acesta să aibă o funcționalitate dependentă de restricțiile impuse prin comportamentul întregului din care face parte. Formularea corectă a acestor proprietăți se face prin intermediul metodelor matriceale și constituie punctul de plecare în rezolvarea problemei bazându-se atât pe cunoașterea precisă a caracteristicilor geometrice și mecanice a fiecărui element în parte, cât și pe evaluarea, pentru fiecare element, a forțelor nodale (forțe și cupluri) și anume: forțe concentrate preluate de către noduri și transmise elementului și forțe transmise în noduri de către elementul însuși. Forțele nodale se exprimă fie direct prin componentele lor, fie indirect, prin intermediul deplasărilor nodale, (săgeți și rotații) [61],[64].

Arcurile elicoidale constituie elementul cel mai des utilizat ca suport elastic pentru suspensia autovehiculelor, datorită durabilității mari, greutatea redusă, execuției simple și faptului că necesită operațiuni minime de întreținere pe timpul exploatarei. Principalul dezavantaj al acestui tip de suspensie este legat de faptul că acestea nu pot prelua decât forțe ce acționează de-a lungul axei lor, și deci în construcția suspensiei trebuie să prevăzute elemente suplimentare de ghidare care să preia forța de propulsie sau de frânare.

2.1.1. Bazele teoretice ale analizei tensiunilor și deformațiilor prin metoda elementului finit

Admițând o comportare elastică a elementului, relația de echilibru este de forma:

$$\{r\}_e + \{r\}_p + \{r\}_T + \{r\}_{\sigma_0} = [k] \cdot \{\delta\}_e \quad (2.1)$$

unde :

$\{r\}_e$ = reprezintă forțele aplicate în noduri;

$\{r\}_p$ = reprezintă matricea forțelor transmise de element în noduri și cauzate de temperatură și inexactități de montaj;

$\{r\}_{\sigma_0}$ = reprezintă matricea componentelor forțelor nodale datorate tensiunilor remanente și altor cauze;

$\{\delta\}_e$ = formează vectorul deplasărilor nodale ale elementului;

$[k]$ = reprezintă matricea de rigiditate a elementului.

Asamblarea tuturor elementelor finite are ca echivalent ecuația:

$$\sum_{n=1}^m (\{r\}_{e,n} + \{r\}_{p,n} + \{r\}_{T,n} + \{r\}_{\sigma_0,n}) = \left(\sum_{n=1}^m [k]_n \right) \cdot \{\delta\} \quad (2.2)$$

dacă se notează primul termen cu $\{R\}$, al doilea cu $[K]$, se obține:

$$\{R\} = [K] \cdot \{\delta\} \quad (2.3)$$

Prin substituirile făcute, în mod tacit s-a presupus că matricile $[k]_n$, $\{r\}_{e,n}$, $\{r\}_{p,n}$, $\{r\}_{T,n}$ și $\{r\}_{\sigma_0,n}$ au fost extinse la dimensiunea structurii întregi, că în acest proces de extindere termenii au fost rearanjați în așa fel încât să corespundă cu termenii din matricea deplasărilor nodale. Numărul deplasărilor nodale corespunde cu numărul gradelor de libertate a întregului sistem structural, acest număr fiind egal cu suma gradelor de libertate ale tuturor punctelor nodale ale sistemului. Dacă proprietățile elementelor sunt adecvat formulate în matricea $[K]$, deplasările nodale vor aproxima suficient de bine pe cele ale structurii originale. Determinând valorile deplasărilor din relația:

$$\{\delta\} = [K]^{-1} \cdot \{R\} \quad (2.4)$$

În continuare se pot obține atât deformațiile cât și tensiunile, cu ajutorul relațiilor din teoria elasticității.

În figura 2.1 este prezentată o structură plană, divizată în triunghiuri, care formează elementele finite ale acesteia, fiecare nod având două grade de libertate (deplasări nodale), astfel încât fiecare element finit triunghiular are 6 grade de libertate.

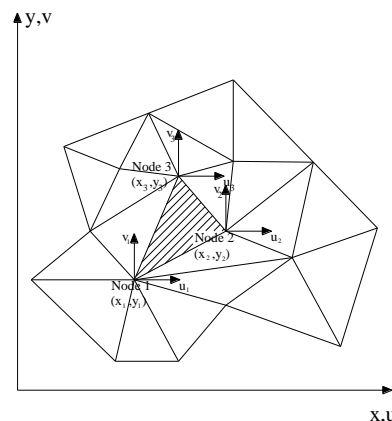


Fig. 2.1. Structura de elemente finite triunghiulare

Matricea deplasărilor $\{\delta\}$ este alcătuită din necunoscutele problemei:

$$\{\delta\} = \begin{Bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \delta_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ u_3 \\ v_3 \end{Bmatrix} \quad (2.5)$$

În care cu litera u sunt notate deplasările în direcția x , iar cu v sunt exprimate deplasările în direcția y . În funcție de aceste deplasări nodale trebuie exprimat câmpul $\{f\}$ al deplasărilor oricărui punct aparținând elementului finit. Pentru aceasta, dintre alternativele posibile, următoarea formulare liniară este dintre cele mai convenabile:

$$\{f\} = \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} a_1 + a_2 \cdot x + a_3 \cdot y \\ a_4 + a_5 \cdot x + a_6 \cdot y \end{Bmatrix} = [N] \cdot \{\delta\} \quad (2.6)$$

În care a -urile sunt valori constante iar $[N]$ reprezintă o matrice ce definește natura câmpului deplasărilor. Valorile a_1, a_2, \dots, a_6 sunt calculate folosind coordonatele și deplasările nodale, respectiv prin rezolvarea următorului sistem de ecuații cu șase necunoscute:

$$\begin{aligned} u_1 &= a_1 + a_2 x_1 + a_3 y_1 \\ u_2 &= a_1 + a_2 x_2 + a_3 y_2 \\ u_3 &= a_1 + a_2 x_3 + a_3 y_3 \\ v_1 &= a_4 + a_5 x_1 + a_6 y_1 \\ v_2 &= a_4 + a_5 x_2 + a_6 y_2 \\ v_3 &= a_4 + a_5 x_3 + a_6 y_3 \end{aligned} \quad (2.7)$$

ce este obținut prin aplicarea relațiilor (2.6).

Sub formă matriceală, expresiile deplasărilor nodale devin:

$$\begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{Bmatrix} \quad (2.8)$$

$$\begin{Bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} a_4 \\ a_5 \\ a_6 \end{Bmatrix} \quad (2.9)$$

Matricea ce definește natura câmpului deplasărilor:

$$[N] = \begin{bmatrix} 1 & x & y & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x & y \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{|A|} \cdot [D] \quad (2.10)$$

în care :

$$[A] = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

unde $|A|$, respectiv valoarea determinantului matricei $[A]$, este de două ori valoarea ariei suprafeței triunghiului. Dacă nodurile 1,2,3 sunt numerotate în sensul acelor de ceasornic, valoarea determinantului devine negativă.

Funcțiile $[N]$, pentru diferitele tipuri de elemente și formulări ale proprietăților acestora, au rol cheie în analiza tensiunilor prin elemente finite. Acestea se numesc funcții de modelare, definind fie modelul ales pentru câmpul deplasărilor, fie geometria elementului adoptat, fie atât câmpul deplasărilor cât și geometria elementului în cazul opțiunii pentru așa-numitele elemente finite izoparametrice.

În cadrul problemei bidimensionale, deformațiile specifice sunt date de relațiile cunoscute în elasticitate:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}, \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}, \gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \quad (2.12)$$

care, ținând seama de expresiile (6), produc:

$$\varepsilon_x = a_2, \varepsilon_y = a_6, \gamma_{xy} = a_3 + a_5 \quad (2.13)$$

Se poate observa că deformațiile specifice sunt independente de valorile constantelor a_1 și a_3 cât și de coordonatele locului în care se calculează ceea ce justifică denumirea dată uneori acestui tip de element finit, element cu deformații constante.

Ținând seama de expresiile (2.6), ultimile relații pot fi scrise astfel:

$$\{\varepsilon\} = [B]\{\delta\} \quad (2.14)$$

în care:

$$[B] = \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} y_2 - y_3 & 0 & y_3 - y_1 & 0 & y_1 - y_2 & 0 \\ 0 & x_3 - x_2 & 0 & x_1 - x_3 & 0 & x_1 - x_3 \\ x_3 - x_2 & y_2 - y_3 & x_1 - x_3 & y_3 - y_1 & x_2 - x_1 & y_1 - y_2 \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

unde cu A s-a notat aria triunghiului.

Matricea $[B]$, denumită matricea de deformații-deplasări, are rol cheie în evaluarea matricei de rigiditate a elementului.

Se observă că tensiunile se pot exprima de asemenea în funcție de $[B]$ astfel:

$$\{\sigma\} = [E] \cdot [B] \cdot \{\delta\} \quad (2.16)$$

unde $[E]$ reprezintă matricea de elasticitate

$$[E] = \frac{E}{1-\mu^2} \begin{bmatrix} 1 & \mu & 0 \\ \mu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\mu}{2} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

În care E este modulul de elasticitate al materialului, iar μ este coeficientul lui Poisson.

Valorile deplasărilor nodale $\{\delta\}$ care în expresiile deformațiilor specifice (2.14) și respectiv în ale tensiunilor (2.16), se calculează din relația (2.4), respectiv din relația:

$$\{\delta\} = [K]^{-1} \cdot \{R\} \quad (2.18)$$

2.2. Simularea cu ajutorul metodei elementului finit a încercării la compresiune a arcului elicoidal exterior al boghiului Y32 R

Prezentul studiu a avut ca scop simularea cu Metoda Elementului Finit a încercării la compresiune a modelului CAD al arcului elicoidal exterior care face parte din ansamblul boghiului Y 32 R. Simularea a urmărit verificarea obținerii principalelor caracteristici de recepție ale arcului, cum ar fi înălțimea L_0 a arcului datorată sarcinii date de vagonul gol (P_0), respectiv rezistența la rupere a oțelului la sarcina P dată de vagonul supraîncărcat.

Efectuarea simulării cu ajutorul Metodei Elementului Finit presupune existența unui model CAD al arcului elicoidal exterior, model ce s-a realizat cu ajutorul pachetului soft SolidWorks 2005. Ulterior, acest model a fost supus simulării în cadrul pachetului soft COSMOSWorks 2005.

2.2.1. Modelul CAD al arcului

Modelul CAD al arcului elicoidal exterior a fost realizat în conformitate cu desenele de execuție furnizate de producător. În continuare se redau principalele dimensiuni constructive ale arcului:

- diametrul sârmei: $d = 37$ mm;
- raza medie de înfășurare: $R = 112$ mm;
- înălțimea liberă (aproximativă): $H_0 = 334$ mm;
- înălțimea sub sarcina P_0 (3430 daN): $L_0 = 256$ mm;
- numărul total de spire (aproximativ): $n = 5,3$;
- numărul de spire active (cu secțiune întregă): $n_a = 3,8$.

Figura 2.2 redă într-o vedere axonometrică izometrică modelul CAD al arcului elicoidal exterior realizat în programul SolidWorks 2005.

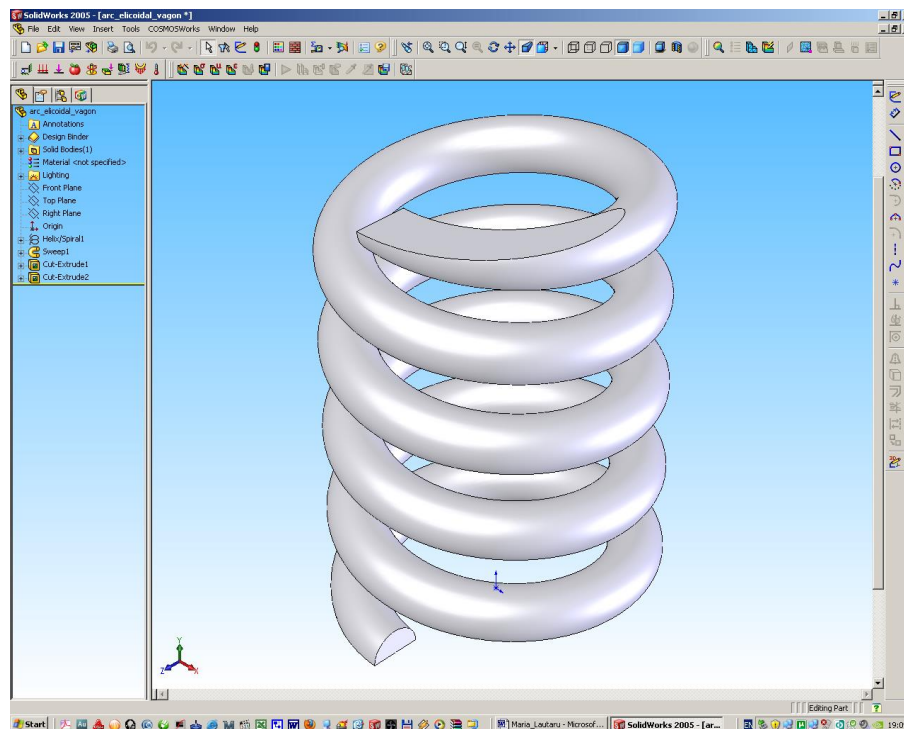


Fig. 2.2. Modelul CAD al arcului elicoidal exterior (SolidWorks 2005).

2.2.2. Efectuarea simulării cu ajutorul Metodei Elementului Finit

După cum s-a precizat, simularea a fost realizată cu programul COSMOSWorks 2005 care este integrat în SolidWorks 2005.

Ca date inițiale ale scenariului simulării, se constituie caracteristicile mecanice ale materialului arcului (45SCD6 - specificație franceză). Principalele caracteristici mecanice ale materialului (minim necesare simulării) sunt:

- modulul de elasticitate longitudinal: $E = 208000$ MPa;
- coeficientul lui Poisson (de contracție transversală): $\nu = 0,3$.

Figura 2.3. ilustrează fereastra de dialog a programului prin intermediul căreia se introduc valorile principalelor caracteristici mecanice ale materialului arcului.

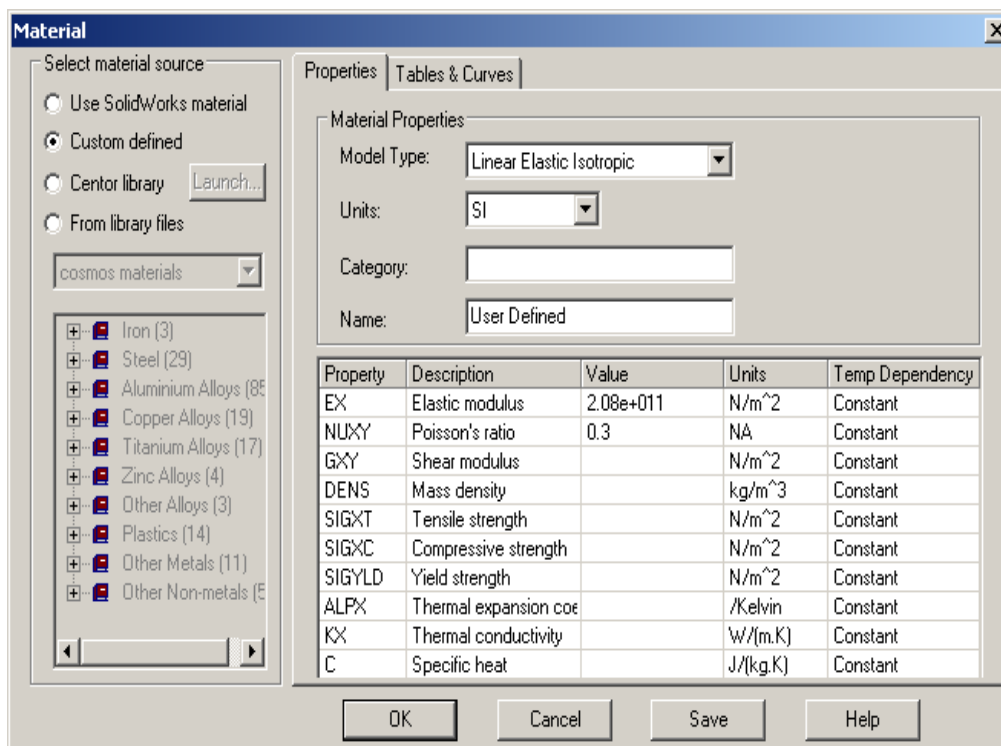


Fig. 2. 3. Fereastra program COSMOSWorks 2005

Conform certificatului de calitate al materialului 45SCD6 se mai cunosc și următoarele caracteristici mecanice importante:

- limita de curgere: $R_{p0,2} = 1220$ MPa;
- rezistența la rupere: $R_m = 1639$ MPa.

Datorită faptului că modelul CAD al arcului elicoidal este considerat un corp solid, pentru simularea cu MEF s-au adoptat elemente finite de ordinul I tetraedrice cu 4 noduri per element (TETRA4). S-a optat pentru o dimensiune medie de 5 mm a laturilor elementelor finite tetraedrice în vederea obținerii unei precizii ridicate a rezultatelor ulterioare. Discretizarea (împărțirea) modelului CAD al arcului în elemente finite a totalizat 176183 elemente cu 36534 noduri. Figura 2.4. redă discretizarea în elemente finite a modelului CAD al arcului elicoidal.

În concordanță cu modul real de funcționare (din exploatare) al arcului elicoidal exterior, scenariul simulării a fost adaptat corespunzător. Astfel, suprafața plană inferioară de așezare a arcului elicoidal este considerată fixă (translațiile după cele 3 axe X , Y și Z ale nodurilor elementelor finite conținute în această suprafață sunt nule - $UX = 0$, $UY = 0$, $UZ = 0$). Această condiție impusă suprafeței plane inferioare este ilustrată în figura 2.5. Totodată, suprafața plană superioară de așezare a arcului poate transla doar pe direcție verticală (axa Y), celelalte translații (UX , UZ) fiind nule.

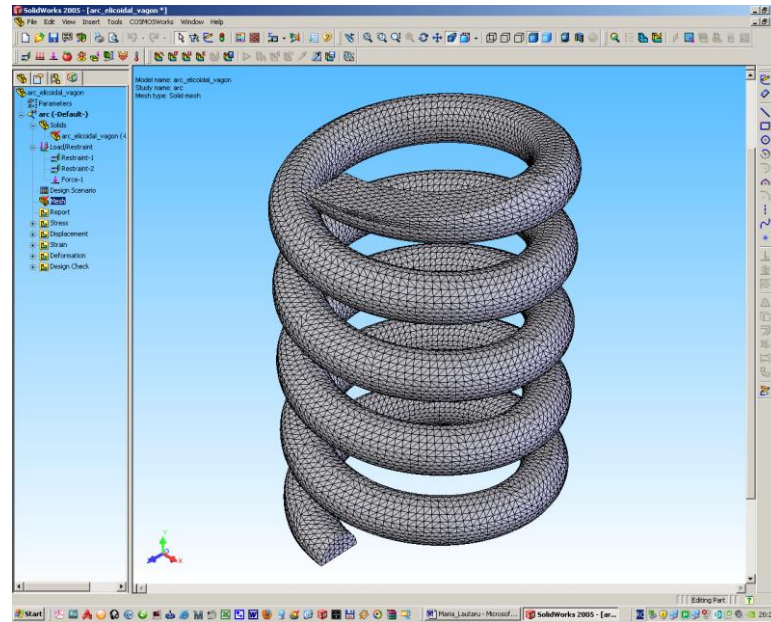


Fig. 2.4. Discretizarea în elemente finite a modelului CAD

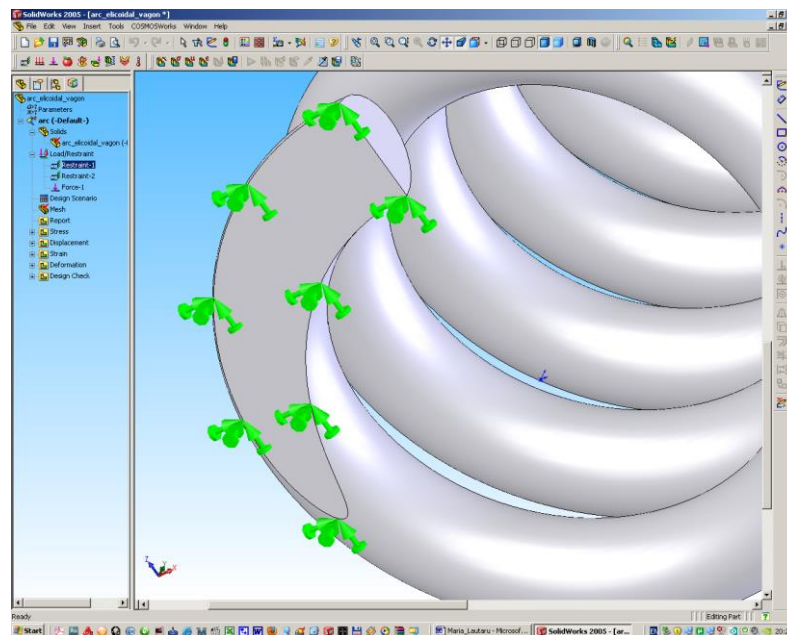


Fig. 2.5. Suprafața plană de așezare inferioară

Condiția impusă suprafeței plane de așezare superioare este ilustrată în figura 2.6.

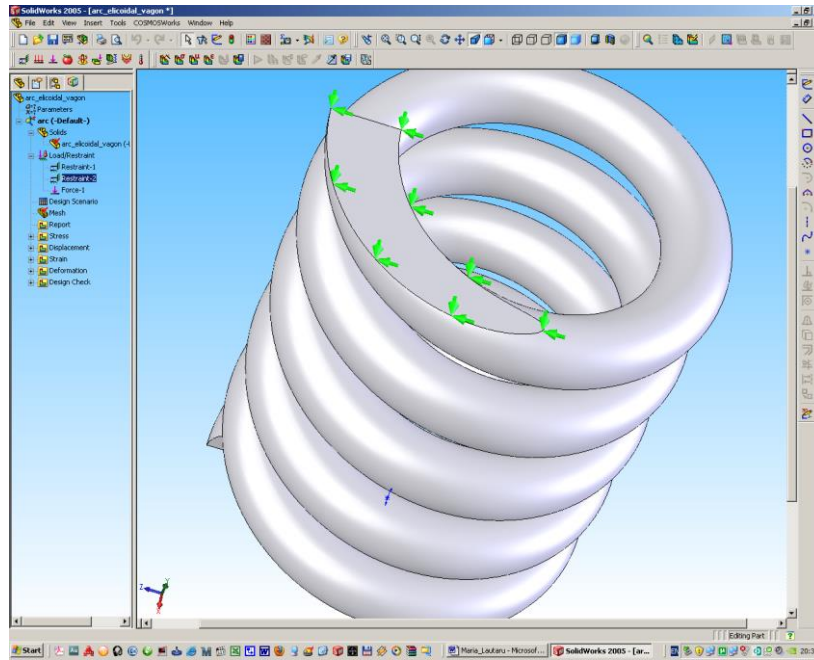


Fig. 2.6. Suprafața plană de așezare superioară

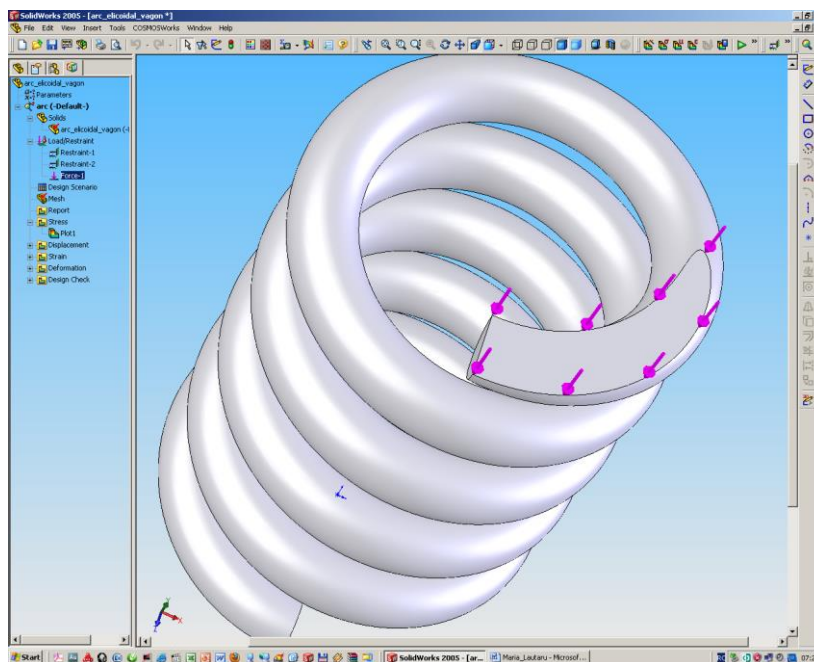


Fig. 2.7. Reprezentare aplicare sarcină

Sarcina P_0 corespunzătoare vagonului gol este transmisă arcului elicoidal exterior prin intermediul suprafeței plane superioare de așezare. Astfel, conform figurii 2.7. această sarcină este aplicată perpendicular pe suprafața amintită.

Odată cu aplicarea sarcinii P_0 , scenariul simulării cu MEF s-a finalizat și s-a rulat analiza în cadrul programului COSMOSWorks 2005.

2.3. Rezultate și concluzii

Aplicarea sarcinii P_0 produce o săgeată maximă a arcului UY_{max} cu valoarea de aproximativ 65 mm. Realizând diferența dintre lungimea liberă a arcului H_0 și săgeata obținută în urma simulării, rezultă lungimea sub sarcină a arcului teoretică (simulată) L_{0s} cu valoarea de 269 mm. Caracteristicile de recepție ale arcului elicoidal exterior specifică înălțimea $L_0 = 256$ mm la aplicarea sarcinii P_0 . Abaterea lungimii teoretice (simulate) a arcului sub sarcina P_0 față de cea reală este dată de relația:

$$A = \frac{L_{0s} - L_0}{L_0} \cdot 100 \quad [\%], \quad (2.19)$$

rezultând o valoare de +5,07 % considerată ca fiind acceptabilă. Astfel, din acest punct de vedere, scenariul simulării reproduce fidel modul de funcționare real al arcului elicoidal exterior. Figura 2.8. ilustrează distribuția deplasărilor nodale orientate după axa Y (săgețile nodale).

