

UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"
TIMIȘOARA

BIBLIOTECA CENTRALĂ

Nr. inv. 631.912

Dulap 369 Lit. B

„POLITEHNICA” TIMIȘOARA
ATEA DE MECANICĂ
EZISTENȚA MATERIALELOR

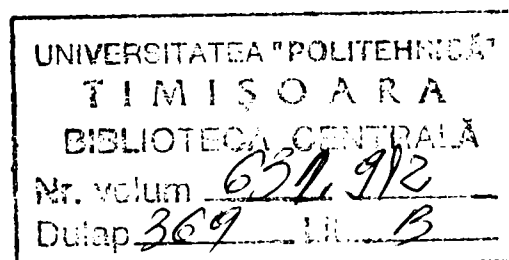
Mihai Olariu

**STUDII ȘI CERCETĂRI
DE ANALIZA STRUCTURILOR PORTANTE
ALE INSTALAȚIILOR DE RIDICAT,
ÎN VEDEREA PRELUNGIRII FUNCȚIONĂRII
ACESTORA PESTE DURATA DE VIAȚĂ
NORMATĂ**

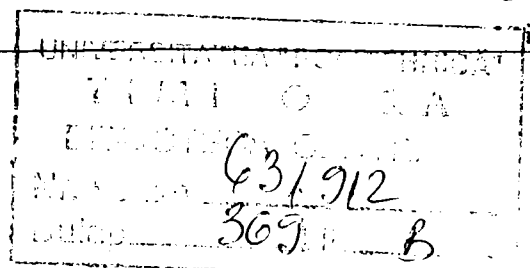
Teză de doctorat

Conducător științific:

*prof. dr. ing. EUR ING Tiberiu Dimitrie Babeu
Membru titular al Academiei de Științe Tehnice*



2001

**CAPITOLUL I INTRODUCERE**

I.1	OBIECTUL ȘI SCOPUL PREZENTELOR STUDII ȘI CERCETARI	1
I.2	STRUCTURA EXFUNERII	4

CAPITOLUL II STADIUL ACTUAL PRIVIND EVALUAREA ȘI PRELUNGIREA DURATEI DE VIAȚĂ A STRUCTURILOR PORTANTE

II.1	ASPECTELE TEHNICE ANALIZABILE LA STRUCTURILE PORTANTE CARE AU ATINS DURATA DE VIAȚĂ NORMATĂ	7
II.2	PRINCIPIILE STAS 8290-83 PRIVIND VERIFICAREA LA "REZISTENȚA ÎN EXPLOATARE" A ELEMENTELOR STRUCTURILOR PORTANTE	9
II.2.1	Generalități	9
II.2.2	Încărcări de calcul	10
II.2.3	Clasificarea structurilor portante ale IR	10
II.2.3.1	Clasa de utilizare	10
II.2.3.2	Starea de încărcare	11
II.2.3.3	Definirea tipurilor de spectre de încărcare (de eforturi unitare) cu ajutorul coeficientul "p"	12
II.2.4	Verificarea la rezistența în exploatare	16
II.2.4.1	Descrierea fenomenului de oboseală	16
II.2.4.2	Calculul de verificare la rezistența în exploatare	18
II.3	PREVEDERILE "Eurocode 3, ENV 1993-1-1, PRIVIND VERIFICAREA LA LIMITA DE OBOSEALĂ	22
II.3.1	Generalități	22
II.3.1.1	Scop	22
II.3.1.2	Obiect	22
II.3.1.3	Condiții de aplicabilitate a metodei de calcul de verificare la oboseală	22
II.3.1.4	Condiții în care verificarea la oboseală este obligatorie	23
II.3.1.5	Definiții	23
II.3.1.6	Simboluri ale mărimilor caracteristice solicitării la oboseală	30
II.3.2	Încărcări la oboseală	31
II.3.3	Coeficienți de siguranță parțiali	31
II.3.3.1	Generalități	31
II.3.3.2	Coeficientul de siguranță parțial pentru încărcarea la oboseală, γ_{FF}	32
II.3.3.3	Coeficientul de siguranță parțial pentru rezistența la oboseală, γ_{MR}	32
II.3.4	Specetre de tensiune la oboseală	33
II.3.4.1	Calculul tensiunilor	33
II.3.4.2	Ecarturi de tensiuni în materialul de bază	33
II.3.4.3	Ecarturi de tensiuni în suduri	33
II.3.4.4	Spectru al ecarturilor de tensiune de calcul	33
II.3.5	Metode de verificare la oboseala	34
II.3.5.1	Generalități	34
II.3.5.2	Verificarea la oboseală pe baza ecarturilor de tensiune nominală	34
II.3.5.3	Verificarea la oboseală bazată pe ecarturi de tensiuni geometrice	37
II.3.6	Rezistență la oboseală	37

II.3.6.1	Generalități	37
II.3.6.2	Curbe de rezistență la oboseală pentru detalii clasificate	38
II.3.6.3	Curbe de rezistență la oboseală pentru detalii neclasificate	41
II.3.7	Modificări ale rezistenței la oboseală	41
II.3.7.1	Ecarturi de tensiuni în detalii fără sudură sau în detalii cu tensiuni reduse	42
II.3.7.2	Influența grosimii	42
II.3.7.3	Curbe modificate ale rezistenței la oboseală	42
II.3.8	Tabele de clasificare	42
II.4	MECANICA RUPERII	43
II.4.1	Moduri de ruperi	43
II.4.2	Viteza de propagare a fisurii în condiții de oboseală	45
II.4.3	Calculul față de ruperea fragilă, după Eurocode 3, ENV 1993-1-1	48
II.4.3.1	Rezistența față de ruperea fragilă	48
II.4.3.2	Procedeul de calcul	48
II.5	Îmbătrânirea metalului	52
II.6	MODIFICĂRI ÎN GEOMETRIA STRUCTURII	53
II.7	PRINCIPALELE ETAPE ÎN EVALUAREA ȘI PRELUNGIREA DURATEI DE VIATĂ A CONSTRUCȚIILOR PORTANTE ALE INSTALAȚIILOR DE RIDICAT	54
II.7.1	Faza preliminară, de adunare de date	54
II.7.1.1	Fișa utilajului	54
II.7.1.2	Constatare la fața locului	55
II.7.2	Analiza datelor preliminare	57
II.7.3	Reconstituirea istoricului de încărcare	57
II.7.3.1	Analiza stării de oboseală la utilaje cu istoricul de încărcare cunoscut	58
II.7.3.2	Analiza stării de oboseală la utilaje cu istoricul de încărcare necunoscut	59
II.7.3.3	Utilajul a lucrat în condiții și nu există nici o informație referitoare la regimurile de funcționare.	59
II.7.4	Criterii de decizie pentru încercări distructive, complementare la analiza stării de oboseală	60
II.7.5	Decizia după expertiză	61
II.7.6	Viteza de propagare a fisurii, în condiții de sollicitare variabilă	61
II.8	CONCLUZII	62
CAPITOLUL III STUDIU STATISTIC PRIVIND DEFECTAREA ÎN EXPLOATARE A STRUCTURILOR PORTANTE		63
III.1	GENERALITĂȚI	63
III.2	SITUAȚIA AVARIILOR ÎN ROMÂNIA, ÎN PERIOADA 1970...1990	63
III.2.1	Date statistice despre avariile la SP ale IR	63
III.2.2	Descrierea unor avarii deosebite ale SP ale IR	64
III.2.3	Situția defectărilor grave la utilajele grele	67
III.3	SITUAȚIA AVARIILOR ÎN GERMANIA (FOST RDG), ÎN PERIOADA 1945...1984	68
III.4	SITUAȚIA AVARIILOR ÎN SUECIA	77
III.5	CONCLUZII	80