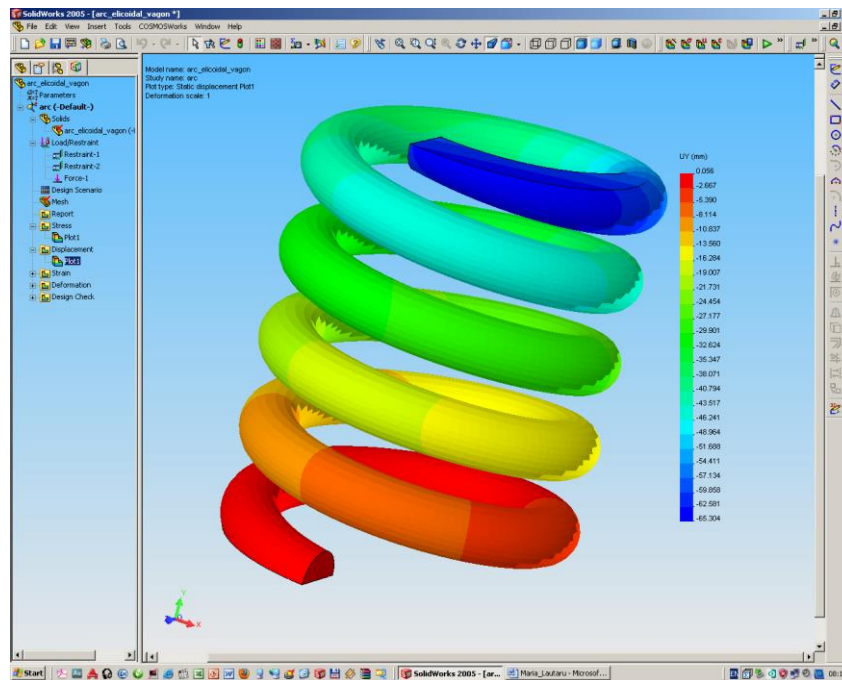


Fig. 2.8. Distribuția deplasărilor nodale

Datorită faptului că arcul este solicitat la compresiune, săgețile nodale sunt orientate în sensul negativ al axei Y, valorile maxime fiind înregistrate în zona marcată în culoarea albastru intens.

Conform criteriului de rezistență *vonMises* (tensiunea echivalentă), redat de următoarea relație:

$$\sigma_{vonMises} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}{2}} \quad [\text{MPa}], \quad (2.20)$$

unde σ_1 , σ_2 , σ_3 reprezintă cele trei tensiuni principale, arcul elicoidal rezistă la solicitarea maximă dacă valoarea maximă a tensiunii echivalente $\sigma_{vonMises}$ nu depășește rezistența la rupere R_m a oțelului din care este realizat arcul.

Ca rezultat al simulării, pentru sarcina P_0 aplicată arcului, s-a obținut o valoare maximă a tensiunii echivalente $\sigma_{vonMises}$ de aproximativ 1097 MPa.

Ulterior, s-a efectuat simularea într-o a doua variantă, corespunzătoare unei sarcini P de 4660 daN (caracteristică de recepție) ce reprezintă o solicitare de supraîncărcare a vagonului. În această variantă, s-a obținut o valoare maximă a tensiunii echivalente $\sigma_{vonMises}$ de aproximativ 1491 MPa. Figura 2.9. redă distribuția tensiunii echivalente $\sigma_{vonMises}$ în arcul elicoidal, în varianta aplicării sarcinii P_0 . Tensiunile maxime se regăsesc la nivelul primei spire superioare (zona marcată în culoare roșie).

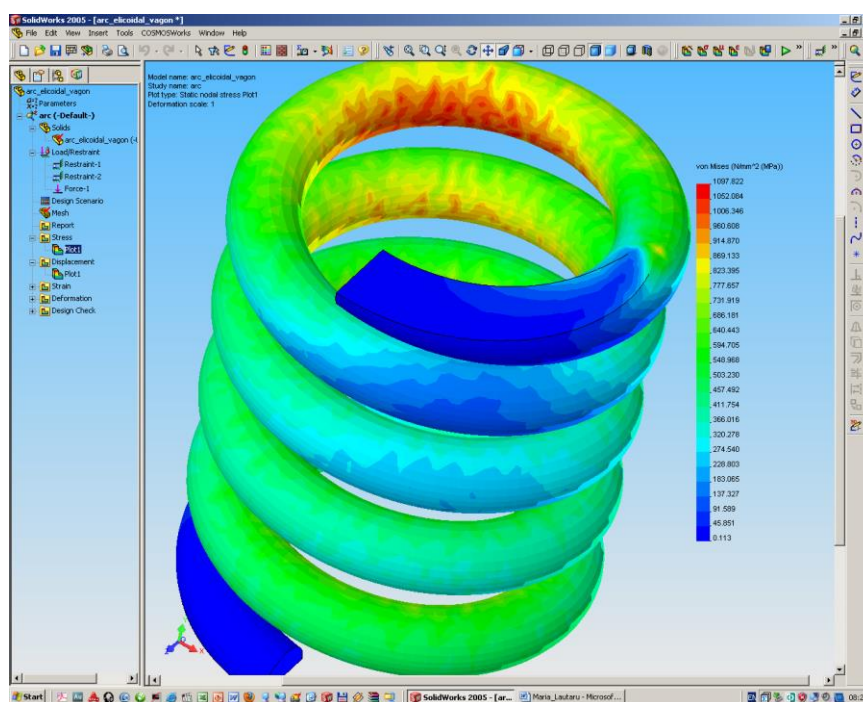


Fig. 2.9. Distribuția tensiunilor echivalente

În ambele variante ale simulării, tensiunile echivalente maxime nu depășesc rezistența la rupere a oțelului arcului, deci se poate concluziona faptul că aplicarea unei suprasarcini asupra vagonului nu produce avarii prin cedarea arcurilor boghiurilor.

Sunt tratate detaliat, fundamentele teoretice care au stat la baza apariției metodei elementului finit precum și formularea matematică a acestei metode. Pe parcurs sunt prezentate, terminologia, conceptele și implicațiile utilizării acestei metode de analiză.

Justetea datelor obținute din analiza structurilor cu ajutorul metodei elementelor finite depind, în cea mai mare măsură, de corectitudinea și profunzimea cu care se efectuează prima etapă a studiului, analiza

structurii – atât din punct de vedere geometric cât și funcțional – urmată de alegerea tipului de elemente finite utilizate pentru discretizare. Cu toate că clasificarea elementelor finite în funcție de numărul de dimensiuni ale acestora cuprinde patru tipuri, (adimensionale, uni, bi și tridimensionale) configurațiile de elemente finite implementate în programele de analiză, în general, și în programul CosmosWorks în particular, sunt foarte numeroase.

Analiza tensiunilor și deformațiilor prin metoda elementelor finite furnizează o alternativă ușoară și simplă de analiză a problemei de geometrie complexă. Prin aplicarea practică a acestei metode s-a observat că eroarea rezultată în urma comparațiilor deformațiilor (teoretică și reală) scade cu creșterea numărului de elemente, deci se pot obține rezultate foarte apropiate de rezultatele teoretice dacă se utilizează un număr cât mai mare de elemente (discretizare cât mai fină) și o aplicare corespunzătoare a condițiilor de granită și respectiv al încărcărilor.

Arcurile elicoidale constituie elementul cel mai des utilizat ca suport elastic pentru suspensia vehiculelor, datorită durabilității mari, greutateii reduse, execuției simple și faptului că necesită operațiuni minime de întreținere pe timpul exploatarei. Principalul dezavantaj al acestui tip de suspensie este legat de faptul că acestea nu pot prelua decât forțe ce acționează de-a lungul axei lor, și deci în construcția suspensiei trebuie prevăzute elemente suplimentare de ghidare care să preia forța de propulsie sau de frânare.

CAPITOLUL 3

MATERIALE UTILIZATE LA FABRICAREA ARCURILOR ELICOIDALE CA ELEMENTE CE ECHIPEAZĂ VEHICULELE FERROVIARE

3.1. Generalități

Arcurile de calitate bună necesită pe lângă o justă dozare a compoziției oțelului un tratament termic special care depinde de forma dimensională a arcului astfel : la arcurile cu secțiuni mici ale materialului tratamentul termic poate fi aplicat înainte de executarea formei constructive a arcului, iar la arcurile cu secțiuni mari la care este necesară încălzirea materialului în vederea obținerii formei dorite, tratamentul termic se aplică după executarea formei constructive.

Alegerea semifabricatului de pornire prezintă o importanță deosebită ca și cea a mărcii de oțel deoarece influența sa asupra comportării piesei dar mai ales asupra costurilor de producție [58].

Particularitățile funcționale ale arcurilor impun următoarele proprietăți principale pentru materialele din care se confecționează :

1. limita de rupere foarte mare și limita de elasticitate apropiată de cea de rupere (sau altfel spus, raportul dintre limita de elasticitate și cea de rupere să fie apropiat de 1);
2. rezistență înaltă la oboseală;
3. alte caracteristici: rezistență termică, rezistență la coroziune, s.a.
4. bună conductibilitate electrică, amagnetism, dilatare termică redusă.

La alegerea calității de materiale trebuie corelate optimal 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 și proporția elementelor de aliere satisfac selectiv majoritatea cerințelor formulate.

La alegerea materialelor, factorul decisiv îl constituie stabilirea prealabilă a concepției proiectării.

În trecut stabilirea formei funcțional-constructive se făcea exclusiv pe baza intuiției iar calitatea, durabilitatea și fiabilitatea produselor erau consecința unei prelucrări artizanale, deosebit de îngrijită.

În prezent forma și funcționalul în proiectare se bazează mai mult pe experiența acumulată iar calitatea, durabilitatea și fiabilitatea sunt

obținute printr-o prelucrare adecvată în limitele unor parametri tehnologici riguros respectați și controlați [13]

Factorii esențiali pentru alegerea materialului la proiectarea unei piese mecanice sunt :

- Categoria de oțel utilizat
- Tipul de semifabricat
- Tratamentul termic sau termo-chimic

Alegerea semifabricatului de pornire prezintă o importanță deosebită ca și cea a mărcii de oțel datorită influenței semnificative asupra comportării piesei dar mai ales asupra costurilor de producție.

O importanță deosebită în alegerea materialului o constituie stabilirea condițiilor tehnice de calitate ce trebuie garantate de producător/furnizor la livrarea materialelor achiziționate a industriilor prelucrătoare.

Atât în faza de proiectare a arcurilor cât și la tehnologia de fabricare a acestora trebuie luați în calcul o serie de factori, decisivi în ceea ce privește calitatea produsului finit cât și rolul funcțional calitativ al arcurilor în domeniul în care sunt utilizate.

În anumite situații pot să apară specificații complementare privind proprietățile anticorozive, refractare, de conductibilitate termică și dilatare liniară, magnetice și de conductanță electrică [51],[74].

Prima proprietate este de bază. Necesitatea ei decurge din analiza expresiei lucrului mecanic efectuat de sarcina exterioară, care – așa cum se va demonstra – are două forme principiale, în funcție de natura tensiunii din sollicitarea principală:

$$L \approx \sigma_{\max}^2 V ,$$

sau:

$$L \approx \tau_{\max}^2 V ,$$

în care intervin: σ_{\max} - tensiunea normală maximă din arc; τ_{\max} - tensiunea tangențială maximă din arc; V – volumul arcului. Analiza expresiilor anterioare arată că:

- dacă se presupune că lucrul mecanic este constant, adică deformația este menținută aceeași la o încărcare dată, atunci volumul arcului se poate reduce dacă tensiunea maximă din arc poate fi mărită la limite admisibile mari; de aici rezultă o economie de material;
- invers, dacă se presupune că se menține volumul, o ridicare a tensiunii admisibile din arc la valori admisibile mari determină o creștere a lucrului mecanic exterior; aceasta înseamnă realizarea de încărcări și/sau deformații mai mari, deci a unei funcționalități mai bune a arcului.

O atenție deosebită trebuie acordată tratamentelor termice administrate, limitându-se la minim decarburările și defectele superficiale [36].

Materialele care răspund cel mai bine acestor cerințe de proprietăți sunt sintetizate în fig. 2.1.

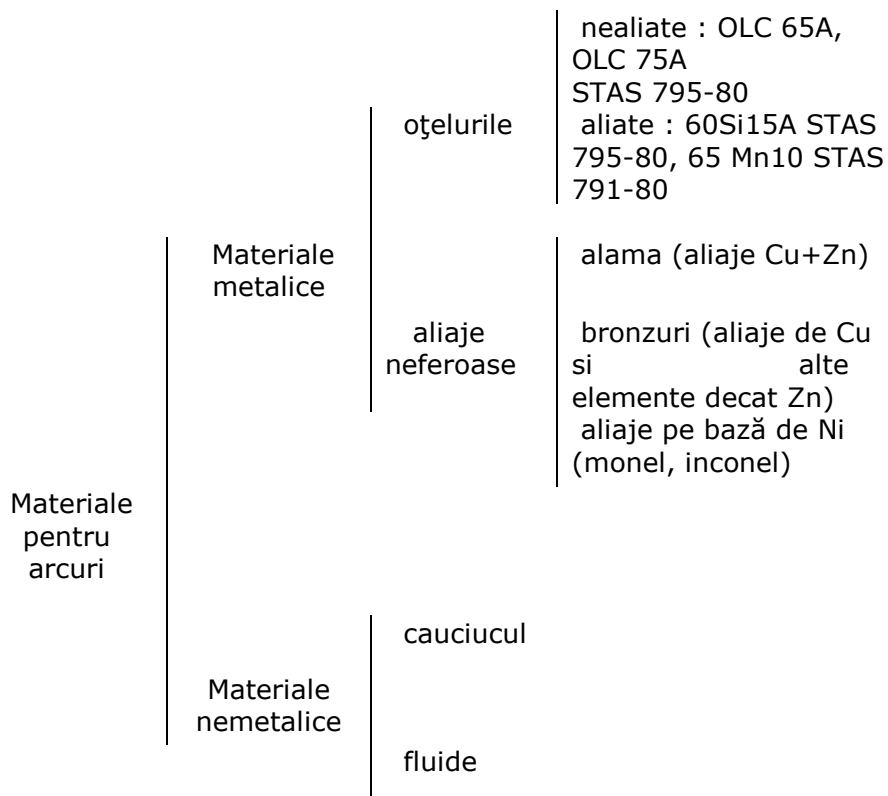


Fig. 2.1. Principalele materiale pentru arcuri

Oțelurile răspund cel mai bine cerinței fundamentale ca limita de rupere să fie foarte ridicată și raportul dintre limita de elasticitate și cea de rupere să fie apropiat de 1, și anume: oțelurile hipoeutectoide cu conținutul de carbon de (0,6...0,77)%. Aceste oțeluri au cea mai ridicată limită de rupere. Într-adevăr, la creșterea conținutului de carbon din oțel până la o anumită limită (0,77%), crește conținutul de cementită din perlită (amestec bifazic de ferită și cementită) și rezultă o creștere a rezistenței și, în paralel, a durității. Peste această limită, cementita devine în surplus și se depune la marginea grăunților de perlită; ca urmare duritatea crește în continuare, dar limita de rupere scade, deoarece cementita dintre grăunții de perlită determină o fragilitate a structurii.

Pentru arcuri se folosesc oțeluri hipoeutectoide nealiante sau aliate. Oțelurile nealiante utilizate sunt oțelurile carbon de calitate cu limitele de rupere cele mai înalte: OLC 65 A, OLC 75 A STAS 795-80. Oțelurile aliate au în compoziția chimică:

- Cr și Mo, care determină o nouă mărire a limitei de rupere;
- Si și V, care asigură și a doua cerință, a limitei de elasticitate apropiate de cea de rupere;
- Ni, care asigură o rezistență termică ridicată, dar și o rezistență mărită la coroziune.

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

Barele de oțel utilizate pentru confecționarea arcurilor vehiculelor feroviare trebuie să aibă caracteristici fizice, chimice, mecanice și geometrice indicate în normele internaționale. [34],[69],[72].

Materialele cele mai des folosite sunt oțelul carbon sau oțelurile aliate cu Cr, Mn, Si, V, capabile de a îndeplini cerințele de mai sus. Oțelul poate da, prin tragere la rece, sârme de rezistență acceptabilă pentru executarea arcurilor de clasă mijlocie. Arcurile de calitate bună, necesită, pe lângă o justă dozare a compoziției oțelului, tratamente termice speciale, care depind de forma dimensională a arcului astfel : la arcurile cu secțiuni mici ale materialului tratamentul termic poate fi aplicat înainte de executarea formei constructive a arcului, iar la arcurile cu secțiuni mari la care este necesară încălzirea materialului în vederea obținerii formei dorite, tratamentul termic se aplică după executarea formei constructive [36].

3.2. Arcuri elicoidale utilizate la vehiculele de cale ferată

Arcurile elicoidale de compresiune utilizate la vagoanele de cale ferată ca organe de suspensie, de șoc sau de tracțiune trebuie să satisfacă anumite caracteristici fizice, geometrice și mecanice [24], [29].

3.2.1. Caracteristici fizice

Suprafața spirelor nu trebuie să prezinte lipsuri de material sau orice defect care poate influența întrebuințarea lor sau urme de calamine. În urma examinării magnetoscopice nu trebuie să apară urme de crater. Extremitățile teșite ale arcurilor nu trebuie să prezinte praguri și să se termine cu o rotunjire cu o rază suficientă pentru a evita accidentarea în timpul manevrărilor.

Operația de debavurare trebuie executată astfel încât să nu fie afectate spirele adiacente.

Arcul elicoidal, înainte de vopsire trebuie să aibă suprafețele curate, fără urme de oxizi, etc. Pentru înlăturarea acestora, toate operațiile care se aplică trebuie să fie astfel efectuate încât să nu producă defecte de funcționare sau de montare.

Aspectul exterior este verificat cu ochiul liber în condiții normale de vedere.

Fabricantul are libertatea de alegere a procedurii de fabricație cu condiția obținerii gradului de finisare dorit, fără alterarea materialului și nici a aspectului.

3.2.2. Caracteristici geometrice

Forma, dimensiunile și sensul de înfășurare trebuie să fie conform cotelor și toleranțelor înscrise pe desen sau în standardele corespunzătoare, respectând abaterile de formă și poziție. Când nu este precizat, sensul de înfășurare este spre dreapta.

Extremitatea firului fiecărei spire finale, după îndreptarea bazelor arcului, trebuie să aibă o grosime care să nu depășească valoarea 0.25 ori diametrul nominal al spirei.

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

3.2.3. Caracteristici mecanice

Caracteristicile mecanice trebuie să fie obținute pe arcuri în stare de livrare și după ce fiecare arc a fost supus la încercarea de elasticitate de scurtă durată dar înainte de aplicarea învelișului de protecție contra coroziunii.

Duritatea măsurată pe arcuri sau pe proba martor, tratată odată cu arcurile trebuie să corespundă cu cea prevăzută în desenele de execuție.

Arcurile trebuie să suporte fără a se fisura două comprimări succesive, fără să se constate o diferență mai mare de $\pm 2.5\%$ între înălțimea arcului luată sub sarcina $0.05 P$ 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 cadența sunt indicate în desen, apoi să satisfacă încercarea de elasticitate de scurtă și lungă durată și încercarea de flexibilitate. Se poate determina astfel și rigiditatea arcului [36].

De asemenea sensul de bătaie a arcului se face pentru sarcina prevăzută în desenul de execuție și se realizează prin marcarea cu o bandă de vopsea pe prima spirală activă a arcului, după aplicarea protecției corozive.

O altă cerință o reprezintă marcarea. Fiecare arc a cărui dimensiune nominală a spirei este de minim 10 mm, se va marca. Marcarea se va face pe un colier metallic sau nemetalic atașat pe una din spirele active ale arcului. Marcarea trebuie să cuprindă : marca furnizorului, luna și ultimele două cifre ale anului de fabricație, înălțimea sub sarcină P_0 a arcului și flexibilitatea axială.

3.3. Oțeluri pentru arcuri elicoidale formate la cald și tratate termic

Caracteristicile impuse arcului elicoidal utilizat la vehiculele feroviare determină atât alegerea unei anumite compoziții chimice cât și alegerea unei 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 [7], [36].

Săgeata are o mare importanță în modul de lucru și comportarea unui arc, astfel dacă se urmărește obținerea unei săgeți cât mai apropiate de valoarea teoretică, trebuie ca toleranțele admise la dimensiunile

barelor să fie cât mai mici, lucru obținut prin operația de laminare la rece dar cu un cost mai ridicat al materialului.

La alegerea materialului, proiectantul trebuie să îmbine considerațiile de ordin tehnic și economic astfel încât să utilizeze la maxim calitățile oțelurilor de la cele mai ieftine, utilizabile în condițiile date și să aibă în vedere proprietățile tehnologice ale materialului, posibilitatea de execuție a arcului, importanța parametrilor dimensionali ai arcurilor, posibilitatea ridicării indicatorilor calitativi ai materialului prin tratamente termice sau mecanice.

Alegerea judicioasă a unui oțel de arc care să cuprindă toți acești factori impune, în primul rând cunoașterea compoziției chimice a oțelului și a influenței elementelor de aliere[51].

3.3.1. Caracteristici cerute

În cazul în care nu sunt specificate în comandă, procedeele folosite pentru elaborarea oțelului și fabricarea produselor sunt lăsate la inițiativa fabricantului. În cazul în care se cere, achizitorul trebuie să fie informat despre procedeul de elaborare a oțelului folosit.

Tipuri și condiții de livrare. Oțelurile trebuie să fie comandate și livrate în funcție de tipul condiției de livrare care trebuie stabilită în momentul cererii de ofertă și în comandă, conform tabelului 3.1

Tabelul 3.1. Tipuri de condiții de livrare

Caracteristici cerute	Tipuri de condiții de livrare					
	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 Ø 10 mm)	-	-	-	-	x	x

Compoziție chimică. Compoziția chimică a materialului utilizat pentru confecționarea arcului trebuie să fie conform tabelului 3.2.

Dacă comanda este făcută conform condițiilor de livrare de tip 1 sau 1(c) trebuie să se respecte abaterile între valorile limită specificate și analiza pe produs, date în tabelul 3.3.

Dacă comanda este făcută conform condițiilor de livrare de tip 2, 2(c), 4 și 4(c) proprietățile mecanice specificate trebuie să constituie criteriile de recepție. În acest caz analiza pe produs trebuie să fie aproximativ egală cu cifrele indicate în tabelul 3.2.

3.3.2. Caracteristici mecanice

În ceea ce privește studiul caracteristicilor mecanice în legătură cu conținutul de martensită din miez, folosirea oțelurilor trebuie să se restrângă la bare de grosimi date în tabelul 3.4.

În funcție de tipurile de condiții de livrare specificate în tabelul 3.1. se poate stabili duritatea materialului, astfel pentru tipurile de condiții de livrare 1(c), 2(c) și 4 (c) se iau în considerare valorile de duritate maximă, conform tabelului 3.6. În plus față de alte specificații, valorile durității fiind măsurate după o pregătire convențională a suprafeței, iar pentru tipurile de condiții de livrare 2 și 2(c), când capacitatea de călire este un criteriu de comandă, pentru duritatea Rockwell se aplică cifrele indicate în tabelul 3.7

Tabel 3.3. Abaterile admisibile între analizele specifice și analiza pe produs

Tip de oțel	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Cr %	Mo %	V %
1 și 2	±0.02	±0.05	±0.04	+0.005	+0.005			
3	±0.02	±0.05	±0.04			±0.04		
4 până la 6	±0.02	±0.03	±0.04			±0.05		
7	±0.02	±0.03	±0.04			±0.05	±0.03	
8	±0.02	±0.03	±0.04			±0.05		±0.02
9	±0.02	±0.03	±0.04			±0.05	±0.03	±0.02
10	±0.02	±0.03	±0.04			±0.05		±0.02

Tabel 3.4. Dimensiuni maxime recomandate pentru table și bare

Tipul de oțel	Dimensiunile maxime	
	Grosimea tablelor	Diametrul barelor
1	16	24
2	8	12
3	16	24
4	18	28
5	22	33
6	24	35
7	47	70
8	27	40
9	40	60
10	42	63

Tabel 3.2. Tipuri de oțel și compoziția chimică garantată

Tip de oțel	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Cr %	Mo %	V %
1	0.47 până la 0.55	1.50 până la 2.00	0.50 până la 0.80	0.040	0.040			
2	0.52 până la 0.60	1.50 până la 2.00	0.60 până la 0.90	0.040	0.040			
3	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		
4	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		
5	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		
6	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		
7	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	
8	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		
9	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
10	0.49 până la 0.56	1.20 până la 1.50	0.70 până la 1.00	0.035	0.035	0.70 până la 1.00		0.07 până la 0.18

Caracteristicile mecanice obținute pe epruvetele prelevate în lung, cu diametrul de 10 mm și supuse unui tratament termic de referință conform indicațiilor din tabelul 3.8. trebuie să fie conform specificațiilor din tabelul 3.5.

În urma analizării valorilor din tabele se constată o creștere a călibilității de la oțelul 1 la oțelul 10.

Tabelul 3.5 Caracteristici mecanice pentru epruvete prelevate în lung cu un diametru de 10 mm în stare de referință

Tip de oțel	Re min.		Rm min		A min
	N/mm ²	Tonef/in ²	N/mm ²	Tonef/in	%
1	1130	73.0	1320	85.7	6
2	1130	73.0	1320	85.7	6
3	1180	76.2	1370	88.9	5
4	1180	76.2	1370	88.9	6
5	1180	76.2	1370	88.9	5
6	1180	76.2	1370	88.9	6
7	1180	76.2	1370	88.9	6
8	1180	76.2	1370	88.9	6
9	1180	76.2	1370	88.9	6
10	1180	76.2	1370	88.9	6

Unde : Re – limita aparenta de elasticitate (limita convențională de elasticitate la 0.2%); Rm – rezistența la tracțiune; A – alungirea % după ruptură (Lo = 5 do}

3.4. Probe

3.4.1. Numărul de eșantioane din produse

Analiza pe topitură trebuie furnizată de către fabricant. În cazul în care cumpărătorul solicită o analiză pe produs, se va preleva cel puțin un eșantion din produs pe topitură.

Caracteristicile mecanice și de călire

1. Pentru materialul furnizat conform tipurilor de condiții de livrare 1(c), 2(c) și 4(c) ale tabelului 3.1. 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 3.6. In cazul în care produsul este tratat termic în mod continuu, se va face prelevarea unui eșantion din produs pentru proba de lot de 25 t sau fracțiune pentru oțelurile nealiate cu carbon – tipul 1 și 2. Pentru oțelurile aliate tip 3 până la 10, pe lot de 15 t sau fracțiune, se va preleva pe topitură, cel puțin un eșantion de produse.

Tabelul 3.6. Duritatea maximală pentru produsele livrate în stare revenită subcritică

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

2. Pentru materialul furnizat conform tipurilor de condiții de livrare 4 și 4(c) din tabelul 3.1. cu caracteristici mecanice garantate pentru secțiunea de referință tratată termic (diametru =10 mm), trebuie să se preleveze un eșantion pe topitură pentru a se face proba conform tabelului 3.5.

3. Pentru materialul furnizat conform tipurilor de condiții de livrare 2 și 2(c) din tabelul 3.1. cu garantarea asupra călibilității prin călire frontală, trebuie să se preleveze un eșantion pe topitură pentru a se face proba conform tabelului 3.7.

3.4.2. Eșantioane și epruvete

Eșantioanele pentru probă de tracțiune vor fi prelevate în lungime până în centrul produsului ca în fig.3.2. Bara din care este prelevat eșantionul pentru proba de călire frontală, trebuie să fie o bară laminată sau forjată cu diametrul de 30 sau 32 mm, reprezentând secțiunea întreagă a produsului. Secțiunile mai mari vor fi aduse la aceste dimensiuni prin laminare sau forjare.

Condițiile care trebuie respectate la pregătirea eșantioanelor trebuie să fie în conformitate cu ISO/R 642 [101].

Amplasarea și pregătirea eșantioanelor pentru analiza pe produs trebuie efectuate în conformitate cu prescripțiile ISO/R 377 [99]

Tabelul 3.7.Limitele de duritate experimentală pentru călirea specificată

Distanța de la extremitatea calită	Duritatea HRC																			
	Oțel 1		Oțel 2		Oțel 3		Oțel 4		Oțel 5		Oțel 6		Oțel 7		Oțel 8		Oțel 9		Oțel 10	
	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
1.5	56	64	57	65	59	66	57	65	59	66	60	65	60	65	57	65	57	65	58	65
3	52	61	55	62	58	66	56	65	59	66	60	65	60	65	56	65	56	65	57	65
5	42	56	49	60	57	65	55	64	57	65	60	65	60	65	66	64	56	64	57	65
7	36	52	43	57	51	64	54	63	56	65	59	65	60	65	55	64	55	64	56	64
9	32	47	37	54	45	63	52	63	53	64	59	65	60	65	53	63	53	63	56	63
11	29	43	34	50	40	61	48	62	50	63	57	65	60	65	50	62	52	63	53	63
13	27	41	32	46	38	59	43	61	45	62	54	65	60	65	46	61	51	63	52	63
15	26	38	31	42	37	57	39	60	41	61	49	65	59	65	43	60	50	62	50	62
20	22	35	28	39	33	50	33	57	35	58	39	65	58	64	37	57	48	62	48	62
25	21	33	27	37	30	45	30	52	32	54	37	63	56	64	35	53	47	62	47	62
30	-	32	26	36	29	43	28	48	30	50	34	60	54	63	33	50	46	62	46	62
35	-	31	26	35	28	41	27	45	29	47	32	57	50	63	32	48	46	61	46	62
40	-	29	25	34	27	40	26	42	28	44	30	54	46	63	30	45	45	61	45	61
45	-	28	24	33	26	39	25	40	27	42	28	50	43	63	29	44	44	61	45	61
50	-	27	24	33	25	38	24	39	26	41	25	47	41	63	28	43	44	60	44	60

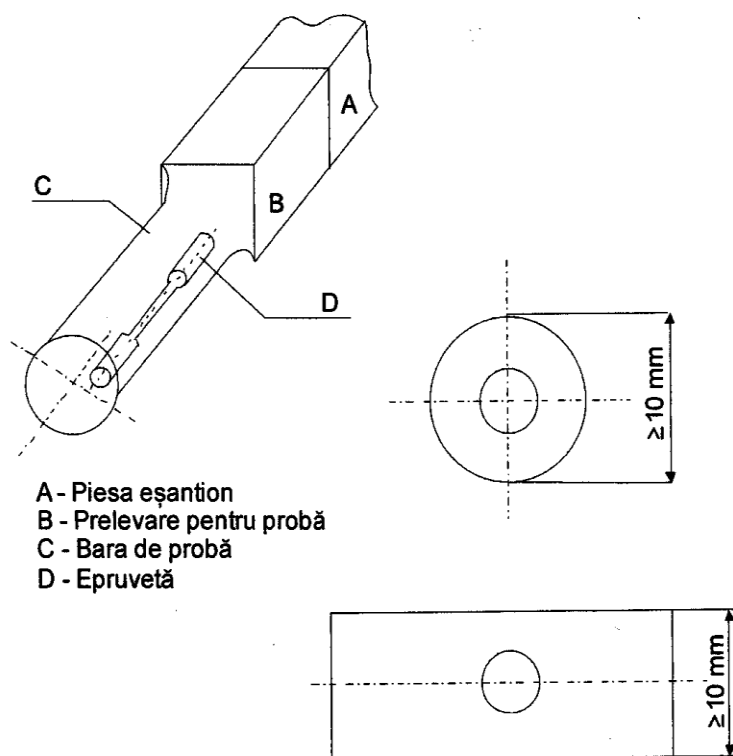


Fig. 3.2. Amplasarea epruvetei în produs

3.4.3. Metode de probă

1. Proba de tracțiune trebuie efectuată conform ISO/R 377[99].
2. Proba capacității de călibritate prin călire frontală trebuie să fie efectuată în conformitate cu ISO/R 642 [101]. Temperaturile de călire sunt redată în tabelul 3.8.
3. Proba duriții Brinell trebuie să se efectueze conform ISO/R 79 [102]; iar cea a duriții Rockwell conform ISO/R 80 [103].
4. Metoda pentru analiza chimică trebuie să fie cea prescrisă în Norma Internațională corespunzătoare sau în cazul în care nici o normă internațională nu este disponibilă, poate fi convenită și specificată în momentul cererii-ofertei și în comandă.

3.4.4. Certificarea probelor

Elementele valabile pentru certificarea probelor, conform ISO /R 404 [104] sunt :

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

Conform paragrafului 7.4. din ISO/R 642 [101], distanțele de la extremitatea călită a epruvetei până la acelea la care trebuie certificată durițea, trebuie fixate în momentul cererii de ofertă și comandă. De

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

3.4.5. Defecte și toleranțe dimensionale

Condițiile date în capitolul 8 al ISO/R 404 [92] sunt aplicabile pentru :

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

3.3. Concluzii asupra materialelor utilizate la confecționarea arcurilor elicoidale

Capacitatea de arcuire a oțelurilor este determinată de modulul de elasticitate. Ca valoare , 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 înaltă la oboseală;
- alte caracteristici: rezistență termică, rezistență la coroziune,
- bună conductibilitate electrică, amagnetism, dilatare termică redusă.

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

- printr-o compoziție chimică adecvată – conținutul de C, Si, Mn mărite prin alierea cu Cr și V, precum și cu alte elemente de aliere;
- printr-un tratament termic obligatoriu de călire și revenire medie.

Pentru a obține o rezistență la oboseală mare și un modul de elasticitate ridicat, arcurile trebuie să conțină un procent mare de Si (în acest caz 1.3 %)

Arcurile elicoidale înfasurate la cald sunt supuse unui tratament termic care cuprinde obligatoriu o călire în apă sau ulei, după caz, în funcție de categoria de oțel folosit și o revenire urmată de o răcire lentă în aer liniștit[36].

Pentru a asigura o bună calitate 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 o abatere de +/- 10°C în cursul operațiilor de tratament termic.

Temperaturile de tratament termic trebuie să fie controlate cu (dispozitive de înregistrat (pirometre înregistratoare) etalonate.

Tratamentele termice trebuie să fie aplicate astfel încât să se evite toate deformațiile și toate formările de calamine, care ar putea influența buna comportare a arcurilor în exploatare și a asigura omogenitatea caracteristicilor arcurilor.

Caracteristicile de exploatare sunt date de către structurile obținute în urma tratamentelor termice de călire și revenire medie.

Elemente chimice ca C, Mn, Cr, V influențează călibilitatea oțelului acționând asupra vitezei critice de călire. Aceste elemente cresc cantitatea de martensită din oțeluri, se pot căli la martensită piese de dimensiuni mari rezultând creșterea durității oțelului.

Viteza critică de călire reprezintă viteza minimă de răcire a unui oțel în timpul operației de călire pentru a se putea obține în structură o cantitate suficientă de martensită de călire.

Tabelul 3.8. Condiții de tratamente termice

Tip otel	Laminarea sau forjarea produsului (°C)	Tratamentul termic necesar pentru obținerea stării de referința			Proba de călire frontală ±5 °C	Formare la cald a arcurilor (°C)	Stare de revenire subcritică	Tratament termic al arcurilor		
		Temp. de calire ±10 °C	Agent de calire	Temp. de revenire ±20 °C				Călire (°C)	Agent de călire	Revenire (°C)
1	1050 la 850	860	ulei	480	860	900 la 820	640 la 700	845 la 875	ulei	400 la 550
2	1050 la 850	855	ulei	480	850	900 la 830	640 la 700	840 la 870	ulei	400 la 550
3	1050 la 850	845	ulei	480	850	920 la 830	640 la 700	830 la 860	ulei	400 la 550
4	1050 la 850	845	ulei	480	850	920 la 830	640 la 700	830 la 860	ulei	400 la 550
5	1050 la 850	845	ulei	480	850	920 la 830	640 la 700	830 la 860	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	865	ulei	480	850	920 la 830	640 la 700	830 la 860	ulei	400 la 550
8	1050 la 850	865	ulei	480	850	920 la 830	640 la 700	830 la 860	ulei	400 la 550
9	1050 la 850	865	ulei	480	850	920 la 830	640 la 700	830 la 860	ulei	400 la 550
10	1050 la 850	865	ulei	480	850	920 la 830	640 la 700	830 la 860	ulei	400 la 550

1) durata de austenizare 0.5 h

2) durata de revenire 1 ora

CAPITOLUL 4

CONTRIBUȚII LA TEHNOLOGIA DE FABRICARE A ARCURILOR ELICOIDALE

4.1. Generalități

Pentru execuția arcurilor care echipază boghiurile Y 32 R, societatea constructoare de arcuri trebuie omologată de Societatea Națională a Căilor Ferate Franceze, specificația tehnică ST 225 J.

Pentru studiu s-au folosit două tipuri de arcuri elicoidale și anume arcurile de la suspensia boghiului Y 32 R (12,38 tone/osie)

- arcul exterior \varnothing 37 mm
- arcul interior \varnothing 24.7 mm

Măsurile de îmbunătățire tehnologică se vor încadra în tehnologia actuală și vor fi în concordanță cu dotarea tehnică actuală [34],[27].

4.1.1. Condiții tehnice

Pentru execuția arcurilor elicoidale sunt necesare a fi îndeplinite următoarele condiții tehnice :

- desene de execuție;
- planele de operații;
- normele referitoare la material și la arcuri [45], [89];
- programul pentru realizarea și testarea la oboseală (tab.4.1; tab.4.2;);
- certificatele de calitate emise de producător pentru materialele utilizate;
- buletinele de analiză și încercări mecanice efectuate (tab.4.3; tab.4.4)
- microstructuri ale probelor martor.

Tabel 4.1.

Arcuri de compresiune exterioară \varnothing 37 mm					
Treapta de sarcină	Lungimea sub sarcină $F_1(L_1)$	Cursa sup. (L_0) [mm]	Cursa inf. (L_u) [mm]	Cursa [mm]	Nr. cicluri
1	256	266,3	245,7	$\pm 10,3$	$2,0 \times 10^6$
2	256	268,8	243,2	$\pm 12,8$	$1,0 \times 10^6$
3	256	271,6	240,4	$\pm 15,6$	$1,0 \times 10^6$

Pentru analiză s-au luat 2 loturi formate din 5 arcuri de fiecare tip, executate din aceeași sarjă și supuse aceluiași tratament termic.

Tabel 4.2.

Arcuri de compresiune interioară Ø 24.7 mm					
Treapta de sarcină	Lungimea sub sarcină $F_1(L_1)$	Cursa sup. (L_0) [mm]	Cursa inf. (L_u) [mm]	Cursa [mm]	Nr. cicluri
1	256	266,5	245,5	±10,5	$2,0 \times 10^6$
2	256	267,3	244,7	±11,3	$1,0 \times 10^6$
3	256	269,4	242,6	±13,4	$1,0 \times 10^6$

4.2. Tehnologia de execuție a arcurilor elicoidale cilindrice de compresiune

Tehnologia de execuție și verificare a arcurilor elicoidale pentru vehiculele feroviare trebuie să fie în concordanță cu fișa UIC 822 O [93],[36].

Arcurile sunt clasificate în trei categorii, în funcție de severitatea solicitărilor la care sunt supuse în exploatare [36] și conform normei UIC specificată, natura și proporția verificărilor sunt cele din tabelul 4.5, cu următoarele precizări :

- suprafața arcurilor nu trebuie să prezinte urme de calamină, lipsuri de material sau orice alt defect care poate influența utilizarea lor;

- la examinarea magnetoscopică nu trebuie să apară pe arcuri nici o urmă de crater;

- extremitățile teșite ale arcurilor nu trebuie să prezinte praguri și să se termine cu o rotunjire cu o rază suficientă pentru a evita accidentarea în timpul manevrărilor;

- forma, dimensiunile și sensul de înfășurare ale arcului trebuie să fie conform cu indicațiile desenului de execuție. Când nu este precizat, sensul de înfășurare este dreapta.

Extremitatea firului fiecărei spire finale, după îndreptarea bazelor arcului, trebuie să aibă o grosime care să nu depășească valoarea 0.25 ori diametrul nominal al spirei.

- la comprimare, sub sarcina de încărcare 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.

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 general, după înfășurare, trebuie să fie lăsate să se răcească în aer liniștit, cu răcire controlată;

Toate defectele de aspect sau de dimensiuni determină rebutul arcurilor în cauză;

Toate caracteristicile fizice sau mecanice neconforme cu condițiile prescrise, determină rebutul lotului respectiv.

Tabelul 4.3.

Arc Ø 24.7 mm	Caracteristici mecanice					Analiza chimică %						
	Limita de curgere [N/mm ²]	Rezistența la rupere [N/mm ²]	Alungirea [%]	HB stare crudă		C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
				ext	nucleu							
prescris	min	min	min			0.49	1.20	0.70	-	-	0.70	0.50
	1200	1600	6	248	248	0.56	1.50	0.90	0.020	0.010	1.00	0.70
	1210	1630				0.53	1.29	0.79	0.010	0.002	0.87	0.62
	1220	1639	8.6									
	Duritate HRC după tratament				56	62	Calire 880 °C -ulei					
	Revenire 440 °C -aer linistit											

Tabelul 4.4.

Arc Ø 37 mm	Caracteristici mecanice					Analiza chimică %						
	Limita de curgere [N/mm ²]	Rezistența la rupere [N/mm ²]	Alungirea [%]	HB stare crudă		C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni
				ext	nucleu							
prescris	min	min	min			0.49	1.20	0.70	-	-	0.70	0.50
	1200	1600	6	248	248	0.56	1.50	0.90	0.020	0.010	1.00	0.70
	1210	1630				0.53	1.29	0.79	0.010	0.002	0.87	0.62
	1220	1639	8.6									
	Duritate HRC după tratament				56	62	Calire 880 °C -ulei					
	Revenire 440 °C -aer linistit											

Noi verificări sau încercări la cecerea fabricantului, cu sau fără tratament termic, se pot face numai cu acordul administrației clientului.

Tabelul 4.5.

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	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
Anduranță	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, analizate în prezenta lucrare, cuprinde următoarele operații :

- debitarea materialului care se execută folosind ca utilaj un ferăstrău cu bandă, la lungimea de debitare dată de formula :

$$L = \pi \times D_m \times n_t \div \cos \alpha_o \quad (4.1.)$$

-rotunjirea capetelor , care se execută folosind ca utilaj un strung și are ca scop ca după prelucrarea suprafețelor de asezare, capetele arcurilor să nu aibă muchii ascuțite, evitând astfel accidentările în timpul manipulării.

-înfășurarea la cald, folosind ca utilaj un cuptor cu inducție SODALCO, mașina de înfășurat HEUSER și un dorn de înfășurare.

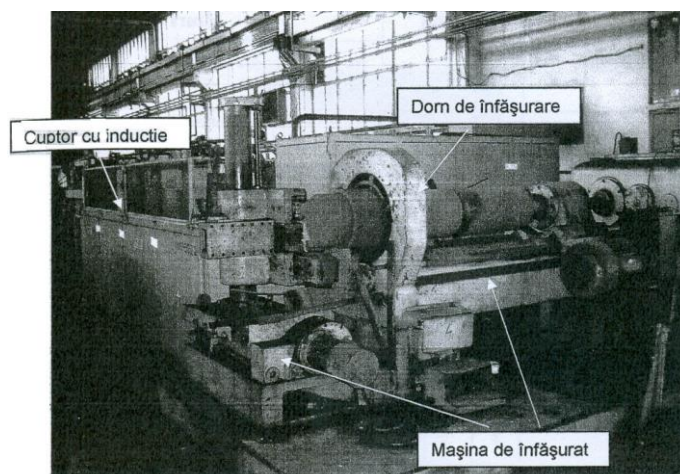


Fig. 4.1. Cuptorul cu inducție și mașina de înfășurat arcuri elicoidale
-ajustarea la cald a spirei de capăt și a pasului arcului, care constă în închiderea spirelor terminale prin lovire manuală, cu ciocanul, pe dornul de ajustat.

-realizarea planeității suprafețelor de așezare care se execută pe strung utilizând un dorn de strunjit.

-tratament termic de îmbunătățire (călire+revenire) care se execută într-o linie tehnologică de tratament termic, discontinuă, în atmosferă controlată, urmată de o călire cu răcire în ulei și o revenire în aer liniștit.

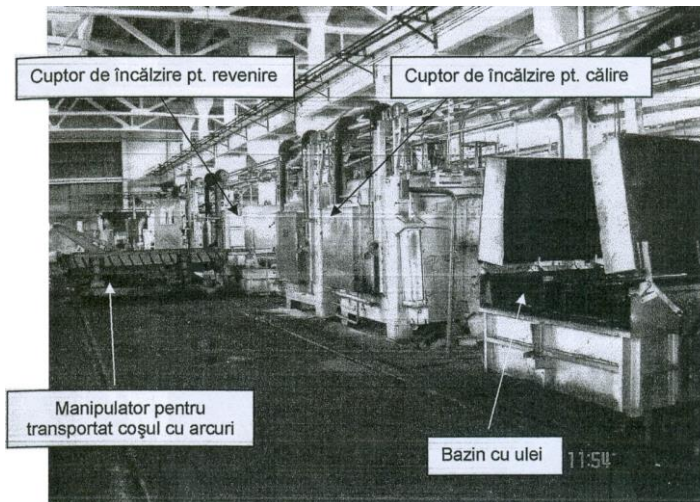


Fig.4.2. Instalatia de tratament termic discontinua in atmosfera controlata

-verificarea durității. Încercarea de duritate trebuie executată obligatoriu pe una din spirele de capăt iar duritățile măsurate pe arcuri trebuie să fie conforme cu cele indicate în desenul de execuție.

Probele executate

Proba 1 se execută pe un utilaj de diagramat ANDILOG (fig.4.3.), și are ca scop stabilizarea arcului și determinarea adaosului pentru operația de strunjit finisat a suprafețelor de așezare a arcurilor, prin verificarea înălțimii arcului sub sarcina prescrisă. Operația de strunjit finisat a suprafețelor de așezare a arcurilor se execută pe strung cu ajutorul dornului de strunjit.

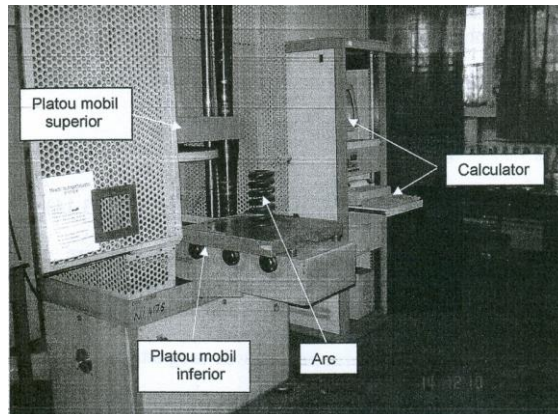


Fig.4.3. Masina de diagramat arcuri elicoidale tip ANDILOG

Proba 2 se execută pe mașina de diagramat ANDILOG și are ca scop verificarea înălțimii arcului sub sarcina prescrisă. Operația de ecruisare se execută pe o instalație de ecruisat SIESSON-LEHMANN cu alice din oțel.

Proba de elasticitate și flexibilitate se execută pe mașina de diagramat ANDILOG. Operația de diagramare constă în verificarea înălțimii arcului sub sarcina prescrisă în desen.

- pentru arcul \varnothing 37 mm : înălțimea 256 ± 2 mm sub sarcina 3430 daN
- pentru arcul \varnothing 24,7 mm : este prevăzută numai verificarea înălțimii libere a arcului : $H_0 = 344 \pm 2$

Tabel. 4.6. Înălțimea sub sarcina statică și flexibilitatea obținută pentru lotul de 5 arcuri \varnothing 37 mm

Înălțimea sub sarcina pentru lotul de 5 arcuri \varnothing 37 mm			
Nr. arc	Forța	Înălțimea prescrisă	Înălțimea măsurată
1	3430 daN	256 \pm 2 mm	256,33
2			256,47
3			255,78
4			255,94
5			256,09
Flexibilitatea obținută pentru lotul de 5 arcuri \varnothing 37 mm			
Nr. arc	Forța	Flexibilitatea prescrisă	Flexibilitatea măsurată
1	P ₁ = 3000 daN P ₂ = 4460 daN	22,8 \pm 1 daN/mm	22,821
2			22,311
3			22,533
4			22,473
5			22,481

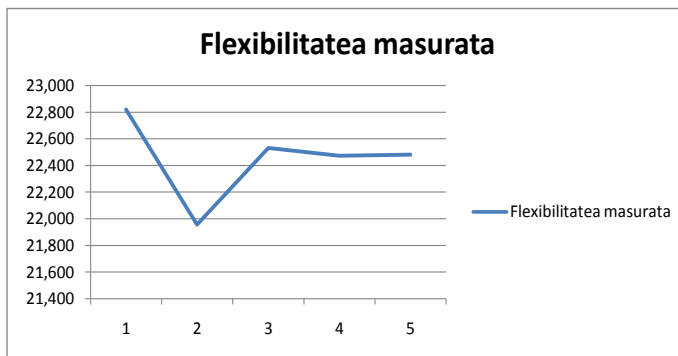


Fig. 4.4. Flexibilitatea obținută pentru lotul de 5 arcuri Ø 37 mm

Tabel.4.7. Flexibilitatea obținută pentru lotul de 5 arcuri Ø 24,7 mm

Flexibilitatea obținută pentru lotul de 5 arcuri Ø 24,7 mm			
Nr. arc	Forța	Flexibilitatea prescrisă	Flexibilitatea măsurată
1	P ₁ = 1570 daN	49,7 ±1 daN/mm	49,795
2			49,532
3	P ₂ = 2040 daN		48,976
4			49,367
5			49,612

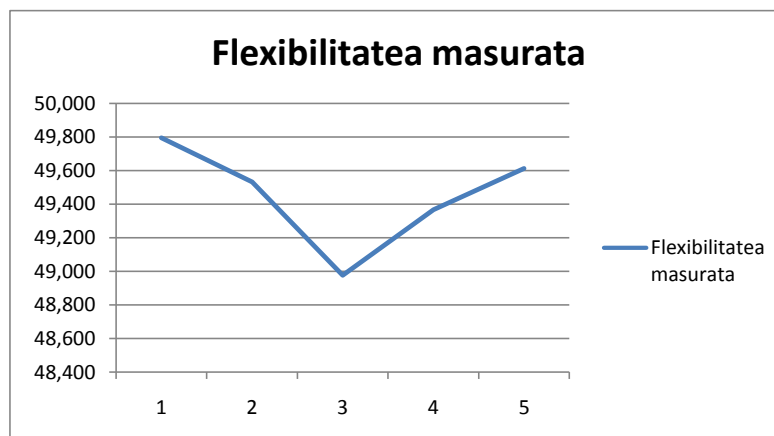


Fig. 4.5. Flexibilitatea obținută pentru lotul de 5 arcuri Ø 24,7 mm

Proba de elasticitate se execută în două etape, și anume :

1. Proba de elasticitate de scurtă durată care constă în faptul că se aplică arcului o sarcină egală cu 0,05 P (P fiind sarcina de flexibilitate indicată în desen), conform UIC 822 O [93], care se masoară înălțimea sa, apoi arcul este supus la două comprimări succesive, astfel :

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

La încercarea de scurtă durată nu trebuie să fie constatată o diferență mai mare de $\pm 0,2\%$ între înălțimea arcului măsurată sub $0,05 P$ după prima comprimare sub sarcina P și cea măsurată sub aceeași sarcină după a doua comprimare.

2. Proba de elasticitate de lungă durată se execută la fel ca și cea de scurtă durată, excepție făcând faptul ca durata celei de-a doua comprimări este de 48 ore.

Flexibilitatea teoretică se calculează cu formula:

$$Flex = \frac{L_1 - L_2}{F_2 - F_1} \text{ [mm/daN]} \quad (4.2.)$$

Unde L_1 și L_2 sunt înălțimile arcului luate sub sarcinile de flexibilitate prevăzute în desenul de execuție.

Valorile măsurate ale flexibilității trebuie să se încadreze în valorile și toleranțele din documentație. Rezultatele verificărilor la flexibilitate se regăsesc în "Fișa de măsurători" (tabelul 4.8.)

Examenul magnetoscopic. Se execută pe fiecare arc în parte, fișei UIC 822 O, anexa B pe o instalație de verificare magnetoscopică (Fig.4.6.)

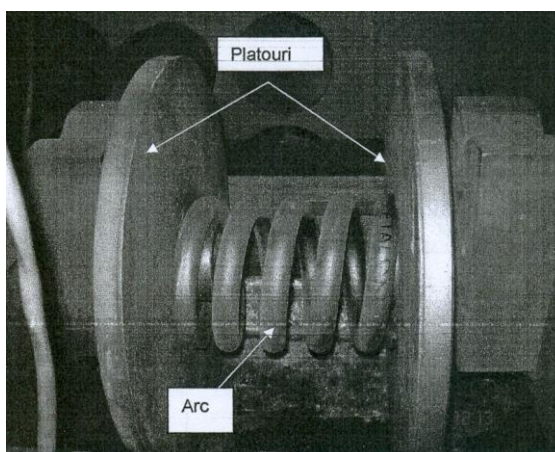


Fig. 4.6. Instalație de verificare magnetoscopică

Această verificare se execută cu scopul de a detecta defecte sensibile paralele cu axa barei arcului, numite defecte longitudinale și defecte sensibile perpendiculare pe axa barei arcului, numite defecte transversale. Controlul se efectuează prin procesul de magnetizare prin trecerea curentului după axa barei arcului, pentru depistarea defectelor longitudinale și prin trecerea curentului printr-un conductor auxiliar plasat în axa selenoidului format de arc pentru detectarea defectelor transversale.

Intensitatea curentului se reglează în funcție de dimensiunile constructive ale arcului.

Detecția se face udând toate suprafețele barei arcului cu lichid magnetic. După efectuarea verificărilor magnetoscopice este obligatoriu să se efectueze 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 zero.

Absența magnetismului permanent este verificată asigurându-se că arcurile nu exercită nici o atracție asupra unei piese magnetizate din oțel feromagnetic.

4.3. Analiza tehnologiei de execuție

4.3.1. Prescripții de material și starea barelor

Arcurile supuse analizei sunt executate din oțel 45SCD6 –specificație franceză- corespondent otelul conform DIN 17221 - 50CrV4 [89] pentru care sunt prezentate câteva mărci corespondente în tabelul 4.8.