CAPITOLUL IV	STUDII PRIVIND APLICAREA NORMATIVELOR EUROCOD	
PENTRU STĂRI LIMITĂ		81
IV.1	EUROCODURI STRUCTURALE	81
IV.2	CONCEPTE DE SIGURANȚĂ	82
IV.3	ADAPTAREA PREVEDERILOR "EUROCODE 3"	86
IV.4	EXEMPLE DE LUCRĂRI ÎN CARE S-A UTILIZAT "EUROCODE 3"	93
IV.4.1	Evaluarea duratei de viață la elemente fără fisuri	93
IV.4.1.1	Fișa utilajului	93
IV.4.1.2	Prelucrarea datelor experimentale și din fișa utilajului	93
IV.4.1.3	Alegerea coeficienților de siguranță	93
IV.4.1.4	Calculul parametrilor principali ai curbei Wöhler	93
IV.4.1.5	Calculul numărului de cicluri N_i corespunzător ecarturilor de tensiune $\Delta\sigma_i$	98
IV.4.1.6	Calculul degradărilor parțiale și cumulara lor	99
IV.4.2	Evaluarea riscului ruperii fragile	100
IV.4.2.1	Prezentarea datelor de bază ale cazului analizat	100
IV.4.2.2	Calculul temperaturii minime, fără risc de rupere fragilă, pentru <i>grindă fără fisură</i>	100
IV.4.2.3	Calculul temperaturii minime, fără risc de rupere fragilă, pentru <i>grindă cu fisură</i>	103
IV.4.2.4	Încercări ale materialului la care s-a evaluat ruperea fragilă	104
IV.4.2.5	Analiza istoricului de încărcare a podului rulant	105
IV.4.2.6	Calculul de verificare a grinzilor principale	106
IV.5	CONCLUZII	111
CAPITOLUL V	STUDII PRIVIND EXPERTIZAREA UTILAJELOR GRELE DESTINATE	
EXCAVĂRII SAU MANIPULĂRII CĂRBUNELUI		113
V.1	CONSIDERAȚII PRIVIND NECESITATEA EXPERTIZĂRII UTILAJELOR GRELE	113
V.2	METODOLOGII DE ESTIMARE A DURATEI DE VIAȚĂ A ELEMENTELOR DE REZISTENȚĂ	115
V.2.1	Activități specifice metodologiilor de expertizare	115
V.2.2	Factorii care influențează sensibilitatea la fisurare și ruperea fragilă	121
V.2.3	Stabilirea elementelor de rezistență (ER) care au solicitări maxime în serviciu; condițiile de debitare și refacere a ER analizat	121
V.2.3.1	Stabilirea ER cu solicitare maximă	121
V.2.3.2	Debitarea probelor și refacerea ER din care se extrag probele	122
V.3	ÎNCERCĂRI MECANICE DE MATERIAL PENTRU DETERMINAREA SENSIBILITĂȚII LA FISURARE ȘI LA RUPERE FRAGILĂ	123
V.3.1	Clasificarea încercărilor mecanice de material	123
V.3.2	ÎNCERCĂRI STATICE	125
V.3.2.1	Încercarea la tracțiune	125
V.3.3	ÎNCERCĂRI DINAMICE	125
V.3.3.1	Încercarea la tracțiune dinamică	125
V.3.3.2	Încercarea la încovoiere prin șoc, pe epruvete cu creștătură în U	125
V.3.3.3	Încercarea la încovoiere prin șoc, pe epruvete cu creștătură în V	126
V.3.3.4	Încercarea la încovoiere prin șoc, pe epruvete încărcate cu sudură	129
V.3.4	ÎNCERCĂRI DE MECANICA RUPERII	130
V.3.4.1	Determinarea tenacității la rupere în condițiile stării plane de deformație; metoda K_{IC}	130
V.3.4.2	Determinarea deplasării la deschiderea fisurii, pe baza înregistrării forță-deplasare	137

V.3.4.3	Determinarea experimentală a valorii critice a integralci de contur J_{IC}	142
V.3.5	METODOLOGII DE DETERMINARE A REZISTENȚEI LA OBOSEALĂ A ELEMENTELOR DE REZISTENȚĂ ALE STRUCTURILOR PORTANTE	158
V.3.5.1	Solicitări caracteristice pentru UG	158
V.3.5.2	Etapele caracteristice ale degradării	160
V.3.5.3	Modelarea propagării fisurii	165
V.3.5.4	Rezistența la oboseală. Curba Wöhler	170
V.3.5.5	Încercări la oboseală	171
V.4	CONCLUZII	189
V.4.1	Concluzii privind aplicarea metodologiilor de analiză a sensibilității la fisurare și rupere fragilă pentru expertizarea UG	189
V.4.2	Concluzii asupra încercărilor la oboseală	190
CAPITOLUL VI CERCETĂRI PRIVIND ESTIMAREA DURABILITĂȚII ELEMENTELOR DE REZISTENȚĂ, APLICÂND CONCEPTELE MECANICII RUPERII		193
VI.1	STUDIUL ESTIMĂRII SIGURANȚEI ÎN EXPLOATARE ȘI A DURABILITĂȚII UNOR GRINZI	193
VI.1.1	Determinarea durabilității unei grinzi cu fisură centrală	193
VI.1.2	Determinarea durabilității unei grinzi cu fisură situată la $\frac{1}{4}$ din din distanța dintre reazeme	196
VI.1.3	Calculul factorului de intensitate a tensiunii pentru grindă solicitată la incovoiere, cu fisură semieliptică	202
VI.2	CERCETĂRI PRIVIND ESTIMAREA DURABILITĂȚII TIRANȚILOR EXCAVATOARELOR DIN EXPLOATĂRILE MINIERE, APLICÂND CONCEPTELE MECANICII RUPERII	210
VI.2.1	Funcția tiranților în ansamblul SP	210
VI.2.2	Compoziția chimică a tiranților	211
VI.2.3	Caracteristici statice	212
VI.2.4	Comportarea la solicitări variabile a materialului tirantului	214
VI.2.5	Încercări de reziliență	220
VI.2.5.1	Încercări de reziliență pe epruvete cu creștătura în U și în V	220
VI.2.5.2	Cercetări privind comportarea la solicitări axiale cu șoc	221
VI.2.6	Determinarea tenacității la rupere	225
VI.2.6.1	Determinarea factorului critic de intensitate a tensiunii prin metoda Chevron	225
VI.2.6.2	Determinarea factorului critic de intensitate a tensiunii, pe baza corelării cu celelalte caracteristici de material	229
VI.2.6.3	Determinarea tenacității la rupere la temperaturi scăzute	230
VI.2.7	Contribuții la estimarea durabilității tiranților excavatoarelor în ipoteza apariției unor fisuri	232
VI.2.8	Estimarea durabilității elementelor de îmbinare ale tirantului unui excavator	244
VI.2.8.1	Alcătuirea constructivă a îmbinărilor unui tirant	244
VI.2.8.2	Determinarea prin analiză cu elemente finite a stării de tensiune din urechea tirantului de excavator	245
VI.2.8.3	Determinarea factorului de intensitate a tensiunii pentru o fisură ce se dezvoltă din oficiu circular	249
VI.2.8.4	Determinarea durabilității urechii sub acțiunea sarcinilor variabile	251
VI.3	CONCLUZII PRIVIND APLICAREA CONCEPTELOR MECANICII RUPERII LA EVALUAREA DURATEI DE VIAȚĂ A UTILAJELOR GRELE	253

CAPITOLUL VII CONCLUZII	257
<i>ANEXE</i>	263
BIBLIOGRAFIE	291

CAPITOLUL I

INTRODUCERE

1.1 OBIECTUL ȘI SCOPUL PREZENTELOR STUDII ȘI CERCETARI

Instalațiile de ridicat (IR) sunt utilaje relativ complexe, executate într-o mare diversitate de tipuri constructive (A se vedea SR ISO 4306-1 [228]) și mărimi dimensionale, întâlnite în aproape toate ramurile economice. În exploatare, ele trebuie să se caracterizeze, permanent, printr-o mare siguranță, defectarea unor părți componente sau pierderea stabilității putând avea uneori consecințe extrem de grave, cum ar fi: afectarea sănătății, pierderi de vieți omenești, avarii, cu pierderea de bunuri materiale.

Siguranta în exploatare, implicit asigurarea securității personalului care lucrează cu IR, sau se afla în preajma lor, a făcut ca proiectarea, exploatarea, întreținerea și repararea să implice conformarea strictă cu prevederile a numeroase documente normative, inclusiv reglementări ale unor autorități ale statului. Un aspect important reglementat este durata de viață normală, adică timpul, exprimat de obicei în ani, în care utilajul trebuie să se găsească, în stare bună, în exploatare. Durata de viață normală a IR din România a fost reglementată, de-a lungul anilor, succesiv, de Legea nr.62/1969, de Decretul NR 393/1976 (și Normativul MICM nr.57/1978), de HG nr.266/1994, iar actualmente este stabilită prin HG nr.964/1998. Duratei de viață i se impun limite, din rațiuni care țin atât de latura tehnică cât și de cea economică. În ultima reglementare, HG nr.964/1998, noțiunea (cu atributul oarecum impropriu "normală") este definită astfel: "Durata normală de funcționare reprezintă durata de utilizare a activului respectiv, în care exploatarea acestuia aduce profit, respectiv veniturile realizate sunt mai mari decât cheltuielile necesare pentru funcționare, întreținere, reparare. În consecință, durata de utilizare este mai redusă decât durata de viață fizică a activului respectiv."

Duratele "normale" valabile actualmente, care corespund cu duratele de amortizare, s-au redus față de reglementările anterioare. În acest mod, majoritatea IR, sub aspectul amortizării, au durata de viață depășită și pot fi casate. Dar numeroși deținători de instalații, din motive economice pertinente, au solicitat și solicita de la ISCIR – organismul guvernamental de supraveghere - și de la proiectanți avize pentru admiterea funcționării instalațiilor și după atingerea perioadei respective. Ultima reglementare, HG nr.964/1998, admite, condiționat, prelungirea funcționării peste durata de viață normată:

"Menținerea în continuare în funcționare a mijloacelor fixe care pot afecta protecția vieții, a sănătății și a mediului (... , mașini de ridicat etc.) după durata de viață normală, majorată cu maximum 20 %, se va putea face numai pe baza avizului organismelor naționale de atestare competente."