Tabelul. 4.8. Mărci echivalente pentru oțelul 50CrV4

GERMANIA		ROMÂNIA	ANGLIA	RUSIA
DIN 17221	Werkstoff	AFNOR 35-571 EURONORM EN 89	B.S. 970	GOST 14959
50CrV4	1,8159	51VCr11A	735A51	50HGFA

Compoziția chimică a oțelului conform DIN 17221[89] și cea obținută pentru șarja din care s-au executat arcurile analizate, conform certificatului emis de producător, sunt redată în tabelul 4.9 :

Tabelul 4.9. Compoziția chimică pentru oțelul 50CrV4 [%]

50CrV4	C	Mn	Si	Cr	S	P	V	Ni
DIN	0,47- 0,55	0,70- 1,10	0,15- 0,40	0,90- 1,20	max. 0,035	max. 0,035	0,10- 0,20	-
Ø 37	0,53	0,79	0,29	1,00	0,002	0,01	0,010	0,62
Ø 24,7	0,53	0,79	0,29	1,00	0,002	0,01	0,010	0,62

Regimurile de tratament termic și deformare plastică la cald sunt redată în tabelul 4.9.

Tabel 4.9. Regimuri recomandate din DIN 17221

Temperatura de călire	830-860 °C
Mediul de răcire după călire	ulei
Temperatura de revenire	350-550 °C
Mediul de răcire după revenire	aer
Temperatura de deformare plastică	920-830 °C
Limita de elasticitate	≥1175 N/mm ²
Rezistența la tracțiune	1370-1620 N/mm ²
Alungirea	≥ 6%
Reziliența	≥ 21 J
Duritatea pe proba Jominy	57 – 65 HRC

Tabel 4.8. FISA DE MASURATORI

Nr. Crt	Caracteristica de verificat	ARC Ø 37 mm						Arc Ø 24.7 mm						
		Valoare prescrisa	Valoare masurata					Valoare prescrisa	Valoare masurata					
			Arc 1	Arc 2	Arc 3	Arc 4	Val medie		Arc 1	Arc 2	Arc 3	Arc 4	Val medie	
1	Inaltimea sub sarcina	$H_1 = 256 \pm 2$	256,3	255,8	256,7	255,9	256,1	-	-	-	-	-	-	
2	Inaltimea libera	$H_0 = 344$	345,1	345,6	344,9	345,3	345,2	$H_0 = 344$	345,3	345,9	344,5	345,6	345,1	
3	Flexibilitatea	$22,8 \pm 1$ daN/mm	21,55	21,84	21,32	21,78	21,2	$49,7 \pm 1$ daN/mm	49.6	48.9	50.1	50.4	49.7	
4	Duritatea	$HRC = 45^{+5}$	46.3	45.9	46.7	46.2	46,2	$HRC = 45^{+5}$	46.8	45.7	46.2	46.7	46.3	
5	Control magnetoscopic	Cf.anexa B UIC 822 0	corespunde					Cf.anexa B UIC 822 0	corespunde					
6	Elasticitate	Cf.2.233 UIC 822 O	corespunde					Cf.2.233 UIC 822 O	corespunde					
7	Dimensiuni	Diam exterior	-	-	-	-	-	$\varnothing = 181^{+1}_{-0.5}$	181.02	181.04	181	181.02	181.02	
		Diam interior	$187^{+1}_{-1.5}$ mm	corespunde					-	-	-	-	-	
		Abaterea la \perp	Max. 7,8 mm	< 7,8					Max. 7,8 mm	< 7,8				
		Abaterea la \parallel	Max. 4,8 mm <	< 4,8					Max. 4,8 mm <	< 4,8				

Trebuie specificat că este necesară o verificare riguroasă a calității suprafeței barelor, deoarece orice imperfecțiune poate fi generatoare de amorsă de fisură.

4.3.2. Tehnologia de înfășurare a arcurilor

Înfășurarea arcurilor pe dornul de înfășurare se execută după o încălzire prealabilă în cuptorul cu inducție SODALGO, apoi este urmată de ajustarea capetelor pe dornul de ajustare și corectarea eventualelor neconformități ale pasului arcului.

Pentru a scoate în evidență neuniformitatea pasului s-au efectuat măsurători pe un arc de probă de $\varnothing 24,7$ mm (fig. 4.7).

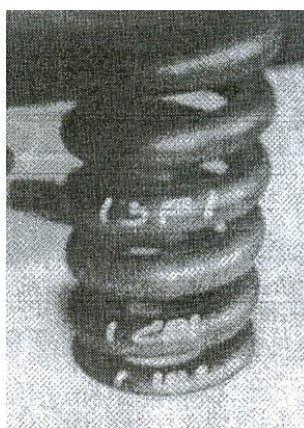


Fig. 4.7. Arc probă

Valorile distanței dintre spire măsurate pe 4 generatoare situate la distanțe egale sunt redată în tabelul 4.10.

Tabelul 4.10. Distanța dintre spirele active ale arcului

Direcția	Distanța între spire				
1	11.4	11.5	11.3	11.5	11.9
2	12.1	11.8	11.6	12.3	12.6
3	12.9	12.2	11.3	11.6	12.6
4	12.1	11.4	11.8	12.0	12.5

În urma înfășurării pe dornul de înfășurare, pot apărea urme imprimare pe fibra interioară a arcurilor creând posibilitatea apariției concentratorilor de tensiuni, fiind zona cea mai solicitată la comprimarea arcului.

La operația de ajustare pe dornul de ajustat, a spirei de capăt, prin batere cu ciocanul pot apărea neconformități care pot constitui amorse de rupere la oboseală.

Temperatura de deformare influențează structura oțelului care poate fi ușor modificată. În acest sens refacerea structurii se poate realiza printr-un tratament termic de normalizare în urma căruia se obține o structură apropiată de cea inițială.

4.3.3. Tratamentul termic de călire și revenire

Tehnologia actuală indică un tratament termic final aplicat arcurilor constând dintr-o călire+răcire în ulei urmată de o revenire medie. Parametrii tehnologici pentru cele două operații sunt în concordanță cu natura materialului și dimensiunile arcurilor studiate, fapt relevat și în diagramele înregistrate ale tratamentului termic de călire și revenire, efectuat pe linia discontinuă de tratament termic în atmosferă controlată (fig. 4.8 , fig. 4.9, fig.4.10, fig. 4.11)

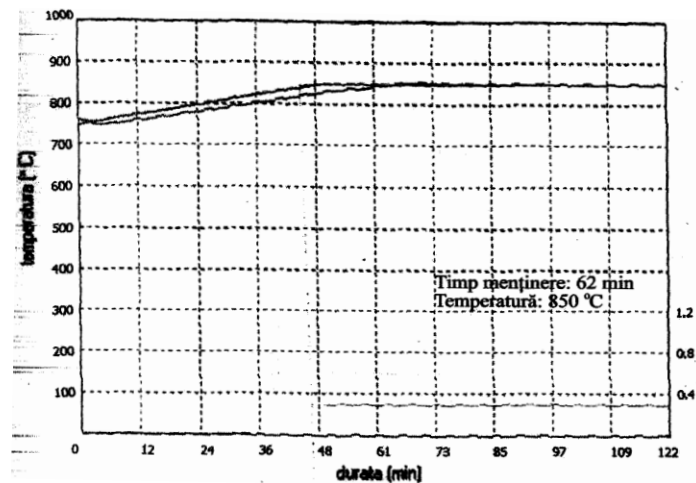


Fig. 4.8. Diagrama de călire pentru arc Ø 37 mm

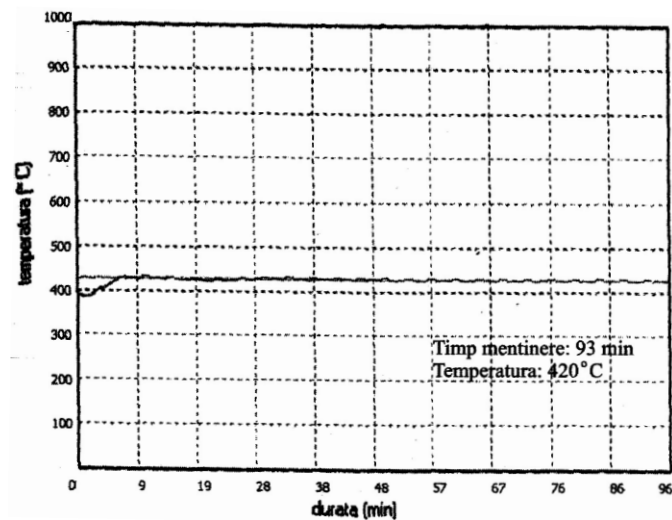


Fig. 4.9. Diagrama de revenire pentru arc Ø 37 mm

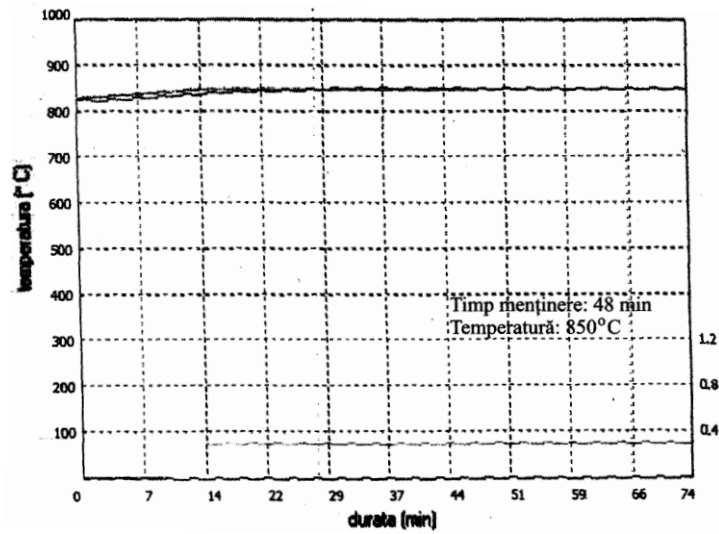


Fig. 4.10. Diagrama de călire pentru arc Ø 24.7 mm

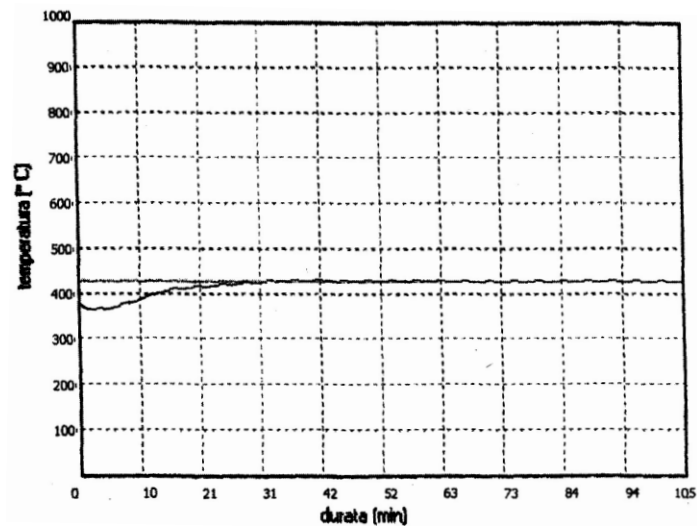


Fig. 4.11. Diagrama de revenire pentru arc Ø 24.7 mm

4.3.4. Ecrusarea

Tehnologia de fabricare a arcurilor elicoidale prevede, după fabricarea arcului aplicarea unei operații de ecrusare cu alice din oțel, într-o instalație SIESSON-LEHMANN (fig.4.12).

În acest sens controlul procesului se recomandă să fie făcut vizual și cu proba ALMEN, în conformitate cu norma UIC 822 O [93].

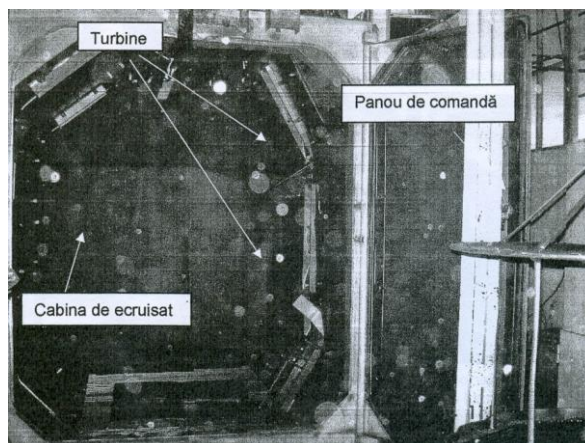


Fig. 4.12. Instalație de ecruisat cu alice din oțel SESSON-LEHMANN

În urma realizării operației de ecruisare, verificarea nu este concludentă datorită faptului că dispozitivul de susținere și deplasare a arcurilor nu poate permite o ecruisare uniformă a tuturor spirelor. De asemenea în timpul operației nu pot fi urmăriți toți factorii tehnologici care pot influența calitatea ecruisării : dimensiunea alicelor de oțel, viteza de aruncare.

4.4. Verificări efectuate în urma execuției arcurilor conform tehnologiei actuale.

4.4.1. Materiale

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

Rezultatele determinărilor de caracteristici și de compoziție chimică efectuate pe probele din bare utilizate la execuția loturilor de 5 arcuri, relevă încadrarea în limitele impuse pentru toate elementele analizate.

Analiza metalografică ne indică faptul că materialul în stare de livrare corespunde cerințelor (fig. 4.13)

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

4.4.2. Tratamentul termic al arcurilor

Tehnologia de execuție actuală prevede un tratament termic final al arcurilor care constă dintr-o călire urmată de o revenire medie. Parametrii tehnologici pentru cele două operații de tratament termic i-am stabilit în concordanță cu natura materialului și dimensiunile arcului, astfel :

- pentru arcul $\varnothing 37$ mm
 - călire : 830-890 °C/75 minute/ulei
 - revenire : 350-550 °C/110 minute/aer linistit

- pentru arcul \varnothing 24.7 mm
 - călire : 830-890 °C/75 minute/ulei
 - revenire : 350-550 °C/110 minute/aer linistit

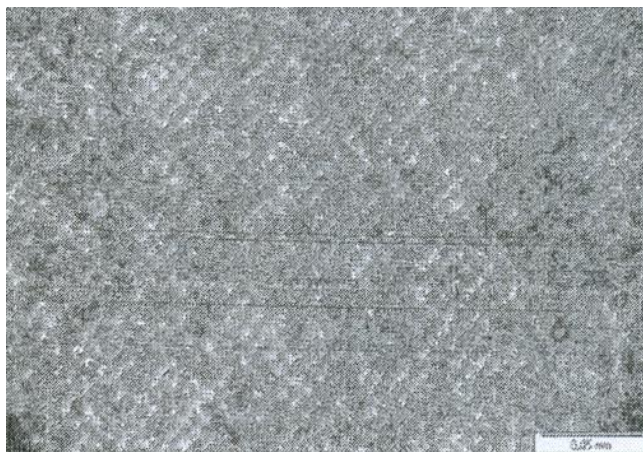


Fig. 4.13. Microstructura in stare de livrare

În urma analizei condițiilor concrete de tratament termic am constatat următoarele :

- temperatura cuptorului de călire este reglată la 880 °C, ceea ce ne indică faptul că temperatura pieselor este situată în intervalul de încălzire recomandat;
- temperatura de revenire este stabilită la 440 °C;
- Modul în care transportarea de la cuptorul de tratament termic la bazinul de răcire necesită un timp relativ mare, poate influența temperatura pieselor prin scăderea acestora până sub limita admisă, ceea ce poate influența negativ tratamentul termic, rezultând o călire incompletă.

În vederea testării durității arcurilor, din zona spirelor active s-au extras de la fiecare arc elicoidal, o macroprobă metalografică transversală, înaltă de 10-12 mm. Din aceste macroprobe s-a determinat distribuția durității Brinell peste secțiunea transversală, conform DIN EN ISO 6506-1 [90]. Testarea s-a efectuat cu câte trei amprente Rockwell, plasate astfel : în poziția 1 aflată la 2 mm sub suprafața arcului, în poziția 3 aflată în mijlocul suprafeței transversale și în poziția 2 tot timpul între cele doua poziții 1 și 3. La testarea durității au rezultat valorile din tabelul 4.11.

Tabel. 4.11. Valori ale durității măsurate pe arcurile de probă

Poziția	Duritatea HRC	
	Arc \varnothing 37 mm	Arc \varnothing 24.7 mm
1	46.4	47.9
2	47.2	47.2
3	45.6	46.8
Valoare medie	46.4	47.3
Valoare prescrisă	45 - 50	45 - 50

În concluzie, la testarea durtății pe arcuri, se observă că valoarea durtății în poziția 3 este mai mică decât cea din poziția 1 ceea ce ne indică faptul că bara arcului nu este îmbunătățită până la miez.

4.5. Concluzii

Tehnologia de fabricare a arcurilor elicoidale nu asigură o realizare completă a produsului finit, fiind necesare operații de ajustare a capetelor și pasului arcului.

Prelucrarea mecanică a capetelor arcului, conform tehnologiei actuale, prin aşchiere pe strung, conduce la apariția unor abateri mari de la paralelism și perpendicularitate (deformarea spirei sub acțiunea forței de aşchiere) rezultând astfel o creștere a tensiunilor în anumite zone ale arcului, existând riscul apariției unor amorse de fisuri.

O măsură de îmbunătățire a prelucrării capetelor arcului o reprezintă modificarea tehnologiei, în sensul executării printr-o operație de polizare. În acest mod prelucrarea se poate executa într-o singură operație, nemaifiind necesară finisarea.

Creșterea rezistenței la oboseală se poate realiza prin următoarele metode :

- controlul proprietăților și structurii să fie efectuat pe produs, nu numai pe probele martor pentru a putea evidenția cât mai precis influența procesului de deformare asupra structurii materialului;
- creșterea preciziei de înfășurare, având ca scop distribuirea cât mai uniformă a eforturilor în spirele arcului;
- utilizarea unor scule și dispozitive fără neuniformități care ar putea conduce la imprimarea acestora pe suprafața spirelor arcului;
- respectarea temperaturii minime la sfârșitul deformării în vederea evitării transformărilor structurale și apariției amorselor de fisuri;

Prin creșterea temperaturii de încălzire pentru deformarea plastică, structura materialului se modifică afectând proprietățile mecanice ale oțelului, în acest caz este necesară aplicarea unui tratament termic de normalizare având ca scop obținerea unei structuri apropiate de cea inițială.

CAPITOLUL 5

DETERMINAREA REGIMURILOR OPTIME DE TRATAMENT TERMIC ȘI A REZISTENȚEI LA OBOSEALĂ PENTRU ARCURILE ELICOIDALE CILINDRICE

5.1. Determinarea regimurilor optime de tratament termic

5.1.1. Noțiuni generale

Principala caracteristică mecanică pe care trebuie să o aibă arcurile pentru a corespunde la solicitări este limita de curgere, care trebuie să aibă valori superioare și trebuie să fie apropiată de valoarea rezistenței la rupere.

Datorită alternanței sensului solicitărilor, arcurile trebuie să prezinte o rezistență bună la oboseală, rezistență bună la temperaturi mari și în anumite cazuri, la coroziune [53],[36].

Funcție de forma lor și dimensiunile geometrice și de condițiile de solicitare, arcurile se execută din bare, benzi, table sau sârme din oțeluri carbon de calitate, oțeluri aliate cu crom, mangan, siliciu, vanadiu, molibden sau aliaje speciale pe baza de nichel.

Arcurile fabricate prin înfășurare la cald sunt supuse, după înfășurare unui tratament de călire urmată de revenire medie sau joasă pentru descompunerea parțială a martensitei și păstrarea unor valori relativ mai mari ale caracteristicilor de rezistență, plasticitate și tenacitate.

Parametrii tehnologici de tratament termic (viteza de încălzire, temperatura maximă de încălzire, timpul, menținerii la această temperatură și viteza de răcire) se stabilesc funcție de o serie de parametri, cei mai importanți fiind : compoziția chimică, starea structurală și de tensiuni a materialului înainte și după tratamentul termic,, forma, dimensiunile și destinația arcurilor, caracteristicile funcționale ale utilajelor [26].

Pentru a stabili tipul de tratament termic aplicat unui anumit tip de arc, se stabilesc între anumite limite valorice, numai o parte dintre parametri și anume : temperatura de încălzire pentru călire și revenire, durata menținerii la aceste temperaturi și viteza de răcire în raport cu viteza critică de răcire.

5.1.2. Testări de laborator

Optimizarea tratamentelor termice de călire și revenire ale arcurilor, sunt importante mai ales pentru comportarea lor în exploatare, luând în considerare solicitările mari și complexe la care sunt supuse.

Programul experimental s-a desfășurat pe probe de material furnizate de societatea constructoare de arcuri, din aceeași șarjă de material ca și cel utilizat în producția curentă. Determinarea parametrilor tehnologici s-a făcut conform normativelor de material de origine franceză, pe baza experienței existente în tratamentul materialelor similare, astfel s-a pornit de la următoarele informații ce rezultă din analiza documentelor puse la dispoziție :

5.1.3. Tratamentul termic de călire

Duritatea după călire constatată pe probe martor este mai mică decât cea prevăzută pentru acest gen de materiale (56-63 HRC după proba Jominy), fapt care poate fi pus pe seama unei ușoare abateri de la situația optimă. Duritatea mai mică poate determina o rezistență mecanică mai scăzută, fapt care impune efectuarea unui tratament termic de revenire cu durată sau temperatura mai scăzute, ceea ce determină reducerea capacității portante a arcului. Din aceasta cauză se consideră necesară optimizarea tratamentului de călire.

Pentru determinarea temperaturii optime de călire s-a apelat la metoda călirilor succesive în intervalul 820-880 °C, efectuate pe 8 probe, în condiții de laborator, rezultatele verificărilor de duritate (56 – 63 după proba Jominy) fiind consemnate în tabelul 5.1. și diagrama din figura 5.1.

Tabel 5.1. Valorile de duritate ale probelor călite experimental la diferite temperaturi

Nr. crt	T _{inc} °C	T _{cuptor} °C	t _{inc} min	Mediu calire	Duritatea călire HRC	Duritatea medie HRC
1	820	840	30	ulei	51.7;52.5;51.9;52.7	52.2
2	830	850	30		52.9;53.1;53.5;54.1	53.4
3	840	860	30		55.5;54.8;54.0;55.1	54.8
4	850	870	30		55.9;55.7;56.2;56.5	56.8
5	855	875	30		56.1;56.8;57.0;56.5	56.6
6	860	880	30		57.4;57.9;58.1;57.6	57.7
7	865	885	30		57.7;58.0;58.6;58.4	58.1
8	870	890	30		58.5;58.9;59.5;59.7	59.1

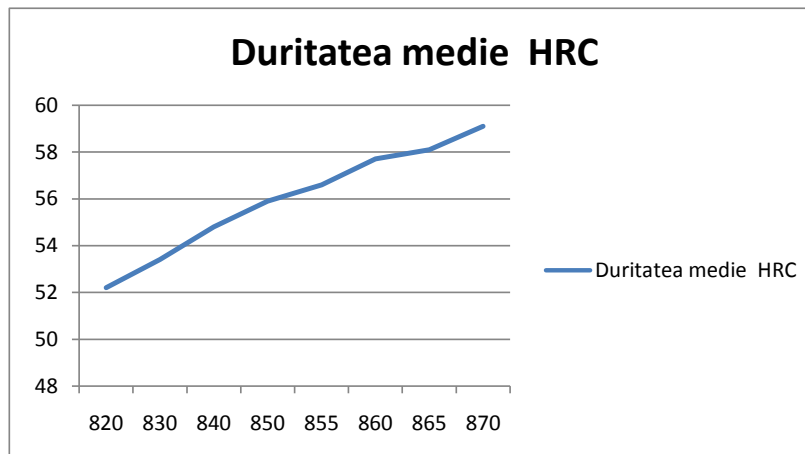


Fig. 5.1.. Variația durtății în funcție de temperatura de călire

În urma analizei rezultatelor obținute, au fost considerați optimi următorii parametri :

- temperatura de călire $T_{inc} = 860 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- temperatura cuptorului $T_{cuptor} = 880 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- durata de încălzire $t_{inc} = 30 \text{ minute}$

Pentru verificarea corectitudinii opțiunii alese, a fost călit experimental în condiții de laborator un lot de 8 probe, la parametrii de mai sus, rezultatele verificărilor de duritate măsurate în câte 4 puncte pe fiecare probă, fiind consemnate în tabelul 5.2.

Tabel 5.2. Valorile de duritate ale probelor călite experimental la temperatura de călire considerată optimă

Nr. crt	T_{inc} °C	T_{cuptor} °C	t_{inc} min	Mediu călire	Duritatea călire HRC	Duritatea medie HRC
1	860	880	30	ulei	57.8;58.5;58.9;57.7	58.2
2	860	880	30		58.9;58.1;57.5;59.1	58.4
3	860	880	30		58.5;57.8;58.0;59.1	58.3
4	860	880	30		57.9;58.7;58.2;59.5	58.5
5	860	880	30		58.1;58.8;58.0;58.5	58.6
6	860	880	30		58.4;57.9;59.1;58.6	58.5
7	860	880	30		58.7;59.0;58.6;58.4	58.6
8	860	880	30		58.5;58.7;59.2;59.3	58.9

În concluzie constatăm următoarele :

- parametrii propuși permit realizarea unei durtăți de valori ridicate, în jur de 58 HRC, fapt care confirmă datele din normativele de material;
- din rezultatele reprezentate în tabelul 5.2. constatăm că valorile de duritate sunt uniforme, practic plaja rezultatelor atât la aceeași probă cât și la probe diferite, fiind în intervalul de precizie al aparatului de măsurat. Acest lucru ne indică faptul că din punct de vedere al compoziției, materialul folosit este corespunzător.

- rezultatele diferite ale durităților pe probele martor efectuate în secția de tratamente termice a societății sunt influențate, probabil de o răcire prematură care survine la deplasarea dintre cuptor și baia de răcire.
- trebuie menționat faptul că la încălzirea în șarja de 10 arcuri, durata de încălzire a cuptorului este de 75 minute, o prelungire peste optim a duratei de încălzire nefiind dăunătoare la încălzirea în atmosferă controlată.
- Datorită acestor aspecte, se recomandă ca reglarea cuptorului de tratament termic să se facă la temperaturi cu valori mai mari decât cele folosite anterior, adică la 880 °C sau chiar 890 °C și este recomandată reducerea duratei de deplasare dintre cuptorul de tratament termic și baia de răcire în ulei.

5.1.4. Tratamentul termic de revenire

Tratamentul termic de revenire are ca scop îmbunătățirea comportării la solicitări variabile (șocuri, oboseală, etc). Regimul optim de revenire corespunzător unei anumite durități prescrise, se poate face prin adoptarea a diverse perechi de valori temperatură – timp.

La solicitări dinamice sunt indicate durate mai scurte de timp și temperaturi mai ridicate deoarece dau structuri mai fine, cu tenacitate mai mare.

Parametrii tratamentului termic de revenire sunt puternic influențați de condițiile concrete de încălzire (mărimea și forma șarjei, recircularea aerului în interiorul cuptorului), rezultând ușoare abateri față de condițiile de laborator.

Pentru determinarea temperaturii optime de revenire s-a folosit metoda încălzirilor succesive, în intervalul 350-550 °C, efectuate pe 5 probe, timp de 1 oră, în condiții de laborator.

Duritățile măsurate, după revenire, și variația acestora funcție de temperatură sunt prezentate în tabelul 5.3. și figura 5.2.

După cum observăm în diagrama din figura 5.2. zona optimă pentru realizarea unei durități prescrise se întinde pe intervalul de temperatură 400-450 °C, care va produce durități finale între 45 și 50 HRC.

Acest interval de temperatură și de duritate, relativ mare, face posibilă adoptarea a două strategii de abordare a producerii unor arcuri cu o rezistență la oboseală acceptabilă din punct de vedere al încercărilor impuse.

Tabelul 5.3. Valorile experimentale de duritate ale probelor revenite la diferite temperaturi

Nr. Crt.	T _{rev.} [°C]	t _{min} [min]	Duritate revenire [HRC]	Duritate medie [HRC]
1	350	60	54.8;53.1;53.6;54.2	53.9
2	400	60	52.6;53.1;52.8;51.5;	52.5
3	450	60	49.1;48.5;47.3;46.2	47.7
4	500	60	45.8;44.6;42.1;42.3	43.7
5	550	60	39.8;40.1;41.0;39.2;	40.0

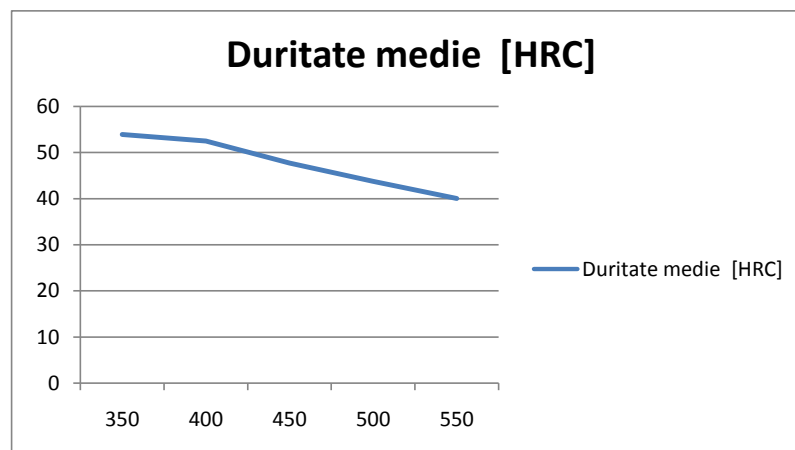


Fig. 5.2. Variația durității în funcție de temperatura de revenire

1. O posibilă cauză a rezistenței insuficiente la oboseală, o constituie 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 arcurile cu solicitări mari la oboseală, unde se aplică tratamente de suprafață destinate reducerii probabilităților de apariție a microfisurilor, o duritate mai redusă face ca ecrisarea să fie mai puternică rezultând un tratament superficial mai semnificativ.

2. Dacă arcul este suprasolicitat din punct de vedere al caracteristicilor de rezistență sau în imediata apropiere a zonei de solicitare maximă pentru solicitările de oboseală, este indicată maximizarea proprietăților mecanice ale materialului, iar duritățile să aibe valori maxime (spre 50 HRC). Îmbunătățirea condițiilor de suprafață prin ecrisare, în acest caz trebuie optimizate datorită valorilor mari ale durității arcului.

5.2. Rezistența la oboseală și determinarea ei

Rezistența la oboseală este mărimea caracteristică a stării limită folosită în calculele de oboseală [39],[54].

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 încovoiere, întindere-compresiune, torsiune [69],[58],[91]. Pentru determinarea rezistenței la oboseală a materialelor trebuie să ținem cont de următoarele indicații [36],[29]:

Rezistența la oboseală nu mai este o mărime unitară, ci poate lua o infinitate de valori, funcție de o serie de factori. Urmare acestui lucru, proiectarea de rezistență nu se poate limita la simpla aplicare a unor relații de dimensionare sau verificare ci 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. Astfel calculul la oboseală este doar un calcul de rezistență și mai multe tratate de rezistența materialelor nu cuprind acest calcul, fiind studiat separat, în funcție de toți factorii care îl condiționează, [36],[68].

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 [18],[22],[36].

5.3. Definiții, simboluri

Cel mai simplu mod de variație a solicitărilor într-o piesă pe masină este reprezentat în fig. 5.1. Pe orizontală se măsoară timpul, iar pe verticală mărimile caracteristice ale solicitărilor : forțe sau cupluri exterioare (N , T , M_i , M_t) sau tensiuni (σ , τ). Așa cum se observă în fig. 5.1. în decursul unei perioade ABCDE, totalitatea valorilor pe care le ia tensiunea formează un ciclu de solicitare variabilă.

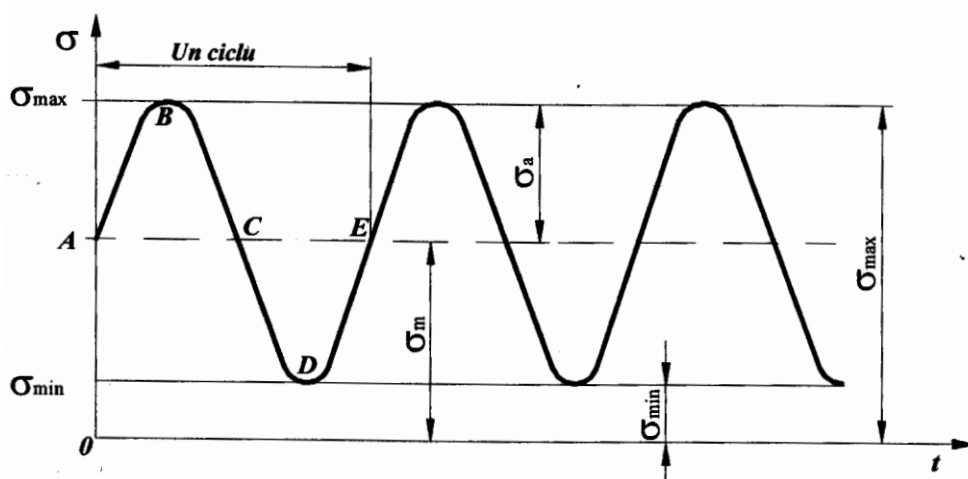


Fig. 5.3. Ciclu de solicitare variabila

Luând în considerare că în general frecvența nu are importanță, ciclul de solicitare variabilă poate fi definit prin :

-tensiunea maximă σ_{\max} și tensiunea minimă σ_{\min} , sau prin :

-tensiunea medie σ_m și amplitudinea tensiunii σ_a definite prin relațiile :

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}; \sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad (5.1)$$

$$\text{Este evident că : } \sigma_{\max} = \sigma_m + \sigma_a; \sigma_{\min} = \sigma_m - \sigma_a \quad (5.2)$$

Relațiile (5.1) și (5.2) sunt valabile indiferent de semnele algebrice ale mărimilor respective.

Definim coeficientul de asimetrie al ciclului de solicitare variabilă, ca fiind :

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad (5.3)$$

Dacă pe toata durata de aplicare a solicitării variabile, tensiunile variază între aceleași valori, se spune că ciclurile sunt staționare. Majoritatea studiilor care s-au efectuat până în prezent asupra solicitărilor variabile se referă la solicitări prin cicluri staționare.

După valorile și semnele coeficientului de asimetrie R și după valorile și semnele algebrice pe care le au limitele σ_{\max} , respectiv σ_{\min} , putem distinge mai multe tipuri de cicluri, după cum urmează :

- ciclu simetric care are $R = -1$; $\sigma_{\max} = -\sigma_{\min}$; $\sigma_m = 0$; $\sigma_a = \sigma_{\max}$;
- cicluri asimetrice sunt toate celelalte cicluri, care au $R \neq -1$;
- ciclurile oscilante sunt ciclurile ale căror tensiuni rămân de același semn, și ele pot fi oscilante pozitive sau oscilante negative după cum ne indică semnul;
- ciclurile pulsante reprezintă cazurile limită de cicluri pulsante la care una din valorile extreme ale tensiunii se anulează. Acestea pot fi cicluri pulsante pozitive care au $R = 0$ și pulsante negative la care $R = +1$;
- cicluri alternante la care tensiunile schimbă semnul. Acestea au un coeficient de asimetrie negativ. Cel mai important din punct de vedere teoretic și practic, îl reprezintă ciclul alternant simetric care are $R = -1$.

5.4. Clasificarea mașinilor de încercare la oboseală

Mașinile de încercare sunt realizate în următoarele variante constructive :

- mașini mecanice acționate cu excentric, cu șurub de forță, cu axe sau mase în mișcare de rotație;
- mașini hidraulice sau electrohidraulice;
- mașini electromagnetice sau cu acționare magnetică.

Funcție de soluția constructivă a mașinii de încercare sau a dispozitivelor folosite pentru aplicarea sarcinii, solicitarea epruvetelor poate fi axială, de încovoiere, de torsiune. [39]

Capacitățile de încărcare a mașinilor enumerate nu depășesc, de regulă 500 kN, iar frecvențele de lucru sunt până la 150 Hz [1],[16],[36].

Echipamentele conexe ale mașinilor de încercare la oboseală sunt :

- Sistem de control al 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. În cursul încercării, valorile caracteristice ale mărimii controlate trebuie menținute constante, cu o abatere, pe cât posibil până la 2 % din domeniul de operare al mașinii;
- Contor de cicluri pentru menținerea și indicarea numărului de cicluri de solicitare aplicate.

La încercările prin solicitări axiale în domeniul durabilităților mici, mai sunt necesare următoarele echipamente :

- tensometre pentru măsurarea în regim dinamic a deformației specifice din zona calibrată a epruvetei. Tensometrele pot fi de tip electromecanic cu traductoare inductive sau tensometre optice. La epruvetele cu zona calibrată de secțiune constantă tensometrul este de tip axial și la epruvetele cu zona calibrată toroidal tensometrul este de tip transversal;

- sistem de înregistrare în două coordonate, utilizat pentru înregistrarea, de exemplu, a buclei de histerezis forță-deplasare sau tensiune-deformație specifică;

- sistem integrat de conducere a încercării cu asigurarea amplitudinii constante a deformației specifice la epruvete cu zona calibrată de formă toroidală.

O posibilă clasificare a mașinilor de încercare la oboseală în funcție de caracterul determinant sau aleator al solicitării este prezentată în tabelul 5.4.

Tabelul 5.4.

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
		Încercări cu amplitudine constantă {Wöhler}	Solicitări aleatoare după înregistrare
			Încercări de durabilitate

În tabelul 5.5. se prezintă o clasificare mixtă, luând drept criterii felul solicitării și principiul constructiv de realizare a solicitării variabile.

5.5. Clasificarea metodelor de încercare

Scopul încercărilor la oboseală este de a furniza date pentru o apreciere cantitativă a influenței factorilor de solicitare, a factorilor de material și de execuție, precum și a factorilor de mediu [36],[72],[5],[29].

Analiza experimentală a influenței solicitărilor variabile asupra rezistenței probelor 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 pecifice scopului urmărit.

Tipurile de încercări la oboseală întâlnite în laboratoarele de încercări, cunosc o diversificare continuă. O clasificare a tipurilor de încercare funcție de modul de solicitare, metoda de efectuare a încercării și tipul caracteristicilor determinate este prezentată în tabelul 5.6. cu următoarele precizări :

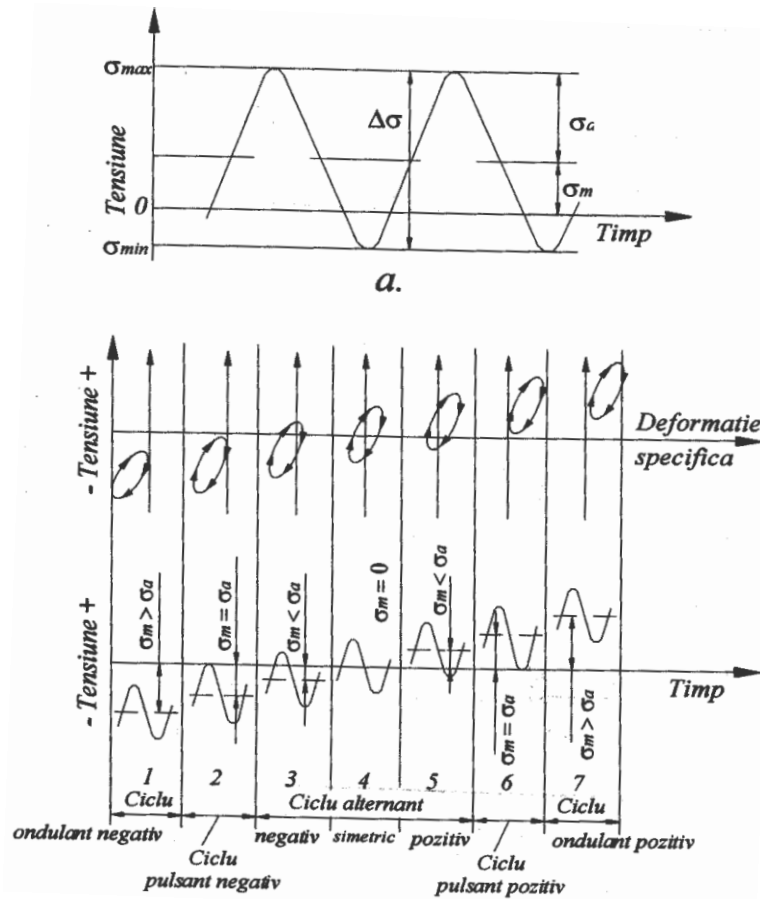
-încercările în domeniul durabilităților mari se execută în condiții de solicitări variabile în cursul cărora se dezvoltă deformații specifice mici, preponderent elastice. Datorită acestui fapt sunt conduse prin controlul tensiunii aplicate epruvetei. Acestea urmăresc, după caz, cunoașterea limitei de oboseală sau a rezistenței la durabilitate limitată.

Tabelul 5.5.

Nr. crt.	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 pârgii
		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

Tabelul 5.6.

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 concentratori	Întindere-întindere Întindere-compresiune Încovoiere plană Încovoiere rotativă Torsiune	Încercări cu amplitudine constantă : - metoda clasică - metode statistice Încercări cu amplitudine variabilă	Limite 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	Încercări cu amplitudine constantă	Diagrama $\sigma - \varepsilon$ ciclică Rezistența la durabilitate limitată
Încercări pentru determinarea vitezei la rupere a fisurii în condiții de solicitări ciclice	Întindere excentrică (stare plană de deformare) Întindere-întindere	Încercări de amplitudine constantă	Viteza de creștere a fisurii în domeniul valorilor de peste 10^{-8} m/ciclu



σ_m	>0	$\frac{1}{2}\sigma_{\max}$	>0	0	<0	$\frac{1}{2}\sigma_{\min}$	<0
σ_a	$=0$	$\frac{1}{2}\sigma_{\max}$	$\neq 0$	σ_{\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. 5.4. Diagramele tensiune-deformație specifică și tensiune-timp

- Încercările în domeniul durabilităților mici se execută în condiții în care componenta plastică a deformației specifice este importantă. De regulă, aceste încercări 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.

- 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, fiind 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 reduce numărul de variabile care intervin în încercare și simplifică interpretarea rezultatelor.

În fig.5.4. 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 [36].

Încercările la oboseală se execută, de regulă, în condiții standard ale mediului ambiant. În cazul în care condițiile diferă de cele standard, tehnica de încercare este stabilită în concordanță cu particularitățile programului de testare.

5.6. Comportarea la oboseală a arcurilor elicoidale cilindrice

5.6.1. Arcul elicoidal de secțiune $\varnothing 24.7$ mm

În vederea verificării tehnologiei de fabricație și a tratamentelor termice aplicate am supus încercării la oboseală un set de arcuri cu scopul de a depista cauzele ruperilor în exploatare. Obiectivul impus de cercetare, este de a realiza arcuri a căror rezistență la oboseală să fie la nivelul prevăzut de cerințe (4000000 cicluri în trei regimuri de încercare), cerința ce asigură o rezistență la oboseală optimă în exploatare.

Setul de arcuri are caracteristicile mecanice ce indică valori ale limitei de curgere de 1489-1551N/mm² (față de min. 1400 N/ mm² prescris) și valori ale alungirii la rupere de 10.8-12.8% (față de min. 8.6 % admis). Diametrele inițiale ale barelor au valori de 24.63-24.76 mm încadrându-se în intervalul prescris (24.7±0.1 mm).

Au fost efectuate încercări la oboseală, rezultatele fiind cele din tabelul 5.7.

Tabelul 5.7.

Nr. crt	Numărul arcului	Numărul de cicluri după care s-a rupt
1	7	357.000
2	9	545.000
3	4	250.000
4	6	3.192.000

Tabelul 5.8.

Nr. crt	Numărul arcului	Numărul de cicluri după care s-a rupt
1	9	368.000
2	7 bis	530.000
3	17	250.000
4	7	3.192.000
5	10	3.192.000

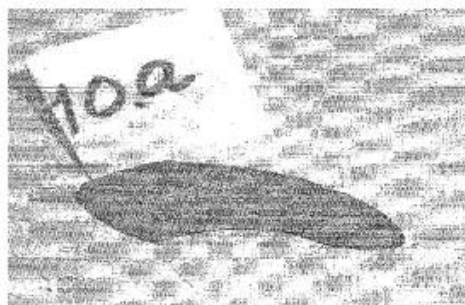
Probele au fost prelevate din arcuri care provin din mai multe loturi de fabricație, numărul de cicluri suportat de fiecare arc înainte de rupere este prezentat în tabelul 5.8.

Analizând probele din tabel concluzionăm că ruperea se produce fie în spirele de capăt (probele 7 și 9} fie în spirele active ale arcului (17 și 10).

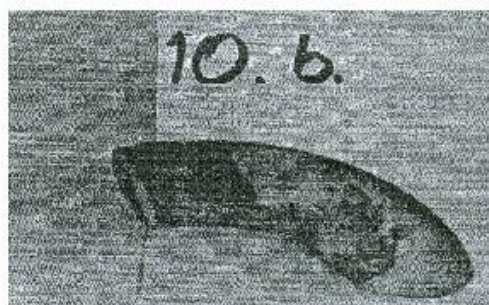
Pentru a aprecia cauzele ruperii s-a urmărit determinarea cauzelor în care s-a produs ruperea.

Valoarea redusă a rezistenței la oboseală, zonele diferite de rupere, diferențierea semnificativă a rezultatelor, conduc la ipoteza că ruperea prematură în timpul încercării la oboseală este influențată de mai multi factori care acționează separat sau simultan, factori care vizează dimensiunile, forma geometrică a arcului, starea suprafeței (rugozitate datorată ecruisării cu alicie de oțel, imprimări pe suprafață apărute în timpul deformării plastice), tensiunilor interne.

Pentru a obține date suplimentare am procedat la efectuarea analizei prin microscopie optică și microscopie electronică prin baleiaj, a suprafețelor de rupere a unui număr de probe din arc, astfel :

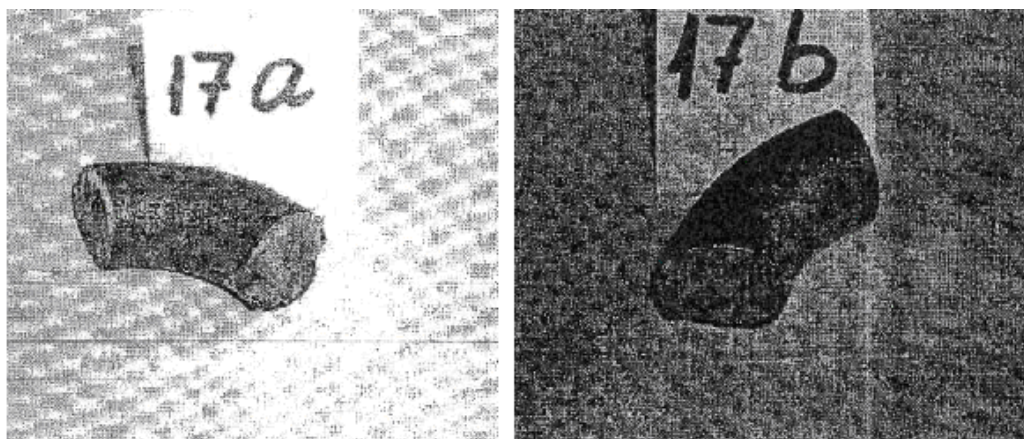


a)



b)

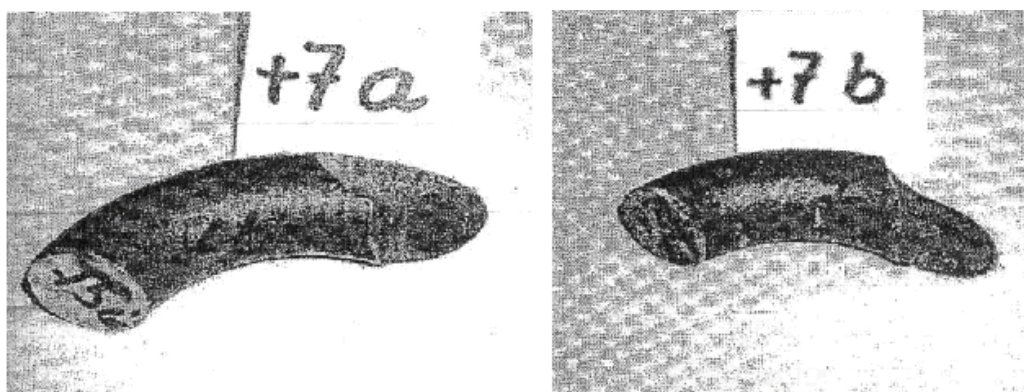
Fig. 5.5. Probe din arcul 10



a)

b)

Fig. 5.6. Probe din arcul 17



a)

b)

Fig. 5.7. Probe din arcul 7 bis (+7)

După modul în care s-a amorsat fisura, probele examinate pot fi grupate în trei categorii :

- probe în care fisura s-a amorsat în fibra interioară a spirei (probele din fig. 5.7. și fig. 5.5.), unde fibra este cea mai intens solicitată la compresiune, amorsa de rupere fiind exemplificată în fig. 5.6. și este generată de existența urmelor provocate în timpul înfășurării pe dornul de înfășurare.

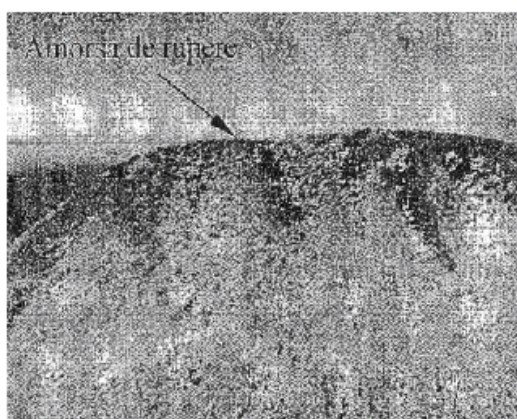


Fig. 5.8. Rupere amorsată pe fibra interioara



Fig. 5.9. Microstructura suprafefi de rupere

- probe în care fisura s-a amorsat pe suprafața de așezare ca urmare a solicitării la încovoiere a spirei de capăt (arcurile 7 și 9).
- probe în care fisura s-a amorsat într-o zonă diferită de fibra interioară a spirei, unde există posibilitatea apariției unei microfisuri provocată de alicele de oțel (probele din fig. 5.6.) care se constată că s-au rupt după un număr de 250000 cicluri la încercarea la oboseală, structura macroscopică fiind ilustrată în fig 5.10.



Fig. 5.10. Rupere prin oboseală-macrostructura

Modul de amorsare a fisurii în zona stratului superficial ecruisat excesiv, a fost evidențiat prin folosirea microscopiei electronice (fig. 5.11.). Tot prin această metodă a fost evidențiată pe aceeași probă, o zonă în care fisura se propagă dinspre suprafață înspre interior (fig. 5.10.).

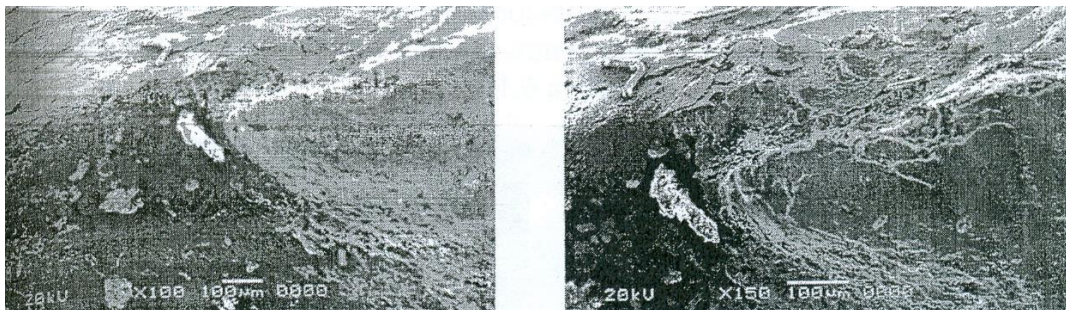


Fig. 5.11. Fisura amorsata in stratul ecruisat

În procesul de execuție al arcurilor elicoidale, în suprafață se introduc tensiuni remanente : la exteriorul barei tensiuni de întindere iar în interiorul barei tensiuni de compresiune. Acestea asociate cu o posibilă amorsă de fisură pot duce la ruperea prematură a arcurilor în exploatare. În scopul eliminării acestui neajuns arcurile sunt supuse unui tratament de ecruisare care se execută, de regulă, cu alice de oțel.

5.6.2. Verificarea eficacității ecruisării

Ecruisarea arcurilor elicoidale pentru vehiculele feroviare trebuie executată cât mai uniform și în așa fel, încât să satisfacă prescripțiile anexei 1 din UIC 822 O.

Controlul eficacității ecruisării a fost făcut prin metoda ALMEN și s-a luat în considerare o epruvetă din oțel laminat la rece cu următoarea

compoziție chimică : C = 0.49-56%; Si = 0.20-0.50%; Mn=0.70-0.90%; P≤0.035%; S≤0.035%; -duritatea 45-50 HRC; -lungimea 76.2±0.4; lățimea 19±0.05; grosime 1.3±0.02; planeitate ± 0.05 m și port-epruveta cu duritate 63-65 HRC.

Epruveta este supusă aceluiași ciclu de ecruisare ca și arcurile, respectându-se următorii parametrii :

- viteza de circulație a arcurilor în instalația de ecruisare;
- viteza de proiectare a alicelor;
- natura și dimensiunile alicelor.

Măsurătorile constau în determinarea curburii ALMEN, eficacitatea ecruisării fiind considerată corespunzătoare, dacă deformația epruvetei ALMEN este cuprinsă între 0.4 mm și 0.5 mm.

5.6.3. Analiza tehnologiei actuale

Operația de ecruisare se aplică arcurilor după efectuarea tratamentului de călire și revenire cu scopul de a mări rezistența la oboseală. Experiența ne-a demonstrat că ecruisarea poate mări rezistența la oboseală până la 10 – 15 % față de cazul arcurilor neecruisate.

Tehnologia actuală de fabricație a arcurilor elicoidale prevede efectuarea operației de ecruisare, cu bile de oțel într-o instalație "SIESSON-LEHMANN". La efectuarea operației se folosește o singură probă ALMEN, montată pe o portepruvetă fixată cu un arc "martor" așa cum reiese din fig 5.12. și care se ecruisează odată cu loturile de arcuri.