Responsabilitatea hotărârii de prelungire a funcționării peste durata de viață normată pretinde, așa cum rezultă și din alineatul de mai sus, un răspuns competent, de la un factor tehnic de înaltă calificare. Inginerii experți, specialiștii care, potrivit ISO 9927-1:1994 [137], au calitatea de coordonatori ai activităților de evaluare a stării tehnice, vor lucra sistematic, productiv și obiectiv, dacă dispun de metodologii de lucru și de proceduri adecvate, rezultate din studii și cercetări de determinare a stării tehnice reale a utilajelor la încheierea duratei de viață normată. Se înțelege că în rezolvarea problemei trebuie pornit de la ansamblul definitoriu, primordial, pentru alcătuirea constructivă și pentru funcționarea în siguranță a utilajului. Acesta ansamblu este structura portantă (sinonime: structură de rezistență, construcție metalică; în lucrare se prescurtează: structură sau SP), care reprezintă suportul, "scheletul", pe care se amplasează mecanismele, instalația electrică și celelalte părți componente ale IR. Este evident, chiar și pentru cei mai puțin familiarizați cu această categorie de utilaje, că neîndeplinirea condițiilor tehnice de către structură, impun înlocuirea utilajului, pe când mecanismele, instalația electrică sau celelalte componente pot fi înlocuite în situația în care nu mai corespund calitativ.

Problema răspunsului dacă o SP mai poate fi utilizată sau trebuie casată este dificilă și greu de rezolvat în mod unitar, deoarece în țară nu există documente normative (reglementări, standarde etc.) referitoare la expertizarea complexă a stării tehnice ale construcțiilor portante aparținând IR care au durata de viață depășită.

Prescripțiile ISCIR, elaborate de autoritatea de supraveghere a proiectării și exploatării IR în România, nu au prevederi la obiect. Încercările statice și dinamice, prevăzute de R1-87 al ISCIR [192], cu măsurarea săgeții statice, nu sunt concludente la structurile utilajelor cu durata de viață depășită. De asemenea, nu se dispune de informații privind existența în străinătate a unor documente normative, metodologii sau proceduri pe tema referită.

Realitatea economică din ROMÂNIA de după 1989 a făcut ca la Prompt SA Timișoara-proiectantul mării majorități a IR din țară din ultimii 50 de ani - să se realizeze studii și cercetări, abordându-se aspecte importante ale problemei. Astfel, la Prompt SA s-a finalizat o metodologie de apreciere a stării de oboseală a structurilor instalațiilor cu durata de viață depășită (A se vedea [199], [201], [203], [202]). Prezenta lucrare, vizând, pe lângă fenomenul de oboseală, și alte aspecte esențiale, are ca **obiect**, analizarea unui vast material bibliografic (A se vedea Bibliografie), în care sunt incluse și studiile și cercetările autorului legate de tema propusă, mai ales din perioada 1995...2001, și, pe această bază, tragerea de concluzii principiale utilizabile în elaborarea de metodologii cât mai cuprinzătoare de expertizare a stării tehnice a structurii portante a unei IR (sau a unui utilaj cu structură constructivă asemănătoare) cu durata de viață depășită.

Scopul, exprimat în titlul lucrării, este ca prin metodologiile de expertiză să se poată decide dacă, în ce condiții și cât timp se mai poate utiliza construcția portantă peste durata de funcționare normată a instalației sau dacă utilizarea nu mai este posibilă. Efectul economic al aplicării metodologiei este substanțial, dacă se are în vedere numărul mare de IR cu durata de viață normată depășită existente în țară. În afară de această categorie de "vârstă", metodologia poate fi aplicată și la expertizări complexe ale construcțiilor portante, chiar dacă utilajele nu au atins durata de viață normată, dar au fost exploatare intensiv, în condiții (regim) de lucru mai grele față de cele estimate și luate în calculele de proiectare. Nu trebuie exclusă posibilitatea de aplicare a metodologiei la expertizarea stării tehnice a utilajelor oferite la "secand-hand". Dacă se are în vedere că există și utilaje cu alcătuire constructivă similară IR (mașini de vehiculat cărbune în depozitele CET sau excavatoare și alte utilaje "grele" specifice exploatărilor miniere de suprafață - prescurtat, în lucrare, UG etc.), se poate aprecia că sfera de aplicare a rezultatelor cercetării este cu mult mai largă

1.2 STRUCTURA EXPUNERII

Prezenta lucrare, după acest **"CAPITOLUL I - INTRODUCERE"**- tratează, succesiv :

In **"CAPITOLUL II - Stadiul actual privind evaluarea și prelungirea duratei de viață a structurilor portante"** se face o expunere a aspectelor majore care se analizează actualmente la o structură de instalație care a atins limita duratei de viață normale. Se prezintă, de asemenea, metodologia de analiză a stării de oboseală a SP ale IR care au durata de viață depășită, metodologie realizată de Prompt SA ;

In **"CAPITOLUL III - Studiu statistic privind defectarea în exploatare a SP"** sunt prezentate cauzele defectărilor SP, așa cum au fost constatate, clasificate și înregistrate (clasate) în statistici de diferite proveniențe;

"CAPITOLUL IV - Studii privind aplicarea normelor EUROCODE pentru stări limită" analizează lucrările în care s-au utilizat prevederi ale **"EUROCODE 3"**, [106]; expune modul de integrare a prevederilor **"EUROCODE 3"** în metodologia de analiză a stării structurii.

Capitolele V și VI, prin materialul expus, constituie o continuare și o dezvoltare a metodologiei descrise la capitolul II.

În **"CAPITOLUL V - Studii privind expertizarea utilajelor grele destinate excavării sau manipulării cărbunelui"** autorul sistematizează cunoștințele utilizabile în expertizarea acestor utilaje complexe, ale căror SP sunt similare constructiv cu cele ale IR și care au solicitări similare în exploatare.

"CAPITOLUL VI - Cercetări privind estimarea durabilității elementelor de rezistență, aplicând conceptele mecanicii ruperii" prezintă, din cercetări proprii și colaborări în care a fost implicat autorul și din literatura tehnică recentă, exemple de lucrări tipice de evaluare a duratei de viață pentru elemente de rezistență puternic solicitate și care ajung să aibă fisuri.

In **"CAPITOLUL VII – Concluzii"**, potrivit scopului lucrării, se trag concluzii asupra ansamblului lucrării, asupra utilizării studiilor și cercetărilor autorului în viitoarele

metodologii de expertizare a SP ale IR și ale utilajelor grele (UG), în vederea luării unei decizii corect fundamentate tehnic în cazurile când se solicită prelungirea funcționării acestora peste durata de viață normată, în condiții de siguranță a utilajului și de securitate a personalului.

Urmează paginile de Anexe.

Ultima parte prezintă o "BIBLIOGRAFIE" a lucrărilor utilizate în realizarea prezentei expuneri. Ca documente normative au fost citate mai ales standardele care erau în vigoare la data executării lucrărilor prezentate, neexistând intenția unei liste exhaustive de standarde în vigoare la data redactării prezentei.

În lucrare, pentru economie de text se utilizează curent prescurtările, IR, UG, SP, introduse mai sus. Termenul de "utilaj", în contextul adecvat, poate semnifica, după caz, IR, UG sau SP.

Capitolul II

STADIUL ACTUAL PRIVIND EVALUAREA ȘI PRELUNGIREA DURATEI DE VIAȚĂ A STRUCTURILOR PORTANTE

II.1 ASPECTELE TEHNICE ANALIZABILE LA STRUCTURILE PORTANTE CARE AU ATINS DURATA DE VIATA NORMALĂ

Așa cum s-a arătat în "CAPITOLUL 1- Introducere", nu există informații despre existența în străinătate a unor documente normative sau metodologii referitoare la expertizarea complexă a stării tehnice a structurii portante (SP) aparținând unei instalații de ridicat (IR) sau unui utilaj cu soluție constructivă similară (mașini de vehiculat cărbune în depozite CET sau utilaje "grele" din carierele de cărbune – UG), care a atins durata de viață normală. Preocupări există, așa cum rezultă din titlurile unor lucrări citate în bibliografie [124], [272]. Lipsa de informații poate fi explicată și prin presupunerea că există o anumită lipsă de transparență în publicarea de informații despre lucrări concrete, din cauza dificultăților de generalizare, a faptului că există încă suficiente aspecte neaprofundate; s-ar mai putea presupune lipsa transparenței din motive de copy-right, dar această ipoteză nu poate primi un răspuns ferm, întrucât există oferte și reclame pentru reparații [2], dar nu în mod explicit pentru asemenea expertizări, așa că mai curând se poate reține prima ipoteză.

De asemenea, nici în țară nu există documente normative (standarde, reglementări, prescripții) cu această temă.

Stadiul actual în țară al evaluării duratei de viață a unui utilaj care a fost exploatat o anumită perioadă de timp (cicluri) poate fi considerat a fi exprimat succint de metodologia elaborată și practică de Prompt SA Timișoara (expusă la cap. II). Metodologia are la bază numeroase studii și cercetări în domeniu, citate în mod

expres și/sau identificabile la bibliografia de la finele studiului; dintre acestea, lucrări reprezentative aparțin cadrelor didactice de la Universitatea Politehnică Timișoara. Un rol important în elaborarea metodologiei l-a avut experiența îndelungată și diversificată a Prompt SA: proiectare SP pentru IR, pentru mașini de vehiculat cărbune în CET și pentru utilaje grele din exploatarea miniere de suprafață - în peste 45 de ani; probe și măsurări, prin Laboratorul de încercări – timp de peste 25 de ani ; expertizări la instalații și structuri – peste 5 ani. Metodologia ține seama de "regulile tehnice recunoscute" ("anerkannte Regeln der Technik") [263]”, inclusiv de un recent document normativ al CEN, organismul de standardizare al Uniunii Europene, anume : Eurocode 3, ENV 1993-1-1[107] . Principalele probleme tehnice care se analizează, potrivit metodologiei Prompt SA, la un utilaj care a fost exploatat o anumită perioadă (care are “un istoric de solicitare”) sunt legate de:

- Oboseala materialelor, care au fost supuse unor sarcini de exploatare reale;
- Mecanica ruperii

Ruperea poate fi efectul nedorit al oboselei. Se analizează mai ales ruperea fragilă – manifestare catastrofală, dependentă în mare măsură de oboseală, dar consecință și a altor factori;

- Modificări în geometria structurii.