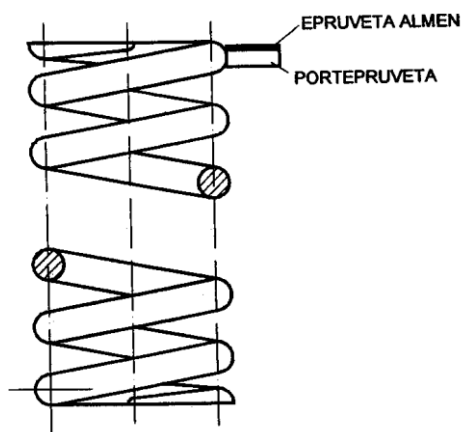
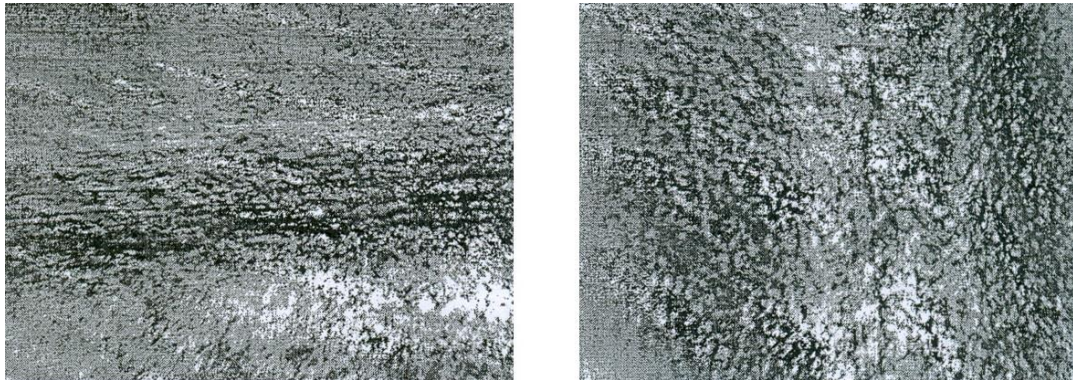


Fig. 5.12. Arc "martor" cu epruveta ALMEN

În urma efectuării operației de ecruisare s-au desprins următoarele aspecte :

- folosirea unei singure epruvete nu poate determina eficacitatea ecruisării în toate zonele arcului;
- în timpul operației de ecruisare nu pot fi urmăriți toți factorii tehnologici (viteza de aruncare a bilelor, dimensiunea lor) care pot influența procesul de ecruisare. Acest lucru este relevat prin compararea a doua suprafețe ecruisate, ex din fig. 5.13.



a) proba 10

b) proba 17

Fig. 5.13. Aspectul macroscopic al suprafețelor ecruisate

Măsurătorile de rugozitate pentru cele două suprafețe din fig.5.13. indică o diferență între cele două probe ($R_a = 4.5 - 6.5$ la proba 10 și $R_a = 6.3 - 10.1$ la proba 17).

- dispozitivul de susținere și deplasare a arcurilor nu poate permite o ecruisare uniformă a tuturor spirelor, de asemenea nu se efectuează ecruisarea suprafețelor de așezare ale arcurilor, ceea ce conduce la amorsarea fisurilor în spirele de capăt.

Îmbunătățirea procesului actual de ecruisare se poate face prin amplasarea mai multor epruvete ALMEN fixate pe portepruvete în diferite zone ale arcului așa cum este arătat în fig.5.14., putându-se aprecia gradul de ecruisare în toate zonele arcului.

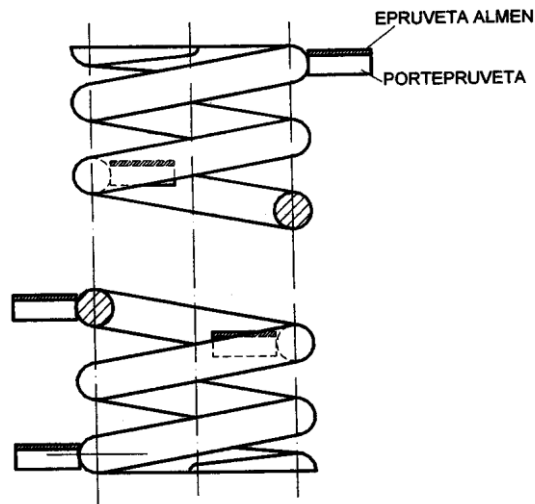


Fig. 5.14. Arc "martor" cu epruveta ALMEN

O metodă nouă de îmbunătățire a rezistenței la oboseală este realizarea unui tratament, care constă în ecruisarea cu bile la cald ($250 - 300\text{ }^{\circ}\text{C}$), aplicată ulterior ecruisării cu bile la rece, corespunzătoare schemei clasice de tratament. Rezultatele obținute în acest caz indică o creștere a rezistenței la oboseală aproape dublă față de varianta clasică de obținere a arcurilor.

5.6.4. Verificarea experimentală a procesului de ecruisare

Pentru a pune în evidență efectul ecruisării asupra proprietăților mecanice ale materialului de arc, s-au extras din 6 bare de material, 12 probe care au fost supuse tratamentului termic de călire și revenire. S-au ales aleator 6 probe care s-au supus procesului de ecruisare. Deoarece gradul de ecruisare depinde direct de durata de acțiune a jetului de alică de oțel asupra probelor, această operație a fost făcută la timpi diferiți : 5, 10 și 15 minute. S-au verificat caracteristicile mecanice (rezistența la rupere σ_r și limita de curgere σ_c) în starea călit + revenit. La celelalte 6 probe s-au verificat aceleași caracteristici în starea călit + revenit + ecruisat. Rezultatele verificărilor s-au relevat în tabelul 5.9. și figurile 5.15. până la 5.20.

Tabel 5.9. Caracteristici mecanice obținute pe probe ecruisate

Nr. proba	σ_r c + r	σ_r c + r + e			σ_r c + r	σ_r c + r + e		
		5 min	10 min	15 min		5 min	10 min	15 min
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
media	1481	1525	1580	1534	1372	1439	1497	1465

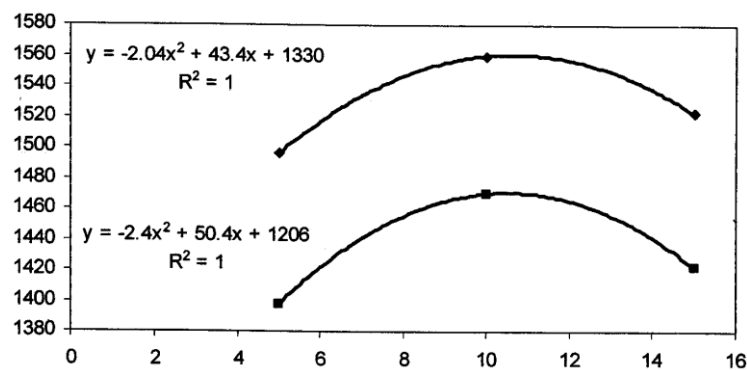


Fig. 5.15. Variația caracteristicilor mecanice în funcție de durata de ecruisare pentru proba 1

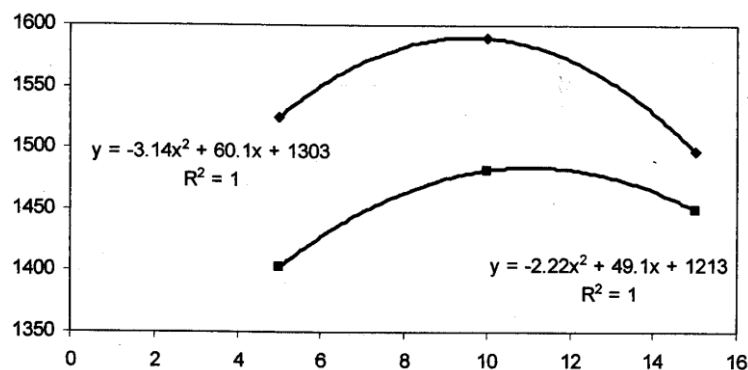


Fig. 5.16. Variația caracteristicilor mecanice în funcție de durata de ecruisare pentru proba 2

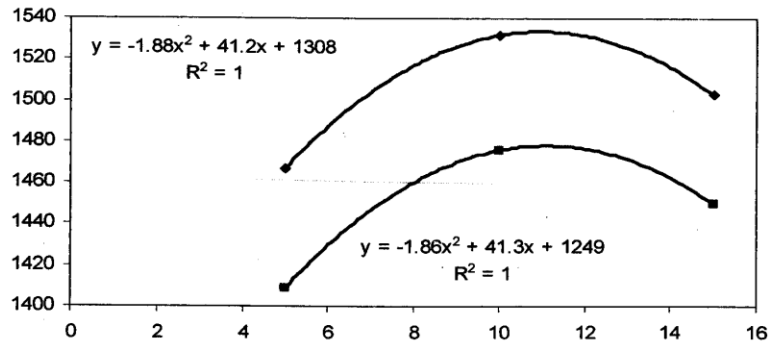


Fig. 5.17. Variația caracteristicilor mecanice în funcție de dutata de ecrusare pentru proba 3

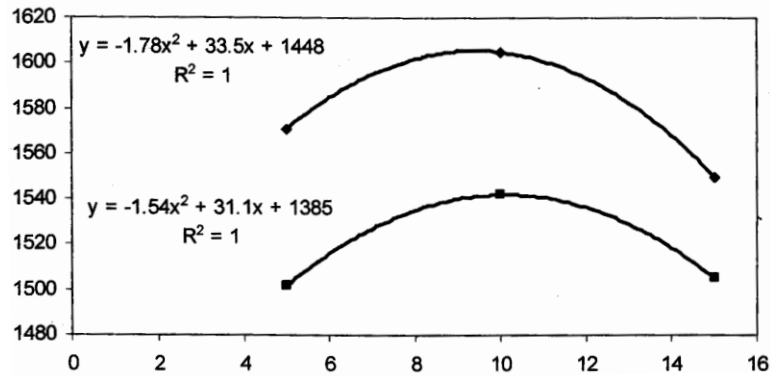


Fig. 5.18. Variația caracteristicilor mecanice în funcție de dutata de ecrusare pentru proba 4

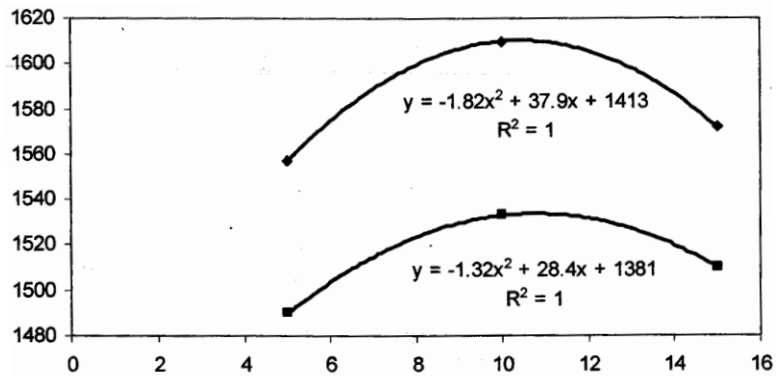


Fig. 5.19. Variația caracteristicilor mecanice în funcție de dutata de ecrusare pentru proba 5

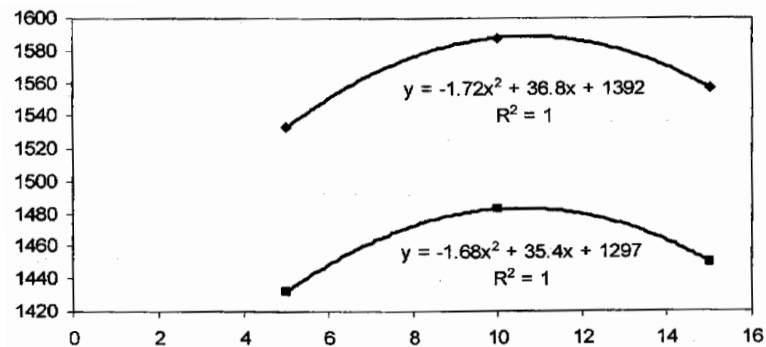


Fig. 5.20. Variația caracteristicilor mecanice în funcție de dutata de ecrusare pentru proba 6

Din rezultatele obținute durata optimă de ecuisare pentru obținerea celor mai bune caracteristici la arcurile analizate este de 10 minute. La o durată mai mare de timp scad caracteristicile mecanice ale materialului rezultând apariția fisurilor de suprafață.

5.7. Concluzii

În urma cercetării efectuate am constatat următoarele :

- cu parametrii din tehnologia actuală de tratament termic de călire s-a constatat că duritatea este mai mică decât cea preconizată;
- valorile diferite ale durităților pe probe martor efectuate în atelierul societății se datorează probabil unei răcirii premature la deplasarea între cuptor și baie;
- Pentru îmbunătățirea tratamentului termic de călire și determinarea temperaturii optime de călire am folosit metoda călirilor succesive în intervalul 820 - 880 °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

La acești parametrii am obținut o duritate mai ridicată iar valorile acestor durități au fost în intervalul de precizie al aparatului de măsurat.

Pentru determinarea temperaturii optime de revenire s-a apelat la metoda încălzirilor succesive în intervalul de temperatură 350 – 550 °C, efectuate pe 5 probe în condiții de laborator. Am concluzionat că intervalul care produce durități finale între 45 – 50 HRC este intervalul de temperatură 400 – 450 °C.

În cazul realizării unei căliri optime, trebuie să se adopte un tratament termic de revenire în jurul valorii de 450 °C/h cu răcire în aer. Această măsură alături de procesul de ecuisare cu alicie de oțel, vor avea ca efect pregătirea superioară a suprafeței și îmbunătățirea comportării la oboseală.

La efectuarea încercărilor la oboseală am constatat următoarele :

- ruperea datorită 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;
- factori ca: variații ale dimensiunilor formei geometrice a arcului, starea suprafeței (rugozitate datorată ecuisării cu bile, imprimări pe suprafață datorate deformării plastice la cald sau în timpul încălzirii datorită contactului punctiform în zona spirelor de capăt) și nivelul tensiunilor interne pot fi cauze care conduc la ruperea prematură la oboseală.

Din analiza suprafețelor de rupere rezultă :

- fisura se poate amorsa în fibra interioară a spirei ce prezintă neuniformități provocate de dorn la realizarea arcului;

-microfisuri provocate de alicele de oțel în timpul tratamentului de ecruisare, care pot deveni amorse de fisură și conduc la scăderea rezistenței la oboseală.

O metodă pentru creșterea rezistenței la oboseală este aplicarea unui tratament termic de ecruisare cu bile (alice de oțel) în condiții riguros determinate.

Necesitatea utilizării căilor de eliminare a microfisurilor în procesul de ecruisare impune ca :

- arcurile să aibă durități medii față de valoarea maxim acceptată (50 HRC);

- materialul alicelor să nu prezinte durități exagerate;

- diametrul bilelor să nu fie prea mare, bilele să fie sortate, fără muchii, ciupituri sau alte deșeuri;

- presiunea de aruncare a alicelor să fie redusă, în cazul apariției microfisurilor.

Îmbunătățirea procesului de ecruisare, practicat la ora actuală se poate face prin următoarele propuneri :

- trebuie folosite mai multe epruvete ALMEN care să fie amplasate în zone diferite ale arcului, astfel va rezulta o precizie superioară a gradului de ecruisare.

- introducerea unei operații suplimentare de ecruisare la cald, după executarea operației de ecruisare la rece, operație în urma căreia s-a constatat o creștere semnificativă a rezistenței la oboseală.

CAPITOLUL 6

ÎNCERCĂRI SPECIFICE PENTRU DETERMINAREA FIABILITĂȚII. CREȘTEREA FIABILITĂȚII ȘI MENTENABILITĂȚII PRIN ASIGURAREA CALITĂȚII PRODUSULUI FINIT

6.1. Concepte fundamentale

6.1.1. Conceptul de fiabilitate

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 [66],[28],[36].

FIABILITATEA este amplitudinea 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.

La îndeplinirea unei funcții, a unei misiuni sau a unui serviciu se au în vedere anumite standarde calitative ale acestor obiective.

Din punct de vedere al etapei de realizare, fiabilitatea poate fi :

- previzională – determinată pe baza considerentelor legate de concepția și proiectarea sistemului tehnic, precum și pe baza fiabilității componentelor sale în condiții de exploatare prescrise;
- experimentală – determinată experimental în laboratoare, pe standuri de probă, fiind simulate condițiile din exploatare;
- operațională – demonstrată de sistemul tehnic în condiții reale de exploatare.

După modul de estimare fiabilitatea poate fi :

- nominală–prescrisă în standarde, norme tehnice sau inscripționată pe produs;

- estimată–determinată pe baza datelor obținute fie experimental prin încercări, fie prin observarea sistemului tehnic în exploatare.

O atenție deosebită se acordă stabilirii nivelului optim al fiabilității, care cel mai des implică abordarea criteriului economic, scopul optimizării 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 [28]: costul de fabricație care este crescător cu cât fiabilitatea produsului este mai mare și costul de întreținere care este cu atât mai mic cu cât fiabilitatea produsului este mai mare (fig.6.1).

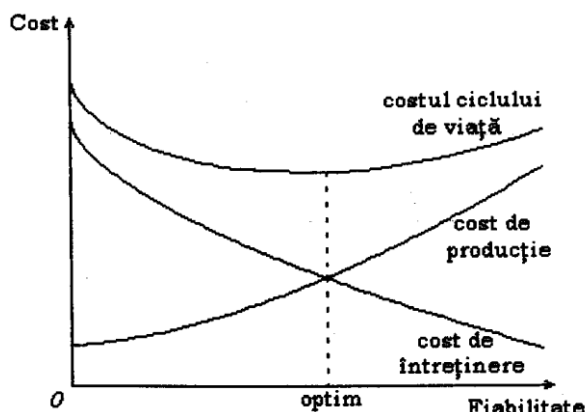


Fig. 6.1. Costul ciclului de viață

Costul ciclului de viață (costul global) se obține însumând cele două componente. Din punct de vedere al beneficiarului, costul de producție se află într-o legătură direct proporțională cu costul de achiziție.

Soluția optimă din punct de vedere economic, corespunde costului global minim, dar achiziționarea unui produs se face doar după o analiză care să țină cont atât de costuri cât și de implicațiile economice și sociale ale unor eventuale defectări în timpul exploatării.

6.1.2. Conceptele de mentenabilitate, mentenanță și disponibilitate

Produsele pot fi împărțite în două categorii :

- nereparabile (de unică folosință);
- produse reparabile (cu restabilire a funcționalității).

Din prima categorie fac parte produsele a căror comportare în exploatare este caracterizată doar de parametrii de funcționare fără defectare.

Din cea de-a doua categorie fac parte în general produsele complexe (sistemele tehnice) care sunt constituite dintr-un număr mare de componente, ex. echipamentele 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 (reducerii în stare de funcționare). Ca rezultat direct al bunei funcționări și al caracteristicilor restabilirii se obțin parametrii de disponibilitate.

Deci, pentru sistemele tehnice reparabile este necesară introducerea unor noi concepte, strâns legate de fiabilitate, și anume mentenabilitate, mentenanță și disponibilitate.

MENTENABILITATEA este caracteristica unui sistem tehnic de a putea fi rapid readus în stare de funcționare, după o defectare.

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) care presupune supravegherea bunei

funcționări și efectuarea periodică a reviziilor (- după caz -: reglaje, înlocuiri ale pieselor de uzură, schimbarea uleiului, etc.);

- corectivă care presupune readucerea echipamentului în stare de bună funcționare, prin înlocuirea componentelor defecte și efectuarea de reparații.

Mentenabilitatea și mentenanța sunt două noțiuni iseparabile, mentenabilitatea cuantificând calitatea acțiunilor de mentenanță. Dacă mentenabilitatea reprezintă proprietatea unui sistem de a fi ușor de întreținut și reparat, mentenanța presupune operațiile propriu-zise de întreținere și reparare [36].

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 mentenabilitatea acestuia. Un nivel ridicat al fiabilității și al mentenabilității atrage după sine o disponibilitate superioară.

Caracteristica de disponibilitate care presupune defecte puține și ușor reparabile, constituie de fapt cerința principală a utilizatorului sistemului tehnic.

6.1.3. Conceptul de calitate

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 cumpărătorului.

O importanță deosebită o are și nivelul tehnic al produsului, el fiind o componenta importantă a calității.

Etapile realizării calității sunt structurate în trei categorii, și anume : calitatea proiectată, calitatea fabricației și calitatea livrată. Deci calitatea prezintă 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 ca în 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, calificarea și conștiințiozitatea personalului, efectuarea controlului tehnic de calitate etc. După achiziționarea de către beneficiar, calitatea se identifică cu fiabilitatea și cu mentenabilitatea produsului.

Calitatea are în vedere, pe lângă proprietățile intrinseci ale produsului, și aspectele economice legate de realizarea și utilizarea acestuia, o atenție deosebită acordându-se 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 beneficiar, producătorul având în vedere realizarea unor produse de

calitate, iar beneficiarul urmărind să beneficieze de servicii de calitate de pe urma produsului achiziționat.

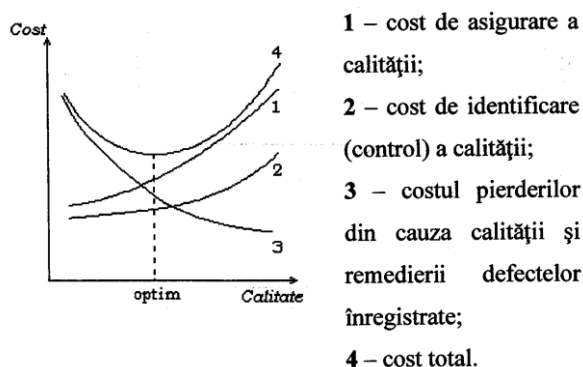


Fig. 6.2. Costul calității la producător

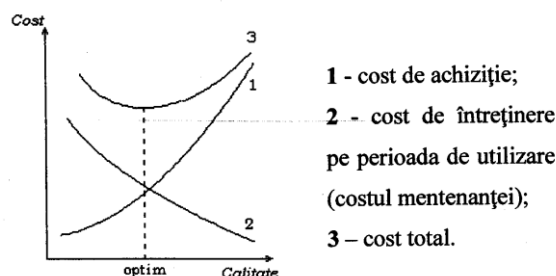


Fig. 6.3. Costul calității la beneficiar

Componentele costului calității sunt indicate în figurile 6.2. - pentru producător și 6.3. pentru beneficiar, fiind evidențiat nivelul optim din punct de vedere economic al calității.

6.2. Modalități de creștere a fiabilității și mentenabilității

Experiența arată că de-a lungul vieții unui produs (sistem tehnic), costurile de exploatare depășesc cu mult costul de achiziție al acestuia. Deoarece fiabilitatea și mentenabilitatea influențează categoric costurile de exploatare, este important ca obiectivul principal al producătorului să constituie realizarea de echipamente cât mai sigure și cât mai ușor și rapid de întreținut [36].

Măsurile pentru asigurarea fiabilității și mentenabilității trebuie să fie luate avându-se în vedere toate fazele prin care trece un sistem tehnic și anume :

Faza de proiectare :

- analiza atentă a cerințelor pieței;
- 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.

Faza de fabricație :

-perfecționarea tehnologiei de fabricație;

-automatizarea pe cât posibil a producției;

-aprovizionarea tehnico-materială corespunzătoare calitativ;

-ridicarea calificării personalului;

-organizarea unui control tehnic eficace și reglarea statistică a calității producției.

Faza de 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.

Pentru asigurarea creșterii fiabilității producătorul mai trebuie să țină cont de faptul că modificările care se fac în faza de proiectare sunt mult mai ieftine decât cele care se efectuează când echipamentul se află în faza de producție și exploatare. De asemenea la concepția unui produs nou, utilizarea unor componente, subansambluri tehnologii verificate în timp, conduce la creșterea fiabilității produsului.

6.3. Probe amortizor aparat tracțiune pentru vagon AVA 200

Amortizorul pentru aparatul de tracțiune vagon AVA 200, dotat cu boghiu Y 32 R, a fost supus încercărilor de flexibilitate și anduranță conform cerințelor normelor internaționale UIC 827-2. Proba de flexibilitate s-a efectuat cu ajutorul unei prese hidraulice de 100 tF cu pulsator tip 100 ZD-WPM Leipzig – Germania iar pentru proba de anduranță s-a utilizat o presă hidraulică PHC 60 de fabricație Târgu-Jiu – România.

6.3.1. Metodologia de încercare și rezultatul încercărilor

Amortizorul așezat pe masa mașinii de încercat a fost supus la 3 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 sunt :

- $We = 18.525 \text{ KJ}$, $V/a = 13.325 \text{ KJ}$, $\eta = 71.92 \%$;

- Forța 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;

Rezultatele prezentate ne indică faptul că se încadrează în cerințele impuse de normele UIC 827-2.

După proba de flexibilitate diagrama amortizorului este cea din fig.6.4.

Amortizor cu 3 inele cu fantă pentru vagon AVA 200 :

S-a utilizat :

Unsoare U 230 Ca2 EPM

$W_e = 18.525 \text{ KJ}$

$W_a = 13.325 \text{ K}$

$\eta = 71.92 \%$

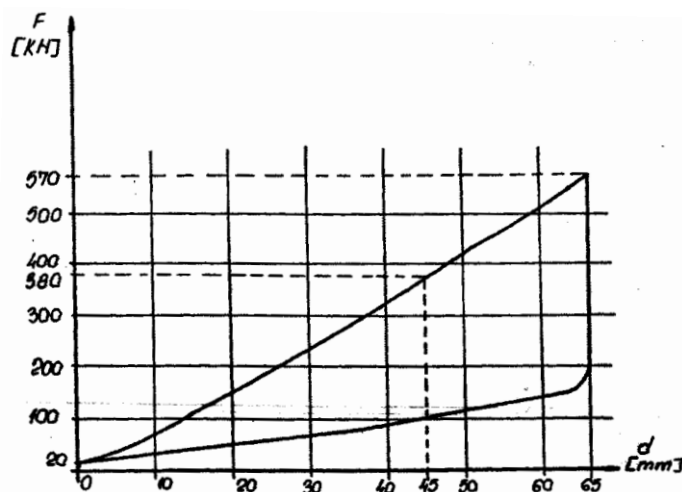


Fig.6.4.

După proba de flexibilitate amortizorul a fost supus la încercarea de durabilitate conform fisei UIC 827-2, după următorul program :

- 1.-200 de cicluri cu o sarcină de 85 % din energia înmagazinată
- 2.-1200 de cicluri cu o sarcină de 50 % din energia înmagazinată
- 3.-3000 de 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 :

după programul 1 de solicitare :

- $W_e = 18.2 \text{ KJ}$; $W_a = 13 \text{ KJ}$; $\eta = 71.42 \%$
- Forța de precomprimare - 20 KN
- Forța la cursa de 45 mm - 380 KN
- Forța la cursa de 65 mm - 560 kn;
- Unsoare U 230 Ca 2 EPM

S-a obținut diagrama din fig. 6.5.

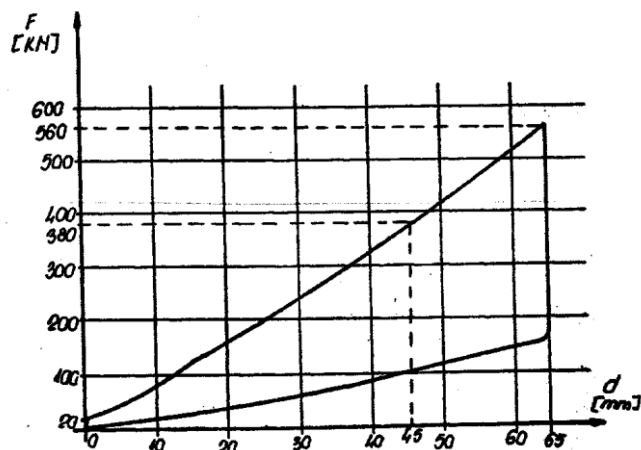


Fig. 6.5.

după programul 2 de solicitare :

- $W_e = 17.98$ KJ; $W_a = 13,02$ KJ; $\eta = 72.41$ %
- Forța de precomprimare 20 KN
- Forța de comprimare - 20 KN
- Forța la cursa de 45 mm - 380 KN
- Forța la cursa de 65 mm - 580 kn;
- Unsoare Shell Alvania EP-1

S-a obținut diagrama din fig. 6.6.

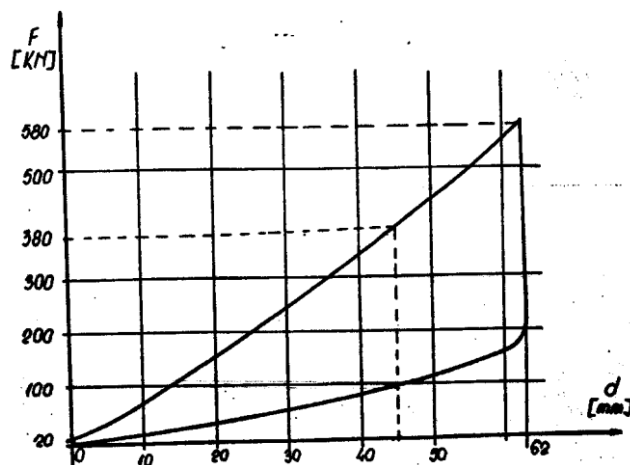


Fig. 6.6.

după programul 3 de solicitare :

- $W_e = 17.08$ KJ; $W_a = 12,51$ KJ; $\eta = 73.24$ %
- Forța de precomprimare 20 KN
- Forța de comprimare - 20 KN
- Forța la cursa de 45 mm - 380 KN
- Forța la cursa de 65 mm - 560 kn;
- Unsoare Shell Alvania EP-1

S-a obținut diagrama din fig.6.7.

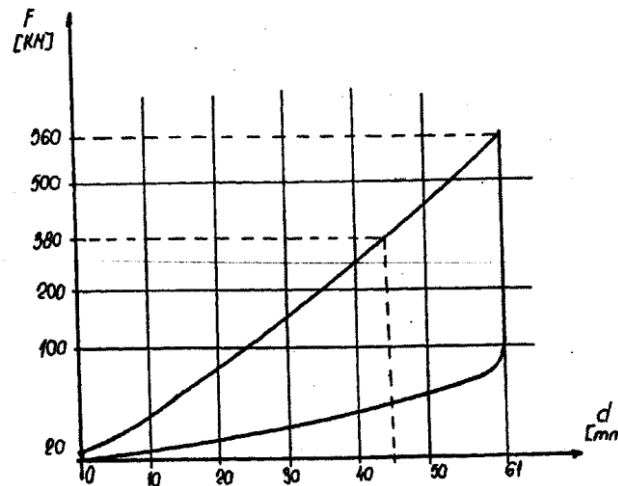


Fig. 6.7.

6.3.2. Încercarea de duranță

În timpul încercării de duranță s-a urmărit ca temperatura maximă să nu fie mai mare de 60 °C, frecvența de aplicare a solicitării fiind de 1.8 cicluri/minut iar temperatura de lucru să fie între 50 °C și 55 °C.

Pentru a clasifica această comportare diferită a setului de arcuri în funcție de tipul de unsoare utilizat, am efectuat încercarea la penetrație conform normelor europene în vigoare, obținând următoarele rezultate :

Tip unsoare	Determinarea penetrației conf. norm.europene (10^{-1})	
	Determinat	Valoare impusă
U 230Ca 2 EPM	185 - 200	260 - 300
Shell Alvania EP-1	280 - 290	

Constatăm că unsoarea Shell Alvania EP-1 corespunde cerințelor.

Proba de duranță la 5000 cicluri

Am efectuat un program de 5000 de cicluri cu amortizorul nr. 1 care a fost supus la încercarea de duranță de 3 x 4400 cicluri, regimul de pulsare cu frecvența de 1.8 cicluri/minut, temperature de lucru 50 - 55 °C, unsoare Shel Alvania EP - 1.

-dupa 500 de cicluri amortizorul a fost reuns cu unsoare.

-la 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 și s-a continuat proba de duranță.

-după fiecare 500 de cicluri aplicate amortizorul a fost uns cu unsoare, păstrându-se temperatura de lucru.

-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 și s-au continuat încercările.

-la numărul 2040 de cicluri s-au rupt inelele exterioare 4 și 5 față de suprafața de sprijin de jos. Programul de încercări a fost întrerupt.

Programul de încercări a fost reluat cu amortizorul nr. 2, în stare nouă, la încercarea de durabilitate la 5000 de cicluri, folosind unsoare Shell Alvania EP – 1, asigurându-se un regim de solicitare de 85 % din energia potențială de deformare înmagazinată și o frecvență de 1.8 cicluri/minut.

În prealabil s-a executat proba de flexibilitate și încercările de durabilitate 3 x 4400 cicluri. După încercările efectuate, energia potențială de deformare înmagazinată nu a scăzut sub limitele prescrise iar elementele amortizorului nu au prezentat fisuri sau crăpături. Diagrama se regăsește în fig.6.8.

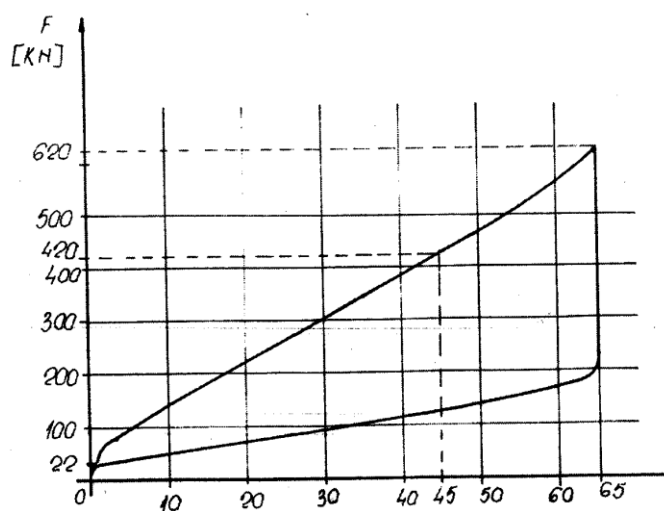


Fig. 6.8.

Am efectuat un program de 5000 de cicluri cu amortizorul nr. 2 la temperatura de lucru 50 – 55 °C, unsoare Shel Alvania EP – 1.

-după fiecare 500 de cicluri aplicate amortizorul a fost uns cu unsoare, păstrându-se temperatura de lucru.

-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 și s-a continuat proba de durabilitate.

-la numărul de 2612 cicluri s-a rupt inelul exterior nr. 4 față de suprafața de sprijin jos, s-a înlocuit inelul rupt, s-a uns cu unsoare și s-a continuat proba de durabilitate.

- la numărul 4060 de cicluri s-au rupt inelele 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 durabilitate la 3 x 4400 de cicluri. La încercarea de durabilitate la 5000 de cicluri , deoarece au apărut pe parcursul încercărilor 4 rupeuri de inele, consider că amortizoarele nu corespund cerințelor impuse de normele internaționale, din punct de vedere al fiabilității și ca atare este necesară urmărirea mai atentă a respectării tehnologiei de fabricație și a tratamentului termic aplicat.

6.4. Verificarea arcurilor elicoidale

S-au verificat două tipuri de arcuri elicoidale cu următoarele dimensiuni :

-arcul nr.1 : 334 x 224 x 37 mm³ (înălțimea arcului x diametrul exterior x diametrul spirei);

-arcul nr. 2 : 334 x 192 x 24 mm³

La cele două arcuri s-au efectuat următoarele testări și verificări :

-testare cu pulbere magnetică asupra defectelor longitudinale și transversale conform UIC 822 O [93];

-determinarea compoziției chimice;

-determinarea valorilor caracteristice ale încercării la întindere/tracțiune conform DIN 10002-1;

-determinarea durtății conform DIN EN ISO 6506-1 [90];

-determinarea energiei de rupere conform DIN EN 10045, la încercarea de reziliență;

-determinarea diagramelor statice;

-verificarea preciziei dimensionale;

-test de verificare la durabilitate conform normelor europene în vigoare;

Testarea cu pulbere magnetică s-a efectuat după îndepărtarea vopselei de protecție anticorozivă, iar în urma testării conform UIC 822 O nu s-au constatat la primul tip de arc urme de rupturi, creștături, la al doilea tip de arc s-au constatat urme longitudinale și transversale pe suprafața arcului.

Determinarea compoziției chimice s-a efectuat prin extragerea materialului din probă dintr-o zonă aflată în mijlocul arcului. Prin utilizarea unui spectrometru, respectiv a unui aparat de absorbție infraroșu, tip METALYT CS 100/1000 s-au stabilit pentru compoziția materialului utilizat, pentru ambele arcuri, valorile din tabelul 6.1.

Tabelul 6.1.

Element chimic	Arc 1	Arc 2	Valori prescrise pentru materialul 50 CrV4 DIN 17221 [%]
C	0.53	0.53	0,47-0,55
Si	0.29	0.29	0,15-0,40
Mn	0.79	0.79	0,70-1,10
P	0.01	0.01	max. 0,035
S	0.01	0.01	max. 0,035
Cr	1.00	1.00	0,90-1,20
Mo	0.5	0.5	-
Ni	0.62	0.62	-
Cu	0.18	0.18	-
V	0.010	0.010	0,10-0,20

Materialul folosit la fabricarea celor două tipuri de arcuri verificate corespunde în ceea ce privește compoziția chimică cerințelor din DIN 17221 [89] pentru marca de oțel utilizată.

Încercarea la întindere s-a făcut cu epruvete de forma B8 x 40 pentru arcul nr. 1 și epruvete de forma B6 x 30 pentru arcul nr. 2 conform cerințelor DIN 50125, pe standul tip UTS 100. Rezultatele încercărilor sunt trecute în tabelul 6.2.

Tabelul 6.2.

Proba	Limita la întindere $R_{p0,2}$ [N/mm ²]	Rezistența la întindere R_m [N/mm ²]	Întinderea la rupere A_5 [%]
1	1511	1636	9.0
2	1548	1712	9.3

Testarea durității s-a făcut pe două macroprobe prelevate la fiecare tip de arc din zona de mijloc având o lățime de aproximativ 12 mm. S-a determinat duritatea Brinel în trei poziții, poziția 1 aflată la 2 mm sub suprafața arcului, poziția 3 aflată în centrul secțiunii transversale, poziția 2 aflată în zona de mijloc dintre 1 și 3. Rezultatele măsurătorilor sunt redată în tabelul 6.3.

Tabelul 6.3.

Pozitia	Duritatea HB 2.5/187.5 la arcuri	
	1	2
1	477	488
2	483	493
3	459	495
Valoarea medie	473	492
Abaterea standard	± 12.3	± 3.5
Valorile prescrise	424 - 488	424 - 488

Constatăm o distribuție aproximativ omogenă a durității la ambele arcuri, iar pentru arcul nr. 2 o depășire ușoară a valorii maxime admise de 488 HB prescrisă.

Încercarea la reziliență s-a făcut cu trei epruvete prelevate din fiecare arc, având forma și dimensiunile conform DIN EN 10045-1. Rezultatele încercării au fost consemnate în tabelul 6.4.

Tabel 6.4.

Nr. probă	Temperatura de testare [°C]	Energia de rupere KU [J]			Valoarea medie [J]	Abaterea standard
		1	2	3		
1	RT	13	14	12	13	±1.0
2	RT	12	13	12	12	± 0.6
Valori prescrise conform UIC 821 V	RT	Valoare individuală ≥ 9 (minim 75 % din 13 J)			≥ 13	-

RT = 20 °C

Constatăm că rezultatele obținute pentru arcul nr. 1 respectă valorile prescrise, iar arcul nr. 2 are energia de rupere mai mică decât valoarea prescrisă de 13 J.

Diagramele statice ale arcurilor elicoidale studiate sunt prezentate în figurile 6.9. și 6.10.

Verificarea preciziei dimensionale s-a realizat prin determinarea înălțimii arcului în 4 puncte distribuite pe diametru. Rezultatele experimentale sunt trecute în tabelul 6.5.

Tabel 6.5.

Arcuri de compresiune (interior) Ø 24.7 mm				
Număr arc	Punct de măsurare 1 [mm]	Punct de măsurare 2 [mm]	Punct de măsurare 3 [mm]	Punct de măsurare 4 [mm]
1	344	343	345	344
2	343	344	344	344
3	342	343	344	344
Arcuri de compresiune (exterior) Ø 37 mm				
1	345	344	345	344
2	344	343	344	344
3	344	344	344	343

Testul de încercare la anduranță. În timpul încercărilor de anduranță au fost verificate în mod continuu regimul de pulsare și a fost contorizat numărul de cicluri. Rezultatele testelor de anduranță sunt redade în tabelele 6.6. și 6.7.

Analizând rezultatele experimentale obținute, am constatat că arcurile Ø 37 mm au răspuns pozitiv la încercarea de anduranță și nu au fost constatate defecte, fisuri sau rupturi în arc; la arcurile de Ø 24.7 mm au fost constatate ruperi ale arcului în dreptul primei spire sau la nivelul spirelor de la mijlocul arcului. Ruperea arcurilor s-a constatat pentru arcul 1 și 3 în timpul primei trepte de sarcină iar pentru arcul 2 la a treia treaptă de sarcină aplicată.

Răspunsul negativ la proba de anduranță în cazul arcului Ø 24.7 mm, consider că se datorează depășirii valorilor impuse pentru duritate și a neîncadrării în limitele prescrise pentru reziliență semnalate anterior.

Tabel 6.6.

Arcuri de compresiune Ø 24.7 mm		
Numar arc	Joc de pulsatie	Observatii
1	1128000	Ruptura la prima treapta de sarcina
2	3354000	Ruptura la a treia treapta de sarcina
3	1249000	Ruptura la prima treapta de sarcina

Tabel 6.7.

Arcuri de compresiune Ø 37 mm		
Numar arc	Joc de pulsatie	Observatii
1	4000000	Treapta de sarcina 1 – 3 trecuta
2	4000000	Treapta de sarcina 1 – 3 trecuta
3	4000000	Treapta de sarcina 1 – 3 trecuta

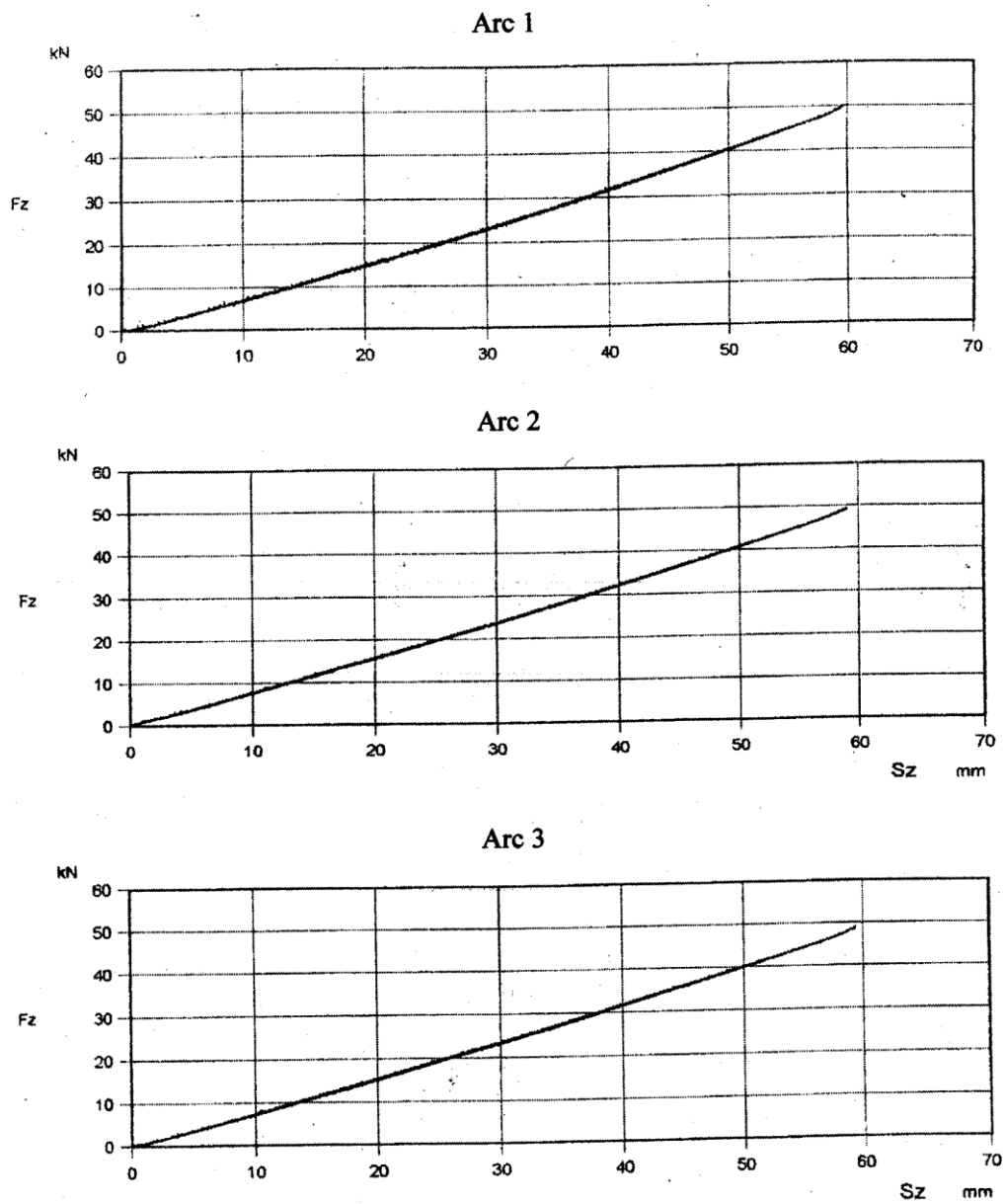


Fig. 6.9. Diagramele arcurilor elicoidale $\varnothing 24.7$

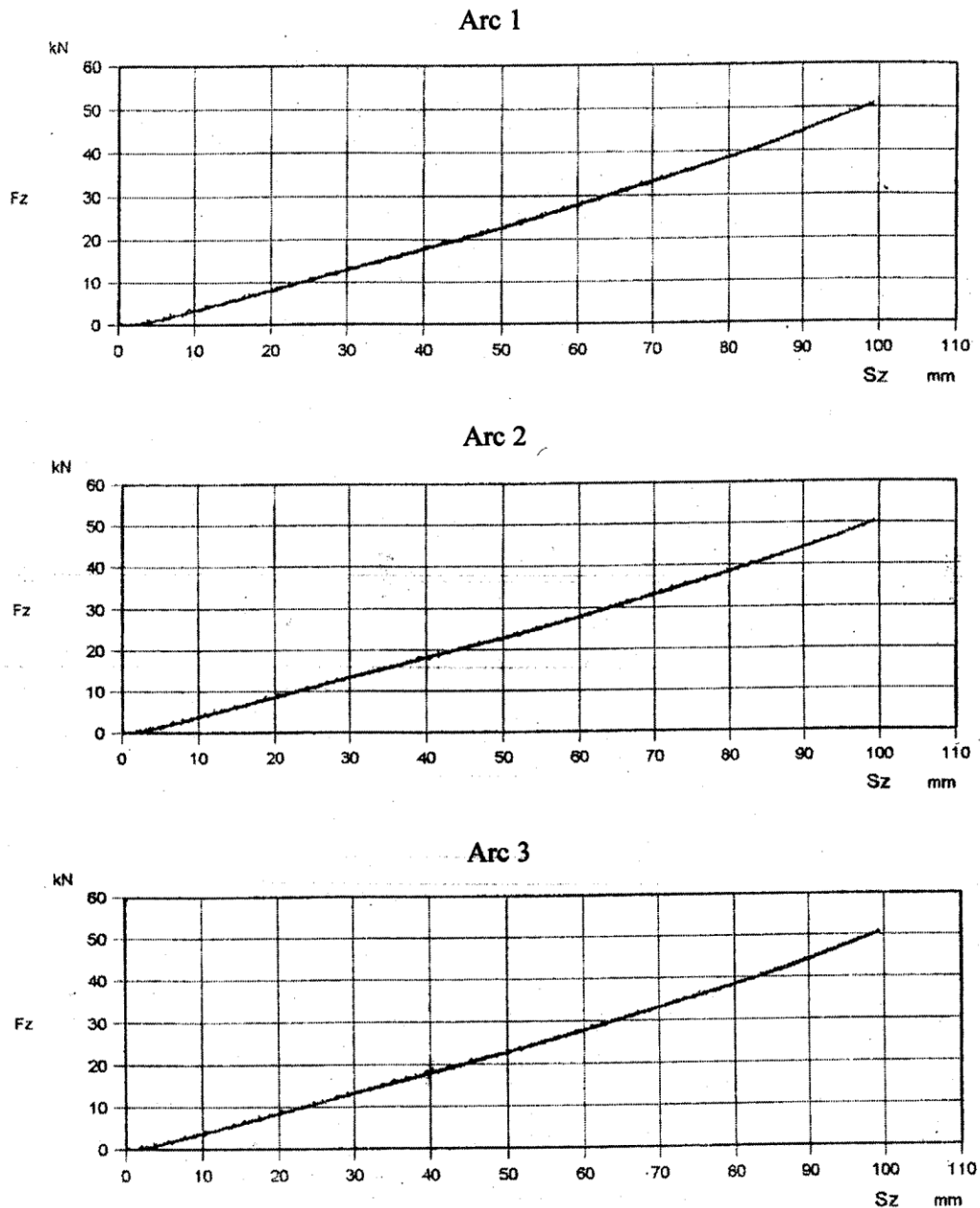


Fig. 6.10. Diagramele arcurilor elicoidale $\varnothing 37$

6.5. Concluzii

Vehiculele feroviare sunt sisteme tehnice de mare complexitate, alcătuite din subansambluri, care la rândul lor sunt compuse din elemente complexe și/sau subansambluri de rang inferior.

Arcurile, de exemplu, sunt elemente ale suspensiei vehiculului care este un subansamblu al boghiului, s.a. Cercetarea experimentală efectuată în vederea stabilirii fiabilității amortizorului destinat echipării aparatului de tracțiune a vagonului AVA 200, a condus la concluzia că amortizorii supuși încercării răspund favorabil la încercarea de flexibilitate și de anduranță la 3×4400 cicluri, dar nu au răspuns corespunzător la încercarea de anduranță la 5000 de cicluri. În consecință consider că este necesară respectarea cu strictețe a tehnologiei de execuție și a tratamentului termic

aplicat., astfel se poate garanta o fiabilitate adecvată a acestor tipuri de arcuri utilizate în exploatarea feroviară.

Pentru a controla fiabilitatea unui sistem tehnic sunt necesare informații privind comportarea acestuia în timpul funcționării sale. Informațiile necesare controlului fiabilității se pot obține pe două căi : fie prin urmărirea comportării în exploatare a echipamentelor în cauză fie 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. Modalitățile de verificare a fiabilității vehiculelor de cale ferată nu diferă de cele utilizate în cazul altor produse industriale complexe.

Astfel, vehiculele feroviare sunt sisteme tehnice complexe cu durata de întrebuințare mare, viața de serviciu fiind de ordinul zecilor de ani, uzura lor morală fiind relativ lentă. Exploatarea materialului rulant se realizează într-un mod organizat, specific transportului feroviar, informațiile privind natura defectărilor, cronologia producerii acestora în exploatare fiind în principiu mai ușor de obținut decât în cazul altor produse industriale.

Arcurile metalice ca elemente ale suspensiei vehiculului, suspensia intrând în componența boghiului, care la rândul său constituie un subansamblu al vehiculului, în cazul unora dintre elemente mult mai relevantă este testarea separată a acestora. Mult mai eficace din punct de vedere al controlului și îmbunătățirea fiabilității este încercarea pe standuri specializate, de exemplu a amortizoarelor de vibrații, în loc să se aștepte defectarea acestora în exploatare.

La încercările de anduranță efectuate în scopul stabilirii fiabilității arcurilor elicoidale, am constatat că arcul de $\varnothing 24.7$ mm nu a răspuns pozitiv încercării, constatându-se ruperi ale arcului. Ca atare se impune respectarea cu strictețe a tehnologiei de execuție și a tratamentului termic aplicat, astfel se poate garanta o fiabilitate adecvată a acestor tipuri de arcuri utilizate în exploatarea feroviară.

CAPITOLUL 7

CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE

7.1. 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 vehiculelor feroviare este de a înmagazina energie potențială de deformație, și în consecință de a reduce efectele excitațiilor aplicate sistemului mecanic provocând reducerea amplitudinilor vibrațiilor. Un dezavantaj al arcurilor metalice este că în orice ciclu de funcționare energia potențială de deformație înmagazinată, este redată complet sistemului mecanic sub formă de energie cinetică dacă nu sunt însoțite de elemente care să asigure amortizarea. Datorită acestui aspect, desprindem două tipuri de arcuri metalice :

- arcuri metalice fără amortizare, de exemplu arcurile elicoidale, care de regulă funcționează în paralel cu elemente elastice ce pot asigura amortizarea și în consecință posibilitatea disipării energiei potențiale de deformație, ce nu mai apare imediat în ciclul următor de oscilație;

- arcuri metalice, de exemplu arcuri în foi, care datorită mișcării relative dintre anumite suprafețe, prin frecare columbiana dobândesc, calitatea de amortizoare și în consecință la fiecare ciclu de funcționare o parte din energia potențială de deformație este eliminată din sistemul mecanic.

În lucrarea de față am luat în calcul și am prezentat tipurile de arcuri metalice elicoidale utilizate la echiparea suspensiei 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 metoda elementului finit, propunând utilizarea softului COSMOS Works 2005.

Analiza tensiunilor și deformațiilor prin metoda elementelor finite furnizează o alternativă ușoară și simplă de analiză a problemei de geometrie complexă. Prin aplicarea practică a acestei metode s-a observat că eroarea rezultată în urma comparațiilor deformațiilor (teoretică și reală) scade cu creșterea numărului de elemente, deci se pot obține rezultate

foarte apropiate de rezultatele teoretice dacă se utilizează un număr cât mai mare de elemente (discretizare cât mai fină) și o aplicare corespunzătoare a condițiilor de granită și respectiv al încărcărilor.