Expunerea de prezentare a stadiului actual de evaluare va dezvolta aspectele de mai sus, insistând pe componenta principală – oboseala, care este una din cauzele ruperii, implicit a celei fragile. Aspectele mai puțin prezente sau mai puțin aprofundate în metodologia actuală se vor prezenta în capitolele V și VI.

II.2 PRINCIPIILE STAS 8290-83 PRIVIND VERIFICAREA LA “REZISTENȚA ÎN EXPLOATARE” A ELEMENTELOR STRUCTURILOR PORTANTE

II.2.1 Generalități

Proiectarea IR, implicit a structurilor lor portante, începe cu ceea ce SR EN 292-1 [225], la capitolul 5, numește “limitele mașinii”, acestea fiind: de utilizare, de spațiu, de timp. Ultima limită numită vizează stabilirea “duratei de viață” previzibile, ținând cont de utilizarea prevăzută a IR (“limita de utilizare”). Luarea în calcul a “duratei de viață” se face de regulă conform unor documente normative, în țara noastră problema soluționându-se prin prevederile standardului [244].

Este firesc ca, **după o anumită perioadă de funcționare**, la abordarea problemei rezervei de viață rămase să se pună întrebarea dacă nu se poate apela la datele de calcul folosite la proiectare. De aceea, prezentarea stadiului atins în evaluarea și prelungirea duratei de viață a structurilor portante începe cu o expunere succintă a **principiilor standardului utilizat curent în proiectare**, referitor la modul de calcul la oboseală al structurilor. Pentru aspectele prezentate prea sumar în [244], se fac scurte comentarii și /sau completări, dacă se apreciază că vin în sprijinul clarității expunerii.

Se vor prezenta apoi principiile calculului la oboseală din “Eurocode 3, ENV 1993-1-1: Design of steel structures. Part 1.1: General rules and rules for buildings”, [107], document normativ al UE în care, printre altele, sunt cuprinse **cele mai recente prevederi tehnice** normate din domeniul proiectării structurilor metalice cu durată de viață limitată; prevederi ale acestui document au fost înglobate în metodologia, elaborată de Prompt SA, privind aprecierea duratei de viață consumate, respectiv disponibile.

Apoi urmează o scurtă prezentare a problemelor de mecanica ruperii și de măsurări geometrice.

Expunerea va continua cu prezentarea **metodologiei actuale promovate de Prompt SA**, care se poate aprecia că **reflectă stadiul actual**, din țară, al evaluării duratei de viață.

În redactare, se folosește terminologia și noțiunile standardelor române în vigoare sau, în lipsa standardelor române adecvate, termenii și /sau noțiunile utilizate în sursa de informație, după caz: standard internațional - ISO, standard european - EN, Eurocode sau alte lucrări relevante din literatura tehnică.

II.2.2 Încărcări de calcul

În componentele constitutive ale unei IR, indiferent de situația în care se află instalația – funcționare, nefuncționare, montaj sau transport – există solicitări mecanice provocate de diverse cauze. Aceste cauze, multiple și lucrând aleator, sunt denumite, în [230] și [244], capitolul 2, acțiuni, iar forțele corespunzătoare acțiunilor – încărcări. La calculele în regim static, regim prevăzut de majoritatea documentelor normative, efectele acțiunilor care se manifestă dinamic, se iau în considerare prin aplicarea de coeficienți dinamici la valoarea statică a încărcărilor. Acțiunile nu sunt constante, ele variază mai mult sau mai puțin aleator, ca durată, frecvență, intensitate, mod de schimbare a parametrilor, și se manifestă în diverse combinații. Pentru calcule, modul de combinare, bazat pe prelucrări statistice, este stabilit prin documente normative, în România – [244], iar pe plan internațional – de [136], rezultând grupări de acțiuni, respectiv grupări de încărcări; grupările din [244], capitolul 3, sunt denumite: fundamentale, PTP; fundamentale, PT; speciale, PTE.

II.2.3 Clasificarea structurilor portante ale IR

În funcție de modul cum se preconizează a fi exploatată, de condițiile (regimul) de lucru prevăzute - de către clientul care comandă execuția /cumpărarea sau de către producător (la produsele de serie) -, fiecare IR trebuie încadrată, încă din această fază (comandă de execuție /cumpărare sau definitivare a temei de proiectare), într-o **grupă de funcționare**, potrivit clasificării din [244], punctul 5.9. și [227], (în acest document denumirea este de grupă de clasificare). Grupa de funcționare, noțiune de referință contractuală și tehnică, este caracterizată de două elemente: *clasa de utilizare* și *starea de încărcare*. Din combinarea claselor de utilizare și a stărilor de încărcare estimate, rezultă pentru IR, structurile portante și elementele acestora, potrivit [244], 6 grupe de funcționare (clasificare), notate: I,II,III,IV,V,VI. Grupele din [244] coincid cu cele ale standardului german [88] și sunt stabilite pe aceleași principii ca și în [109] și [227].

II.2.3.1 Clasa de utilizare

a). O IR execută acțiuni repetate, cicluri de încărcare, durata unui ciclu de încărcare fiind timpul scurs între începutul procesului de ridicare a unei sarcini și momentul când IR ajunge în situația de a efectua un nou proces de ridicare [244]. Numărul ciclurilor pe toată durata de viață constituie **frecvența de încărcare** (de utilizare) a IR și se evaluează pe baza condițiilor de exploatare prevăzute, a duratei medii a unui ciclu de încărcare și a duratei de viață a utilajului, acestea fiind date inițiale, de competența celui care comandă instalația. Această frecvență este de fapt și frecvența de încărcare a ansamblului **structurii portante**. În [244], punctul 5.9.1.1, se face o clasificare a IR, respectiv a structurilor portante, în 4 clase de utilizare, caracteristicile de definire fiind reproduse în tabelul II - 1.

Tabelul II-1 [244]

Clasa de utilizare	Definiție	Domeniul convențional de cicluri de încărcare (cicluri de eforturi unitare)
A	Utilizare ocazională, neregulată, urmată de pauze lungi	$2 \cdot 10^4 \leq N \leq 2 \cdot 10^5$
B	Utilizare regulată, dar intermitentă	$2 \cdot 10^5 \leq N \leq 6 \cdot 10^5$
C	Utilizare regulată, continuă	$6 \cdot 10^5 \leq N \leq 2 \cdot 10^6$
D	Utilizare regulată, în condiții grele de exploatare	$2 \cdot 10^6 < N$

Se observă că fiecărei clase de utilizare îi este alocat un domeniu de cicluri de funcționare, stabilit în mod convențional, între două limite - inferioară și superioară. Orice IR (SP) poate fi încadrată (clasată) într-unul din cele 4 domenii, respectiv într-una din clase.

b) Pentru un **element de SP**, durata unui ciclu, deci și numărul ciclurilor de eforturi unitare pe durata de viață a construcției portante, depinde și de manevrele intermediare efectuate în cadrul unui ciclu de încărcare. Rezultă că față de numărul convențional de cicluri de încărcare, determinat pentru întreaga IR (SP), un anumit element al construcției portante poate fi supus la un număr diferit (mai mare sau mai mic) de cicluri, numite cicluri de eforturi unitare. Înseamnă că un anumit element al structurii portante poate fi încadrat în altă clasă de utilizare decât IR (SP). Încadrarea elementelor se face potrivit tabelului II-1. În figura II-1 este un exemplu de cicluri simpliste, iar în figura II-2 - un exemplu de cicluri aleatorii, așa cum de regulă se întâlnesc în realitate.

II.2.3.2 Starea de încărcare

a) Starea de încărcare (de solicitare), pentru o SP, indică în ce proporție o anumită IR va ridica sarcina nominală (maximă) pentru care se proiectează sau o altă sarcină, mai mică. "Starea de încărcare" este caracterizată de *spectrul de sarcini*, adică de numărul de cicluri în care se atinge sau se depășește o sarcină egală cu o anumită fracțiune din sarcina nominală.

Spectrele sunt concepute (imaginate) așa fel ca în cadrul fiecăruia să existe o sarcină care are cea mai mare frecvență de acțiune pe toată durata de viață a structurii portante, numită sarcina cea mai probabilă. Pornind de la aceste considerente, în [244], punctul 5.9.1.2, în mod convențional, pentru IR s-au definit, descriptiv - calitativ (adică fără suport de calcul), 4 stări tip de încărcare, așa cum sunt redată în tabelul II-2. b) Starea de încărcare pentru un *element al construcției portante* indică proporția în care acesta este supus la un efort maxim sau la un efort mai redus ca valoare. Noțiunea se definește prin *spectrul de eforturi unitare*, care este numărul de cicluri în cadrul cărora se atinge sau se depășește un efort unitar egal ca valoare cu o anumită fracțiune din efortul unitar maxim. În [244], punctul 5.9.1.2, „pentru practica proiectării, au fost stabilite, convențional, patru spectre (colective) de eforturi unitare, corespunzând celor 4 stări tip de încărcare (de solicitare a unui element); tabelul II-2 schematizează definirea din [244] a spectrelor normate.