La evaluarea rezultatelor tensiunilor programul COSMOSWorks 2005 oferă depistarea ușoară a zonelor critice în condițiile existenței valorilor tensiunilor : tensiune echivalentă von Mises, tensiune principală minimă și a tensiunilor ce aparțin tensorului tensiunilor. În consecință compararea acestor rezultate teoretice cu eventualele rezultate experimentale este extrem de facilă.

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

Oțelurile pentru arcuri trebuie să aibă următoarele proprietăți :

- domeniu larg de deformare plastică;
- proprietăți foarte bune de plasticitate;
- rezistență la oboseală mare.

Caracteristicile cerute oțelurilor de arcuri se obțin prin două metode :

- printr-o compoziție chimică adecvată;
- printr-un tratament termic obligatoriu de călire și revenire medie.

Arcurile elicoidale formate la cald sunt supuse unui tratament termic care cuprinde obligatoriu o călire în apă sau ulei, în funcție de categoria de oțel folosit, și o revenire urmată de o răcire în aer liniștit. Tratamentul termic se efectuează numai după răcirea completă a arcurilor și eliminarea căldurii de la operația de înfășurare.

În vederea asigurării unei bune calități a tratamentului termic, este necesar a se stabili în prealabil temperatura de călire și de revenire în funcție de compoziția chimică a oțelului folosit și de a respecta aceasta cu o abatere de +/- 10°C în cursul operațiilor de tratament termic.

Caracteristicile de exploatare sunt dependente de structurile obținute în urma tratamentului termic de călire și revenire medie.

Tehnologia actuală de înfășurare nu asigură un pas constant al arcului, ulterior fiind necesară o operație manuală de închidere pe dornul de ajustat a spirelor de capăt. Pentru înlăturarea acestui impediment este necesară utilizarea unei mașini de înfășurat care să închidă automat spirele de capăt ale arcului, nemaifiind necesară o corecție manuală ulterioară.

O altă neconformitate o reprezintă transportul arcurilor de la cuptorul de încălzire pentru călire la bazinul pentru răcire în ulei, timp în care temperatura arcurilor scade până sub limita admisă. Corecția acestui lucru se poate face prin efectuarea tratamentului de călire în cuptoare cu bazine integrate, cu atât mai mult cu cât poate fi controlată cu o mai mare precizie temperatura de călire.

Prelucrarea mecanică a capetelor arcului, conform tehnologiei actuale, prin așchiere pe strung, conduce la apariția unor abateri mari de la paralelism și perpendicularitate (deformarea spirei sub acțiunea forței de așchiere) rezultând astfel o creștere a tensiunilor în anumite zone ale arcului, existând riscul apariției unor amorse de fisuri.

O măsură de îmbunătățire a prelucrării capatelor arcului o reprezintă modificarea tehnologiei, în sensul executării printr-o operație de polizare. În acest mod prelucrarea se poate executa într-o singură operație, nemaifiind necesară finisarea.

În urma cercetării efectuate am constatat următoarele :

- cu parametrii din tehnologia actuală de tratament termic de călire s-a constatat că duritatea este mai mică decât cea preconizată;
- valorile diferite ale durităților pe probe martor efectuate în atelierul societății se datorează probabil unei răcirii premature la deplasarea între cuptor și baie.

Pentru îmbunătățirea tratamentului termic de călire și determinarea temperaturii optime de călire am folosit metoda călirilor succesive în intervalul 820 - 880 °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

La acești parametrii am obținut o duritate mai ridicată iar valorile acestor durități au fost în intervalul de precizie al aparatului de măsurat.

Pentru determinarea temperaturii optime de revenire s-a apelat la metoda încălzirilor succesive în intervalul de temperatură 350 – 550 °C, efectuate pe 5 probe în condiții de laborator. Am concluzionat că intervalul care produce durități finale între 45 – 50 HRC este intervalul de temperatură 400 – 450 °C.

În cazul realizării unei căliri optime, trebuie să se adopte un tratament termic de revenire în jurul valorii de 450 °C/h cu răcire în aer. Această măsură alături de procesul de ecruisare cu bile, vor avea ca efect pregătirea superioară a suprafeței și îmbunătățirea comportării la oboseală. Dacă rezultă că arcul este suprasolicitat din punct de vedere al calculului de rezistență, este de dorit maximizarea proprietăților mecanice ale materialului, iar duritățile să fie maxime, ceea ce va corespunde și unei rezistențe mecanice spre valori maxime. Îmbunătățirea condițiilor de suprafață prin ecruisare trebuie să fie și în acest caz optimizate.

Eficacitatea ecruisării se determină cu ajutorul probei ALMEN. Proba ALMEN nu poate indica eficacitatea ecruisării numai dacă este utilizată în condiții riguros determinate.

Necesitatea utilizării căilor de eliminare a microfisurilor în procesul de ecruisare impune ca :

- arcurile să aibă durități medii față de valoarea maxim acceptată (50 HRC);
- materialul alicelor să nu prezinte durități exagerate;
- diametrul bilelor sî nu fie prea mare, bilele sî fie sortate, fără muchii, ciupituri sau alte deșeuri;
- presiunea de aruncare a alicelor să fie redusă, în cazul apariției microfisurilor.

Îmbunătățirea procesului de ecruisare, practicat la ora actuală se poate face prin următoarele propuneri :

- trebuie folosite mai multe epruvete ALMEN care să fie amplasate în zone diferite ale arcului, astfel va rezulta o precizie superioară a gradului de ecruisare.

- introducerea unei operații suplimentare de ecruisare la cald, după executarea operației de ecruisare la rece, operație în urma careia s-a constatat o creștere semnificativă a rezistenței la oboseală.

Pentru tehnologia actuală am determinat experimental timpul optim pentru ecruisarea arcurilor. Din analiza rezultatelor , pe instalația SIESSON-LEHMANN utilizată, timpul optim este de 10 minute, durată de timp la care s-au obținut caracteristicile mecanice cele mai ridicate. O durată mai mare de timp ar duce la scăderea acestor caracteristici și ca atare apariția fisurilor de suprafață.

În urma studiului experimental efectuat asupra rezistenței la oboseală a arcurilor elicoidale am desprins 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;

- factori ca: variații ale dimensiunilor formei geometrice a arcului, starea suprafeței (rugozitate datorată ecruisării cu bile, imprimări pe suprafață datorate deformării plastice la cald sau în timpul încărcării datorită contactului punctiform în zona spirelor de capăt) și nivelul tensiunilor interne pot fi cauze care conduc la ruperea prematură la oboseală.

Din analiza suprafețelor de rupere reiese că fisura se poate amorsa în fibra interioară a spirei ce prezintă neuniformități provocate de dorn la realizarea arcului;

microfisurile provocate de alicele de oțel în timpul tratamentului de ecruisare, care pot deveni amorse de fisură și conduc la scăderea rezistenței la oboseală.

Încercările de oboseală efectuate pentru arcul de \emptyset 37 mm și arcul de \emptyset 24.7 mm 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 funcționării sale. Informațiile necesare controlului fiabilității se pot obține pe două căi : fie prin urmărirea comportării în exploatare a echipamentelor în cauză fie 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. Modalitățile de verificare a fiabilității vehiculelor de cale ferată nu diferă de cele utilizate în cazul altor produse industriale complexe.

Astfel, vehiculele feroviare sunt sisteme tehnice complexe cu durata

de întrebuințare mare, viața de serviciu fiind de ordinul zecilor de ani, uzura lor morală fiind relativ lentă. Exploatarea materialului rulant se realizează într-un mod organizat, specific transportului feroviar, informațiile privind natura defectărilor, cronologia producerii acestora în exploatare fiind în principiu mai ușor de obținut decât în cazul altor produse industriale.

Vehiculele de cale ferată sunt sisteme tehnice de mare complexitate, alcătuite din subansambluri care, la rândul lor, sunt compuse din elemente complexe și/sau subansambluri de rang inferior. Arcurile metalice sunt elemente ale suspensiei vehiculului, suspensia intrând în componența boghiului, care la rândul său constituie un subansamblu al vehiculului. Această complexitate face ca în cazul unora dintre elemente să fie mult mai relevantă testarea separată a acestora. Mult mai eficace din punct de vedere al controlului și îmbunătățirea fiabilității este încercarea pe standuri specializate, de exemplu a amortizoarelor de vibrații, în loc să se aștepte defectarea acestora 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 în parte. Prin îmbunătățirea fiabilității acestora, fiabilitatea ansamblului (vehiculului) va fi mai mare.

Cercetarea experimentală efectuată în scopul stabilirii fiabilității amortizorului destinat echipării tracțiunii la vagonul AVA 200 a reliefat faptul că amortizorii au răspuns favorabil la încercarea de fiabilitate și de anduranță la 3 x 4400 cicluri, dar nu au răspuns corespunzător la încercarea de anduranță la 5000 de cicluri. În consecință consider că este necesară respectarea cu strictețe a tehnologiei de execuție și a tratamentului termic aplicat.

La încercările de anduranță efectuate în scopul stabilirii fiabilității arcurilor elicoidale, am constatat că arcul de \varnothing 24.7 mm nu a răspuns pozitiv încercării, constatându-se ruperi ale arcului. Ca atare se impune respectarea cu strictețe a tehnologiei de execuție și a tratamentului termic aplicat, astfel se poate garanta o fiabilitate adecvată a acestor tipuri de arcuri utilizate în exploatarea feroviară.

7.2. Contribuții personale

1. Am făcut un studiu teoretic asupra comportării dinamice atât în plan vertical cât și transversal a arcurilor elicoidale cel mai des folosite la suspensia vehiculelor feroviare. Am prezentat metode de calcul atât în regim static cât și în regim dinamic pentru arcurile elicoidale metalice, ce pot fi utilizate de proiectanți atunci când apare problema proiectării unui arc elicoidal cu anumite caracteristici impuse.

2. M-a preocupat folosirea unor metode moderne de calcul, cum este metoda de analiză cu element finit propunând utilizarea unui program pe care l-am agreat datorită conformității cu rezultatele experimentale, pachetul soft COSMOSWorks 2005.

3. Am constatat că rezultatele asupra tensiunilor determinate cu programul COSMOSWork 2005 s-au dovedit a fi apropiate de rezultatele experimentale, astfel consider că modul de abordare în proiectarea arcurilor metalice trebuie să se bazeze pe metoda elementului finit și chiar pe alte programe de analiză, deoarece pot constitui un pas important în proiectarea și desfășurarea cercetării propriu-zise cu scopul de a stabili o soluție finală care să răspundă fiabilității și duranței necesare.

4. Pe baza încercărilor și analizelor de material am constatat că procesul de deformare la cald în varianta actuală, are încă rezerve de îmbunătățire și poate contribui la creșterea calității arcurilor analizate, astfel :

- prin creșterea preciziei de înfășurare rezultând eforturi mai uniforme în spirele arcului;
- prin respectarea temperaturii minime la sfârșitul deformării în vederea evitării transformărilor structurale și apariției amorselor de fisuri;
- prin controlul proprietăților și structurii care să fie efectuat pe produs, nu numai pe probele martor pentru a putea evidenția cât mai precis influența procesului de deformare asupra structurii materialului;

5. Analizând rezultatele obținute în urma studiului aplicat pentru tratamentele termice propun ca fiind optimă adoptarea următorilor parametrii :

- temperatura de călire $T_{inc} = 860 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- temperatura cuptorului $T_{cuptor} = 880 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- durata de încălzire $t_{inc} = 30 \text{ min}$

Ca rezultat al folosirii acestor parametrii am obținut o duritate mai ridicată, iar studiul metalografic a confirmat calitativ prezența după călire a unei structuri dominată de martensită fină, deci o călire corespunzătoare.

6. Intervalul relativ mare de temperaturi și 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, și anume:

- realizarea unei căliri optime și unei reveniri în jurul valorii de $450 \text{ }^{\circ}\text{C}$;
- în condițiile unor solicitări mari la oboseală a arcurilor elicoidale se va proceda la creșterea caracteristicilor mecanice și a durității spre valori

maxime, iar condițiile de suprafață ale arcurilor obținute prin ecruisare să fie optime, ținând seama de duritățile mari adoptate pentru arc.

7. Din punct de vedere al rezistenței la oboseală a arcului, consider importante următoarele aspecte care trebuie respectate la prelucrarea mecanică a materialului :

- creșterea preciziei de înfășurare – care va conduce la eforturi distribuite uniform în spirele arcului:

- utilizarea unor scule și dispozitive fără defecte care ar putea să se imprime pe suprafața arcurilor, rezultând amorse de fisură;

- controlul structurii și proprietăților nu numai pe probe martor ci și pe arcuri, pentru a pune în evidență influența procesului de deformare asupra modificărilor structurale.

8. Pentru îmbunătățirea procesului de ecruisare, practicat la ora actuală remarc următoarele propuneri :

- trebuie folosite mai multe epruvete ALMEN care să fie amplasate în zone diferite ale arcului, astfel va rezulta o precizie superioară a gradului de ecruisare;

- introducerea unei operații suplimentare de ecruisare la cald, după executarea operației de ecruisare la rece, operație în urma căreia s-a constatat o creștere semnificativă a rezistenței la oboseală.

9. Subliniez constatarea că ruperea datorată solicitării la oboseală se produce în spira de capăt, la prima spirală activă, sau în secțiunea de mijloc a arcului unde în mod practic apar cele mai mari solicitări. Acest aspect a fost confirmat atât în încercările la oboseală cât și la simularea efectuată cu programul COSMOSWork 2005.

10. Am remarcat faptul că modalitățile de verificare a fiabilității vehiculelor feroviare nu diferă de cele folosite în cazul altor produse industriale complexe. Vehiculele feroviare sunt sisteme tehnice complexe cu durata de întrebuințare mare, viața de serviciu fiind de ordinul zecilor de ani, uzura lor morală fiind relativ lentă. În același timp prezintă o serie de particularități de care trebuie să se țină seama atunci când se stabilesc strategiile de control și programele de cercetare care să ateste fiabilitatea în condițiile respectării normelor de siguranța circulației.

11. Studiile experimentale asupra fiabilității amortizorului destinat echipării vagonului AVA 200 au 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 care determină o rezistență la oboseală optimă .

12. În timpul efectuării acestei teze am remarcat faptul că respectarea cu strictețe a caracteristicilor mecanice ale materialului, a parametrilor de proiectare, a tehnologiei de execuție și a celorlalte tratamente aplicate constituie condiții care pot asigura o rezistență la oboseală impusă din necesități de fiabilitate a arcurilor elicoidale metalice. Încercările mecanice experimentale prezentate, atât cu rezultate negative dar și pozitive întăresc această constatare și dau vigoare afirmației anterioare.

BIBLIOGRAFIE

1. Phillips J.W., Costello G.A. "Large Deflections of impacted helical springs", The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 51, 1972
2. Şinha 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
3. Balekics M., Cristuinea C., "Organe de maşini şi mecanisme-Calculul arcurilor", IPT, 1985
4. Constantinescu I.N., ş.a., "Metode noi pentru calcule de rezistenţă" Editura tehnică, Bucureşti, 1989
5. I. Goia – "Tehnologii şi echipamente noi în construcţia de maşini", Universitatea Transilvania Braşov, 1986
6. Dem. Urma, Gh. Ionescu, "Arcuri pentru vehicule", Ed. Transp. şi Telecom. 1961
7. D.D.Boiangiu, C.Constantinescu, L.Săveanu, "Arcuri", Ed. Tehnica Bucuresti 1958
8. B.Horovitz, "Organe de Maşini", Ed.Didact. si Pedag. Bucuresti 1969
9. „Arcuri elicoidale” STAS 5885-82
10. Goia I., "Rezistenţa materialelor", vol. II, Universitatea din Braşov 1981
11. Marcu Baleckics, C. Cristuinea, "Calculul arcurilor-Îndrumar de proiectare", IPT 1985
12. Gh. Buzdugan, "Rezistenţa materialelor", Editura Academică Bucureşti 1986
13. Manea Gh., Săveanu L. ş.a, „Organe de maşini”, vol. I – Ed. Tehnică Bucureşti 1956
14. Şulea Paul „ Curs de vagoane”, partea I, Institutul Politehnic Timişoara 975
15. „Instrucţiuni de exploatare a cuplei automate” Departamentul Căilor ferate din MTTc 1988
16. Babeu Tiberiu, ş.a., „Analize şi încercări pentru evaluarea duratei de viaţă a utilajelor”, Ed. Mirton Timişoara, 1999
17. Bejan M., "Rezistenţa materialelor", Cluj Napoca, 1982
18. Dumitru I., Faur N., "Rezistenţa materialelor", Editura Universităţii "Politehnica" Timisoara, 1997.
19. Boleanţu L., "Rezistenţa materialelor" vol. 2 partea a II-a, Timişoara 1990
20. Gunther W., "schwigfestigkeit", VEB Deutscher Verlag fur Grundstoffindustrie, Leipzig, 1973
21. Neğuţ N., "Rezistenţa materialelor.Teorie şi aplicaţii", Timişoara 2003

22. Ghita E., "Rezistență și durabilitate la contactul corpurilor", Timișoara 2000
23. Ghita E., "Dinamica vehiculelor feroviare", Timișoara 2006
24. Mănescu T. Șt., "Rezistența la solicitări variabile care apar în exploatarea vehiculelor feroviare", Reșița 2005
25. Cartiș I., "Tratamente termice – tehnologie și utilaje", Ed. Facla Timișoara 1982
26. Cartiș I. " Tratamente termochimice " Timișoara, 1988
27. Babeu T. –"Analize și încercări de rezistență pentru evaluarea duratei de viață a utilajelor grele" – Timișoara 1999
28. Cioclov D., " Rezistență și fiabilitate la solicitări variabile", Ed. Facla Timișoara 1975
29. Dumitru I., "Elemente de elasticitate, plasticitate și rezistența materialelor", Timișoara 2003
30. Copaci I., ș.a. "Rezistența la solicitări variabile care apar în exploatarea vehiculelor feroviare", Ed. Mirton Timișoara 2005
31. Costello G.A. "Radial expansion of impacted helical springs", Journal of Applied Mechanics, Trans ASME, vol.42, 1975, p 789-792
32. Marșavina L., "Metode experimentale de determinare a tencității la rupere", Timișoara 2006
33. Huțiu Gh., "Știința și ingineria materialelor – Analize și încercări" Ed.Politehnica Timișoara 2002
34. Mocanu D., ș.a. "Încercarea materialelor", Ed Tehnică Bucuresti 1982
35. Mădăras L., " Îmbinări elemente elastice", Ed. Politehnica Timișoara 2000
36. Popa D., " Modalități de îmbunătățire a caracteristicilor și fiabilității arcurilor pentru vehiculele de cale ferată", Timișoara 2008
37. Weber F.- "Comportarea materialelor metalice la solicitări statice și dinamice", Hunedoara 2001
38. Nika Lari A., "Shot-Peening"International Conference on Shot Peening, Paris 1981
39. Rusu O., Teodorescu M., Lascu-Simin N., "Oboseala materialelor. Baze de calcul" Ed.Tehnică Bucuresti 1993
40. Tănăsioiu A., "Influența elasticităților structurilor portante ale vehiculelor de cale ferată asupra siguranței ghidării", Teza doctorat, Bucuresti 2006
41. Sebeșan I., Copaci I., Tănăsioiu A., Olaru S. – " Asupra rigidității torsionale și siguranței deraierii boghiului Y 25 Lsdi cu sarcina pe osie de 25t/osie", Simpozionul Național de Material Rulant de Cale ferată, editia a II-a, București 2006.
42. Lăutaru M., "Relații de calcul pentru arcurile elicoidale ce lucrează sub acțiunea sarcinilor dinamice"- Referat nr. 1
43. Lăutaru M., "Calculul și determinarea duratei de viață a arcurilor elicoidale cu spire strânse" – Referat nr. 2
44. Lăutaru M., "Analiza energetică de deformație" – Referat nr. 3

45. Timoshenko S., "Rezistance de materiaux", vol I, II, Librairie Polytechnique G, Beranger, Paris-Liege, 1947, 1949
46. Deutch I., "Rezistența materialelor", Editura Didactică și Pedagogică, București 1979
47. Stokes V.R., "On the dynamic radial expansion of helical springs due to longitudinal impact", Journal of sound and Vibration, vol 35, 1974, pg.77
48. Tripa P., "Rezistența materialelor", vol I, Editura Mirton Timișoara 1999
49. Tripa P., "Rezistența materialelor", vol II, Editura Mirton Timișoara 2000
50. Abott M.B., "An introduction to the method of the characteristics", American Elsevier New York, 1966
51. Trușculescu M., "Materialotehnica", Editura Politehnica Timișoara 2005
52. Broek D., "Elementary Engineering Fracture Mechanics", Columbus, Ohio, USA, 1978
53. Dumitru I., Marșavina L., "Elemente de mecanica ruperii" -curs- Univ. "Politehnica" Timișoara, 2000
54. Goanță V., "Rezistența materialelor - noțiuni fundamentale", Editura Gh. Asachi Iași 2001
55. Radu. Gh., " Rezistența materialelor și elemente de teoria elasticității", vol. I și II, Editura Universității "Transilvania", Brașov, 2002.
56. Mocanu Fl., "Rezistența materialelor", Editura Cermi, Iași, 1998.
57. Alămoreanu, E., Buzdugan, Gh., Iliescu, N., ș.a., "Îndrumar de calcul în ingineria mecanică", Editura Tehnică, București, 1996.
58. Buzdugan. Gh., "Proiectarea de rezistență în construcția de mașini", Editura Academiei Române, București, 1998.
59. Faur N., "Elemente finite. Fundamente", Timișoara 2002
60. Sorohan St., "Metoda elementelor finite în ingineria mecanică, Programe și aplicații", Partea I, Universitatea "Politehnica" București, 1996.
61. Bejan M., „Unități de măsură”, Universitatea Tehnică Cluj Napoca 1996, 1998
62. Lawniki J., Cutler V. – „Effects of understressing and coxing on the fatigue limit of a traverse butt-welded joint”, Journal of Testing and evaluation, vol. 9, nr. 1, 1981
63. Chandrupatla T.R., Belegundu A.D., "Introduction to Finite Elements in Engineering", Prentice Hall International, Inc., New Jersey, 1991
64. Hârdău M., "Metoda elementelor finite , Curs"- Transilvania Press, Cluj, 1995.
65. F. Sabourin, E. Salle, "Calculs des structures par éléments finis", INSA Lyon, France, cours
66. Spiroiu M. – "Fiabilitatea și mentenanța vehiculelor feroviare", Editura MATRIXROM, 2006
67. Olariu, V., Sima, P., Achiriloaie, V., "Mecanica tehnică", Editura Tehnică, București, 1982.
68. Gherman Gh.A., "Rezistența materialelor", Ed. Mirton Timișoara 2003

69. Gherman Gh.A., "Noțiuni de elasticitate utilizate în rezistența materialelor", Ed. Mirton Timișoara 2003
70. Oprea Gh., Ștefan S., ș.a., "Metode numerice în rezistența materialelor", Editura Academiei militare, București, 1986.
71. Deutsch I., "Rezistența materialelor, Editura Didactica și Pedagogică, București, 1979
72. Burada C., Buga M., Crâsneanu Alex., "Elemente și structuri portante ale vehiculelor de cale ferată" Ed. Tehnică București 1980
73. Lăutaru M., „Analiza privind calculul arcurilor elicoidale cu spire strânse” - Știință și inginerie – vol.12. – editura AGIR 2007
74. Lăutaru M., "Considerații generale asupra calității arcurilor"- Buletinul AGIR Calitate. Mediu.an XIII nr. 1-2 /2008
75. Lăutaru M., „Studiul energetic comparativ al arcurilor frecvent utilizate în construcția de mașini” – Știință și Inginerie – vol. 13, Editura AGIR 2008
76. Lăutaru M., „Asupra deplasărilor laterale ale arcurilor elicoidale” – Buletinul AGIR .Management.Calitate.Mediu.An XIV nr. 2-3/2009
77. Lăutaru M. „ Soluția numerică a propagării deformației în arcurile elicoidale elastice” – Știință și inginerie – vol.16. – Editura AGIR 2009
78. Lăutaru M., "Analiza tensiunilor și deformațiilor prin metoda elementelor finite" Știință și inginerie – vol.17. – Editura AGIR 2010
79. Posea N., "Calculul dinamic al structurilor", Ed. Tehnica Bucuresti 1991
80. Nădășan St., ș.a., "Încercări și analize de metale" Ed. Tehnică București, 1965
81. Faur N – "Mecanica materialelor. Noțiuni fundamentale. Statica. Solicitări simple" Timișoara 2005
82. Mocanu D., "Încercarea materialelor", Timișoara 1982, 1986
83. Lăutaru M., Babeu T.D., "Încercări specifice pentru determinarea fiabilității amortizorilor pentru vagon AVA 200 – în curs de publicare
84. Lăutaru M., Babeu T.D., „Comportarea la oboseală a arcurilor elicoidale cilindrice” – în curs de publicare 2010
85. Lăutaru M., Babeu T.D., „Simularea cu ajutorul metodei elementului finit a încercării la compresiune a arcului elicoidal exterior al boghiului Y32 R” – în curs de publicare 2010
86. **** - ASTM E 466-82 – Conducting Constant Amplitude Axial Fatigue Test of Metallic Materials
87. **** - ASTM E 606-80 – `Constant Amplitude Lov Cicle Fatigue Testing`
88. **** - ASTM E 647-83 –` Constant Load Amplitude Fatigue Crack Growth Rates Above 10⁻⁸ m/cicle`
89. **** - DIN 17221 – "Oțeluri pentru arcuri"
90. **** - DIN EN 180 6506-1 – "Testul de duritate Brinell"
91. **** - ERRI B12 RO 17 – "Program încercări pentru rezistență vagoane marfă"
92. **** - FISA UIC 510-3 –"Încercări de rezistență pe stand la boghiuri pe două osii"

93. **** - FISA UIC 822 0 – “Specificația tehnică pentru furnitura de arcuri elicoidale de compresiune formate la cald pentru material rulant motor și remorcat”
94. **** - EN 10720-1 – “Steel wire for mechanical springs – Part 1; patented cold drawn unalloyed spring steel wire”, 2001
95. **** - EN 10270-2 – “Steel wire for mechanical springs – Part 2; oil hardened and tempered spring steel wire”, 2001
96. **** - EN 10060 – “Hot rolled round steel bars for general purposes – dimensions and tolerances on shape and dimensions”, 2003
97. **** - EN 10089 – “Hot rolled steels for quenched and tempered springs – technical deliver conditions”, 2002
98. **** - EN 10221 – “Surface quality classes for hot rolled bars and rods – technical deliver conditions”, 1995
99. **** - ISO/R 377 – “Steel and steel product – Location and preparation of stamples and test pieces for mechanical testing”, 1977
101. **** - ISO/R 642 – “Steel – Hardenability Test byend Queching (Jominy test}, 1999
102. **** - ISO/R 79 – “Brinell Hardness Test (HB)”, 1968
103. **** - ISO/R 80 – “Rockwell Hardness Test (B and C scales)”, 1968
104. **** - ISO/R 404 – “Steel and steel product – General Technical Delivery Requirements”, 1992