Tabelul II-2 (după [244])

Stare de încărcare	Definiție				Coeficient spectru p
	Spectru de sarcini Instalația ridică		Spectru de eforturi unitare Elemente supuse la ...		
	sarcina (sarcini),	Cu frecvența	Efort(uri) unitar(e)	Cu frecvența	
0 foarte ușoară	nominală	În mod excepțional	maxim	În mod excepțional	0
	mult mai mici	Curent	mult mai mici	curent	
1 ușoară	nominală	Rar	maxim	rar	1/3
	circa 1/3 din sarcina nominală	Curent	circa 1/3 din efortul unitar maxim	curent	
2 medie	nominală	Relativ frecvent	maxim	Relativ frecvent	2/3
	circa 2/3 din sarcina nominală	Curent	circa 2/3 din efortul unitar maxim	curent	
3 grea	nominală	Regulat	Maxim	regulat	1

Ultima coloană a tabelului II-2 constituie o adăugire la datele tabelului original, în baza completărilor din [244], Anexă, în care s-au făcut unele clarificări, cu scopul unei mai bune înțelegeri a noțiunii de stare de încărcare (de eforturi unitare). Completarea vizată de adăugire a constat în a defini, suplimentar, cele 4 stări tip de încărcare (de eforturi unitare), prin intermediul valorilor parametrului numit coeficient de spectru, "p". Semnificația coeficientului "p" nefiind tratată în [244], rezultă la punctul următor, din prezentarea modului în care s-a definit, la elaborarea DIN 15018, conceptul despre starea de încărcare (de eforturi unitare).

II.2.3.3 Definirea tipurilor de spectre de încărcare (de eforturi unitare) cu ajutorul coeficientul "p"

a) Model simplu de solicitare variabilă

Solicitarea variabilă, poate fi descrisă în primă instanță de modelul simplu al solicitării cu variație sinusoidală în timp, reprezentat în figura II-1 [160] (similar cu schema din [239]), model care în trecut a stat la baza documentelor normative tehnice și continuă să fie acceptat încă de unele dintre ele.

Acest caz clasic de solicitare în regim staționar poate fi definit satisfăcător prin parametrul caracteristici notați în continuare.

- N - numărul total de cicluri;
- σ_{max} - efortul unitar maxim, în valoare absolută;
- σ_{min} - efortul unitar minim, în valoare absolută;

- Este necesar ca σ_{\max} și σ_{\min} să fie precizate, atât ca mărime, cât și ca semn.
- $R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$ - coeficientul de asimetrie a ciclului; (II.1)
- $\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$ - diferența de eforturi unitare (ecart); (II.2)
- $\sigma_m = (\sigma_{\max} + \sigma_{\min}) / 2$ - efort unitar mediu . (II.3)

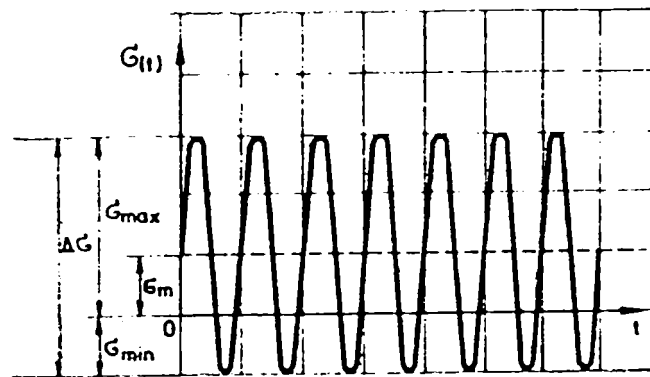


Fig.II-1 [160] -Solicitare cu o variație sinusoidală în timp

b) Solicitare variabilă de tip aleator

În fapt, încărcările și solicitările au caracter aleator și de aceea o reprezentare precum cea din figura II-2 [7] este mult mai aproape de ceea ce se întâmplă în realitate.

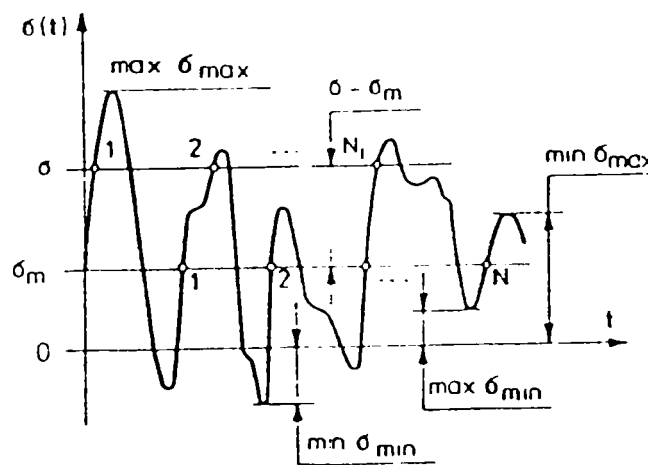


Fig.II-2 [7] – Solicitare de tip aleator

Pentru ciclurile reprezentate, valoarea medie a tensiunii este:

$$\sigma_m = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \sigma_k \quad (II.4)$$

în care: σ_k - valorile tuturor maximelor sau minimelor relative din înregistrare;
 n - numărul total al maximelor și minimelor relative.

Valoarea σ_m reprezintă nivelul de tensiune cu frecvența maximă de atingere pe întreaga durată a solicitării. Luând σ_m ca referință, se poate stabili numărul total de treceri N_i peste un anumit nivel ($\sigma - \sigma_m$); apoi numărul total de cicluri, N , va fi egal cu jumătate din numărul total de treceri prin valoarea medie σ_m . Notând cu σ_{max} o tensiune maximă oarecare a diagramei de variație din figura II-2, iar cu σ_a amplitudinea, va rezulta:

$$\sigma_a = \sigma_{max} \cdot \sigma_m \quad (II.5)$$

Lucrând cu valorile σ_m , $\max \sigma_a$ și $\min \sigma_a$ analiza ciclurilor s-ar menține la nivelul unor valori particulare. O generalizare se poate obține prin:

- înlocuirea ordonatei σ prin ordonata adimensională $(\sigma - \sigma_m)/(\sigma_{max} - \sigma_m)$, realizând astfel exprimări și reprezentări în valori relative;
- acceptarea unei anumite legi de distribuție a valorilor tensiunilor maxime și minime, σ_k , ceea ce conduce la idealizarea procesului aleator al solicitării ([1], [4]).

Cercetările descrise în [4] (apud [7]), au condus la acceptarea, pentru solicitările caracteristice ale elementelor structurilor portante ale IRR, a următoarelor ipoteze simplificatoare:

- valoarea medie a tensiunii este practic constantă și poate fi calculată ca medie aritmetică a valorilor extreme ale tensiunii, ceea ce înseamnă că în raport cu valoarea medie, amplitudinile alternanțelor pozitive și negative în cadrul fiecărui ciclu pot fi considerate egale;
- densitatea de repartiție a amplitudinilor tensiunilor (măsurate în raport cu valoarea medie a tensiunii) este o repartiție de probabilitate normală (tip Gauss- Laplace);
- pentru necesitățile calculului ingineresc, este suficient să se definească patru stări tip de solicitare, definite cu ajutorul raportului între cea mai mică și cea mai mare valoare a amplitudinii tensiunii, prin intermediul parametrului "p";
- stările tip de solicitare sunt stări convenționale cu un număr de cicluri de solicitare egal cu $N_c = 10^6$ cicluri.

Cu ipotezele respective se obține reprezentarea idealizată din figura II-3.

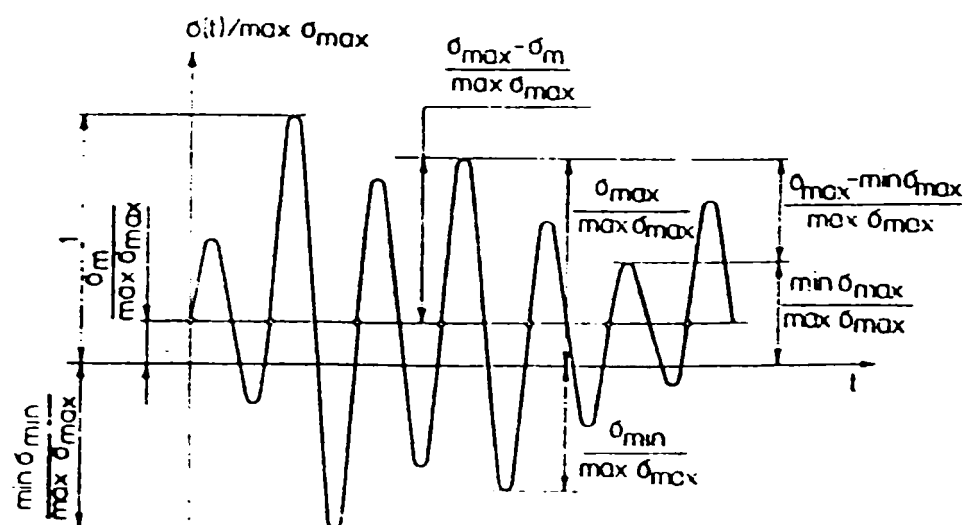


Fig.II-3 [7] Model idealizat de solicitare aleatoare

Considerând ipotezele de mai sus și reprezentarea din figura II-3, valoarea medie a tensiunii este

$$\sigma_m = (\max \sigma_{\max} + \min \sigma_{\min})/2 \quad (II.6)$$

Alegând ca valoare aleatoare raportul $x = (\sigma_{\max} - \min \sigma_{\max}) / (\max \sigma_{\max} - \min \sigma_{\max})$, după calcule intermediare, se ajunge în final la o reprezentare de tipuri de spectre idealizate de eforturi unitare, conform figurii II-4.

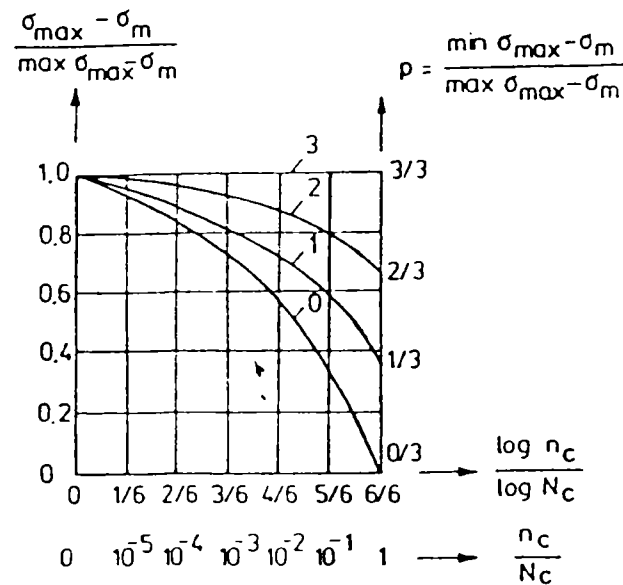


Fig.II-4 [7] Curbele frecvențelor relative cumulate ale stărilor de solicitare tip

Stările tip sunt definite prin intermediul parametrului "p", din formula:

$$p = \frac{\min \sigma_{\max} - \sigma_m}{\max \sigma_{\max} - \sigma_m} \quad (II.7)$$

care indică cîteimea celei mai mici tensiuni maxime din amplitudinea celei mai mari tensiuni maxime (valori măsurate în raport cu σ_m). Prin urmare, pornind de la un ciclu aleator, după idealizare și alte ipoteze simplificatoare, în limite acceptabile pentru a se păstra o reflectare a esenței fenomenului, s-a ajuns la o diagramă în care este prezent coeficientul adimensional "p". Curbele din figura II-4 [7] au rezultat în funcție de valorilor lui "p" din [244] (adică : $p = 0$; $p = 1/3$; $p = 2/3$; $p = 3/3$). Semnificația simbolurilor din fig. II-4:

$N_c = 10^6$ - numărul de cicluri al unei stări convenționale ;

n_c - numărul convențional de cicluri în care se îndeplinește condiția $|x(t)| \geq x$, în cadrul solicitării tip;

N - număr total de cicluri;

n - numărul de cicluri, ale stării de solicitare dată, în care $|x(t)| \geq x$.

Parametrul "p" indică "plinătatea" diagramei și constituie o măsură a severității regimului de solicitare.

Modul de definire prin "p" a stărilor tip de solicitare este preconizat de [88] [110]. Principial, în standardul român [244] definirea este identică, [244] având un concept de ansamblu foarte apropiat de cel al [88]

Spre a sublinia concordanța între calculele de mai sus și valoarea lui "p" din [88] și [244], în [160], punctul 4.10, este prezentat un tabel cu valorile $(\sigma_{\max} - \sigma_m) / (\max \sigma_{\max} - \sigma_m)$, în funcție de $\log n_c / \log N_c$, pentru cele 4 spectre de eforturi ale [88], iar în [7], punctul 1.6.2.2, - un tabel similar, referitor la [244]. Interpretând datele tabelare, rezultă că, de pildă, la starea de solicitare 1- ușoară, $p=1/3$, (spectrul S1), raportul $(\sigma_{\max} - \sigma_m) / (\max \sigma_{\max} - \sigma_m)$ are, din totalul de 10^6 cicluri, următoarele valori: în 10^5 cicluri (10% din cazuri), $\geq 0,579$; în 10^4 cicluri (1% din cazuri), $\geq 0,716$; în 10^3 cicluri (0,1% din cazuri) $> 0,890$; în 10^2 cicluri (0,01% din cazuri), $\geq 0,890$; în 10^1 cicluri (0,001% din cazuri) $\geq 0,952$. rezultă pentru restul de 888890 cicluri (88,889 % cazuri), $\geq 0,333$ (adică $p=1/3$).

II.2.4 Verificarea la rezistența în exploatare

În țară, obligativitatea calculului elementelor construcțiilor portante la "rezistența în exploatare" se aplică din anul 1983, odată cu intrarea în vigoare a STAS 8290-83 [244]. Se au în vedere condițiile de exploatare prevăzute, pentru o durată de viață limitată, impusă de regulă de durata de viață normată.

II.2.4.1 Descrierea fenomenului de oboseală

Standardul [244] folosește sintagma de "rezistența în exploatare" pentru "siguranța la rupere în cazul acțiunii unor eforturi repetate variabile în timp", adică pentru ceea ce în mod obișnuit în rezistența materialelor este cunoscut ca "limită (rezistență) la oboseală". Înțelesul noțiunii de "oboseală" poate fi întregit prin definițiile din [234] - "Fenomenul complex care se manifestă prin micșorarea capacității de rezistență la rupere a unui material supus la solicitări repetate.", din [3], cap. 9, - "Prin oboseală (sau degradare) se înțelege deteriorarea unui material supus unor solicitări variabile, caracterizată prin apariția de fisuri și rupturi specifice acestui fenomen și care pot să apară mult sub valoarea rezistenței la rupere R_m sau a limitei de curgere R_p ", și din [107], - "Oboseala: deteriorarea unei părți a structurii, prin propagarea lentă a unei fisuri cauzată de fluctuațiile repetate ale tensiunilor."

Fenomenul de oboseală fiind foarte complex, asupra lui s-au efectuat numeroase cercetări. Răspândirea sudurii ca procedeu de îmbinare a construcțiilor metalice a amplificat aceste preocupări. Dacă construcțiile metalice executate prin nituire au rezistat un număr mare de ani, o serie de structuri de poduri de cale ferată sudate, din Franța și Belgia, Germania au cedat după câțiva ani. Ca urmare, încă înainte de cel de al II-lea război mondial, s-a trecut la studiul modificărilor structurale ale materialelor sudate. Astfel s-a ajuns la concluzia că în suduri apar atât modificări în structura cristalină a oțelului cât și modificări ale compoziției chimice. De asemenea, ca urmare a răcirii neuniforme, apar tensiuni interne care modifică starea inițială de lucru. În plus, poate apărea o fragilizare a oțelului, care duce la rupere casantă, fără deformații prealabile sesizabile.

Un rol determinant în comportarea la oboseală îl are modul de alcătuire al structurilor, tipul cordoanelor de sudură (cap la cap, de colț, etc.) și finisarea cordoanelor.

Se introduce noțiunea de "factor de încreștere" sau "categorie de detaliu", care definește sensibilitatea la oboseală într-un anumit punct al structurii.

Acest termen, subliniază faptul că orice "crestătură" externă sau internă (de ex. un defect de sudură sau de structură cristalină) poate duce la apariția unor fisuri care progresează sub acțiunea solicitărilor variabile, putând duce la rupere.

Trebuie subliniat că ruperea prin oboseală are un caracter tipic, deoarece intervin fenomene (la nivel microstructural) calitativ diferite față de ruperea la sarcini statice nevariabile, conform [3], 9, . [41]

și [74] Dintre teoriile care explică ruperea prin oboseală, de cea mai largă recunoaștere se bucură actualmente cea a dislocației [74]. Astfel [3], la începutul solicitării, sub aspect microscopic, oboseala constă într-o concentrare de linii de dislocații (configurare a atomilor diferită de cea ideală, regulată) capabile să alunece într-o parte și alta, formând benzi de alunecare cu structuri de dislocații celulare sau caracteristice. Oboseala, ca urmare a inversărilor succesive a dislocațiilor, se manifestă macroscopic, prin ecrusare și modificarea topografiei suprafeței corpului afectat, prin formarea de fațete forfecate - extruziuni (erupții de material) și intruziuni (adâncituri) -, care acționează ca germeni pentru fisuri; structura materialului își reduce capacitatea de deformare plastică. Fisurile inițiale, care se formează pe suprafață, în special în locurile cu imperfecțiuni, cu efect de crestare, pot să se extindă treptat, dacă există condiții pentru extindere. Solicitățile variabile favorizează nucleația fisurilor și dezvoltarea lor în fisuri macroscopice, având drept rezultat reducerea rezistenței materialului și modificarea caracterului ruperii dinspre ductil spre fragil. Astfel, secțiunea transversală inițială se micșorează; apoi secțiunea rămasă se deteriorează în final prin rupere forțată. Aspectul macroscopic al unei piese rupte prin oboseală evidențiază 2 zone: una mată, netedă, corespunzătoare porțiunii fisurate în cursul solicitării și o zonă grăunțoasă, specifică unei ruperi casante, prin separare. De obicei, zona fisurată se dezvoltă la marginea secțiunii (A se vedea figura II-5[41]).

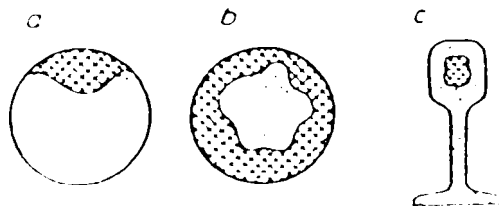


Fig.II-5 [41] Aspectul macroscopic al ruperii la oboseală

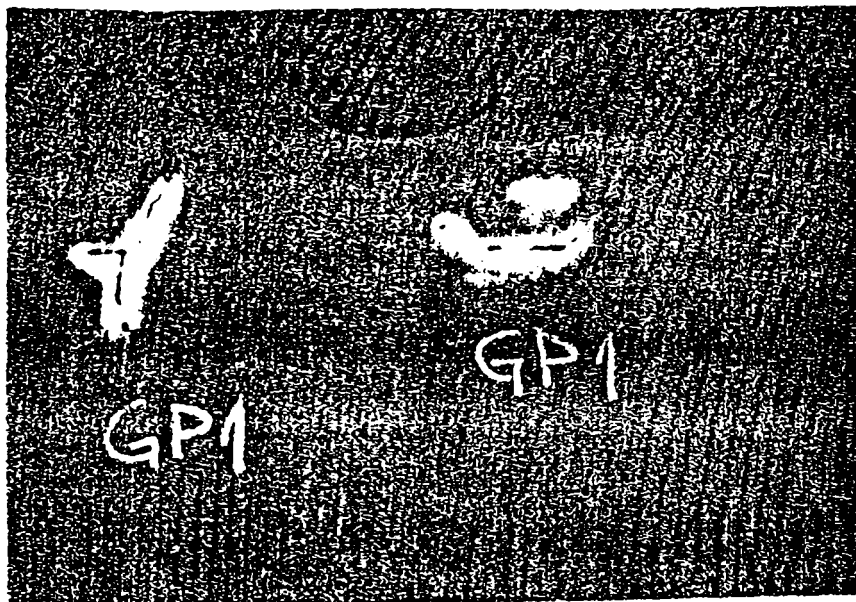
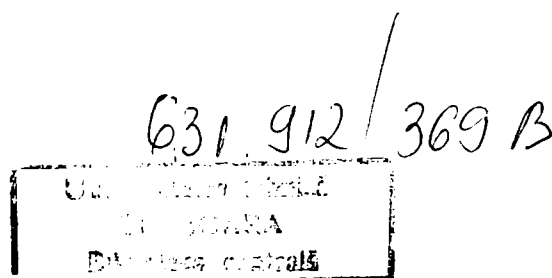


Fig.II-6 Piesă cu fisură la oboseală



Se disting [3], cap. 9, următoarele categorii principale de oboseală, funcție de tipul de solicitare și de natura materialului:

- oboseală fără fisurare: inițial nu există fisură; ruperea este determinată de mecanismele de realizare a rupei;

- oboseală cu fisurare: există germeni pentru rupere sau fisuri; ruperea este determinată de mecanismele de extindere a fisurilor;

- oboseală la solicitări oscilatorii de durată (oboseală la număr mare de solicitări HCF-high cycles fatigue): oboseală la tensiuni situate valoric sub limita microscopică de curgere R_p ; număr de solicitări la rupere $> 10^4$,

- oboseală la număr scăzut de solicitări (LCF – lower cycles fatigue): oboseală la tensiuni situate valoric peste limita microscopică de curgere R_p ; număr de solicitări la rupere $< 10^4$.

II.2.4.2 Calcule de verificare la rezistența în exploatare

Conform STAS 8290-8, A2.9, [244], se face o comparație între:

-eforturile unitare maxime (σ_{max} , T_{max}) corespunzătoare celei mai dezavantajoase grupări din categoria de încărcări PTP (numai la aceasta, pentru că la celelalte grupări frecvența de repetare este mult sub $2 \cdot 10^4$), (numai) la elementele supuse la un număr de cicluri de încărcare mai mare de $2 \cdot 10^4$;

-rezistențele admisibile (eforturile unitare admisibile) pentru condițiile de exploatare, eforturile efective (σ_{max} , T_{max}) fiind necesar a se situa sub rezistențele admisibile.

Rezistențele admisibile pentru efort unitar normal $\sigma_{R(-1)}$ sunt prezentate în [244], cap.5, , tabelar, în funcție de:

-grupele de funcționare (înglobează: parametrii condițiilor de funcționare - clasa de utilizare, respectiv numărul de cicluri de solicitare, și starea de încărcare);

-cazurile de încrestare (înglobează forma constructivă și calitatea îmbinărilor);

-materiale (OL 37 și OL 52).

-gradul de asimetrie al ciclului (valorile sunt date pentru $\rho=-1$).

Eforturile unitare admisibile $\sigma_{R(-1)}$ corespund încercărilor pe epruvete cu o probabilitate de supraviețuire de 90%, la care s-a aplicat un coeficient de siguranță de $C_r = 4/3$, situație similară cu cea din [110]

Pentru ciclurile alternant și pulsator ale solicitărilor de întindere și compresiune rezistențelor admisibile $\sigma_{R(\rho)}$ se calculează, în funcție de: $\sigma_{R(-1)}$; ρ , cu formulele din [244], cap. 5, .

De asemenea, în [244], cap. 5, sunt prezentate formule pentru calculul rezistențelor admisibile de eforturi unitare tangențiale: $\tau_R(\rho)$, pentru elemente de construcții; $\tau_{SR}(\rho)$, pentru cusături de sudură; $\tau_{aR}(\rho)$, pentru eforturi unitare tangențiale la nituri și șuruburi păsuite; $\sigma_{agR}(\rho)$, pentru eforturi unitare de presiune pe gaură, la nituri și șuruburi păsuite.

II.2.4.2.1 Comentariu privind rezistențele admisibile

Alura clasică a curbei rezistențelor admisibile

La punctul precedent s-a arătat că în [244] rezistențele admisibile la oboseală sunt indicate tabelar, ceea ce satisface necesitățile practice ale calculului de proiectare. Dar evaluarea rezervei duratei de viață după un timp de funcționare fiind o problemă nouă și complexă, trebuie avută în vedere și sursa primară a informațiilor. Aceasta, punctul de pornire, o constituie Curba Wölher (tensiune-durabilitate), a rezistențelor la oboseală (figura II-7, după [160]). Curbele Wölher se obțin experimental, prin încercări de durată, pentru solicitări de întindere, compresiune, încovoierie sau torsiune. La tensiuni σ , se trasează o curbă $\sigma = f(N)$, unde σ este tensiunea maximă la care se rupe epruveta, iar N – numărul de cicluri corespunzător ruperii. Ordinea de solicitare este: de la solicitări mari spre solicitări mici. Astfel, prima epruvetă care se rupe la primul ciclu este cea încărcată la valoarea $\sigma_{max} = \sigma_r$ (rezistența la rupere statică). Dacă se micșorează pe rând σ_{max} , păstrând celelalte aspecte ale încercării neschimbate, epruveta rezistă la un număr din ce în ce mai mare de cicluri. Valoarea maximă a rezistenței statice scade cu creșterea numărului de solicitări oscilante, N . Majoritatea oțelurilor [3], cap. 9, prezintă o rezistență de durată (porțiunea orizontală a curbei) și, pentru amplitudini de oscilații sub o limită critică, se accepta, în general, că ruperea nu mai apare, oricât de mare ar fi numărul de solicitări oscilante, materialul posedând o rezistență de durată la oboseală. Se acceptă în mod obișnuit drept rezistență de durată σ_D , valoarea lui σ_{max} pentru care elementul rezistă la $2 \cdot 10^6$ cicluri. Rezistența σ_N la un număr oarecare de cicluri $N < 2 \cdot 10^6$ se poate calcula cu relația:

$$\sigma_N = \sigma_D (2 \cdot 10^6 / N)^{1/k}, \quad (II.8)$$

exponentul k depinzând de gradul de concentrare a eforturilor (încrăstare) . .

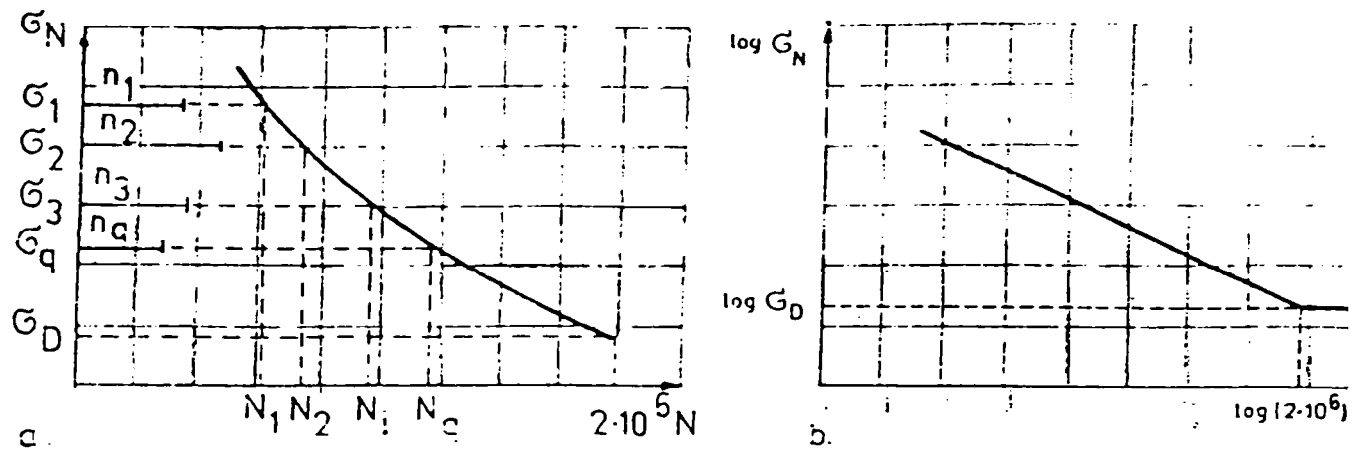


Fig. II-7 [160] - Rezistența la oboseală în cazul sollicitării cu o variație sinusoidală în timp:
a) Curba Wölher ; b) Curba Wölher la scară logaritmică

Curba Wölher în reprezentare la scară logaritmică devine mai intuitivă și are alura din figura II-7b), corespunzând ecuației unei drepte.

Observatii asupra curbei clasice

1. Considerarea că rezistența la oboseală nu mai scade de la $N > 2 \cdot 10^6$ și de aceea, reprezentarea fenomenului, începând din acest punct, printr-o dreaptă orizontală, este o simplificare. Numeroși cercetători au constatat experimental că și peste această valoare se produc deteriorări în structura materialului și au construit în locul orizontalei, o dreaptă înclinată. [198]. În acest mod se intră în concordanță cu teoria că degradările se acumulează cu fiecare ciclu de sollicitare.
2. Curba Wölher reflectă schematic, simplist, fenomenul ruperii prin oboseală. Dacă se încearcă mai multe epruvete la același nivel de sollicitare, se obțin valori diferite pentru ciclurile de rupere. Pentru a înfățișa dispersia, se pot construi diagrame tridimensionale σ, N, p , care reflectă probabilitatea de rupere pentru un nivel de sollicitare dat (Figura II-8[19]).

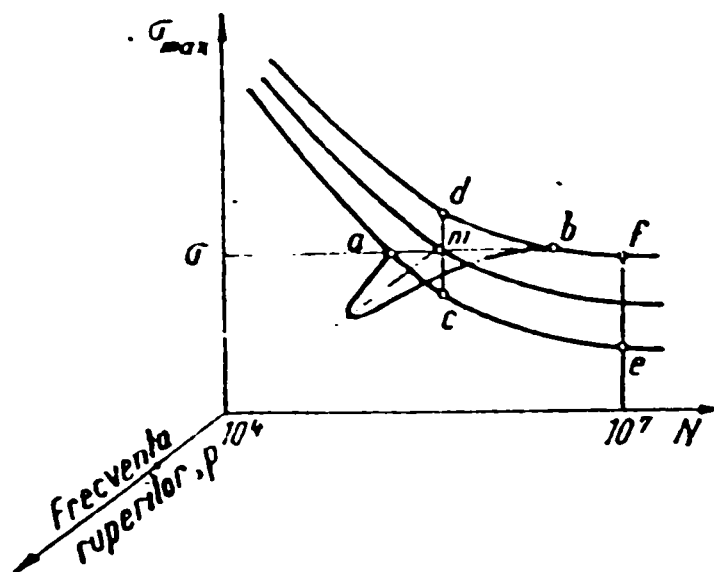


Fig. II-8 [19] Curba Wölher tridimensională

Pentru o solicitare oarecare σ , rezultatele de durabilitate se situează pe segmentul "ab", iar pentru o durabilitate oarecare N , tensiunile de rupere sunt pe segmentul "cd". În planul $\sigma - N$ apare o rețea de curbe de izoprobabilitate. Probabilitatea "p" variază între limitele 0 și 1. Pentru cazul din figură, la nivelul de solicitare σ , punctul "a" reprezintă durabilitatea la care nici o epruvetă nu se rupe, iar punctul "b" corespunde unei probabilități de supraviețuire de 0%.

II.3 PREVEDERILE "Eurocode 3, ENV 1993-1-1 [107]", PRIVIND VERIFICAREA LA LIMITA DE OBOSEALĂ

II.3.1 Generalități

Ca și la prezentarea standardului român [244], expunerea principalelor prevederi ale documentului "Eurocode 3, ENV 1993-1-1" [107] se face în ordinea din documentul oficial avut la dispoziție, care este versiunea engleză. Se justifică acest procedeu pentru că se poate urmări mai bine logica originalului, ținând seama și de faptul că, în afara unei prezentări detaliate din [162], în țară nu există o traducere oficială a capitolului referitor la oboseală; pe de altă parte, succesiunea identică în expunere facilitează urmărirea și însușirea promptă a unor eventuale completări sau modificări ulterioare ale documentului precum și utilizarea comodă a materialului expus, în interesul tuturor factorilor interesați în realizarea versiunii române. Prevederile referitoare la oboseală sunt cuprinse în capitolul 9 al [107].

II.3.1.1 Scop

Scopul verificării unei structuri față de starea limită de oboseală constă în a da asigurări, cu un nivel acceptabil de probabilitate, că funcționarea ei este satisfăcătoare pe toată durata de viață, astfel ca pentru structură să fie improbabile ieșirea din funcție din cauza oboselii sau apariția necesității de reparații în urma degradării cauzate de oboseală.

Nivelul de siguranță necesar se obține prin aplicarea coeficienților de siguranță parțiali (A se vedea [107]- 9.3 , respectiv II.3.3).

II.3.1.2 Obiect

Obiectul capitolului "9. Fatigue (Oboseala)" din "Eurocode 3, ENV 1993-1-1" [107] este de a prezenta o metodă generală de evaluare la oboseală a structurilor și a elementelor structurale care sunt supuse la tensiuni variabile repetate.

II.3.1.3 Condiții de aplicabilitate a metodei de calcul de verificare la oboseală

• Toate tensiunile nominale (definite la II.3.1.5(7)) trebuie să rămână în domeniul elastic.

$$\bullet \Delta\sigma \leq 1,5 f_y; \Delta\tau \leq 1,5 f_y / \sqrt{3}, \quad (II.9)$$

unde $\Delta\tau$, - ecartul valorii de calcul al tensiunilor nominale normale, respectiv tangențiale, în gruparea de încărcări rare; (A se vedea definițiile din [107], 9.1.5, traduse la II.3.1.5)

f_y - limita de curgere a metalului;

- Rezistențele la oboseală specificate sunt valabile în cazul **elementelor protejate corespunzător** **contra coroziunii**, în condiții de mediu puțin agresiv și în condiții atmosferice normale;
- Construcția nu trebuie supusă la temperaturi care depășesc 150°C.

II.3.1.4 Condiții în care verificarea la oboseală este obligatorie

În cazul structurilor, verificările la oboseală se impun în cazurile când elementele sunt solicitate de/supuse la:

- IR sau încărcări mobile(rulante);
- repetare a unor cicluri de tensiuni produse de instalații care provoacă vibrații;
- oscilații determinate de vânt;
- oscilații produse de adunări de persoane.

Verificarea la oboseală nu este necesară, dacă este îndeplinită una din următoarele trei condiții:

a) Dacă ecartul de tensiune $\Delta\sigma$ satisface condiția:

$$\gamma_{FF} \Delta\sigma \leq 26/\gamma_{MF} \text{ N/mm}^2 \quad (\text{II.10})$$

în care γ_{FF} - coeficient parțial de siguranță, cu care se multiplică valoarea încărcărilor care produc oboseala. Obișnuit $\gamma_{FF} = 1,0$

b) Numărul total al ciclurilor de tensiune (pentru toată durata de viață a elementului), N , satisface condiția:

$$N \leq 2 \cdot 10^6 \left[\frac{36/\gamma_{MF}}{\gamma_{FF} \cdot \Delta\sigma_{E.2}} \right]^3 \quad (\text{II.11})$$

în care $\Delta\sigma_{E.2}$ este ecartul de tensiune echivalentă, de amplitudine constantă, în N/mm^2 .

c) Dacă la un element (detaliu) la care este specificată limita de oboseală sub amplitudine constantă $\Delta\sigma_D$, cel mai mare ecart de tensiune $\Delta\sigma$ (nominală sau geometrică, după caz), calculat la starea limită a exploatării normale, în combinația rară, satisface condiția:

$$\gamma_{FF} \Delta\sigma \leq \Delta\sigma_D/\gamma_{MF} \quad (\text{II.12})$$

Obs. : Tensiunea geometrică (tensiune în punctul cald) este tensiunea principală maximă în metalul de bază, la marginea cordonului de sudură (A se vedea [107], 9.1.5, respectiv II.3.1.5).

II.3.1.5 Definiții

(1) **Oboseală:** Defectarea unei părți a structurii datorită propagării lente a unei fisuri provocate prin variațiile repetate ale tensiunilor.

- (2) **Încărcare la oboseală:** Un ansamblu de evenimente – încărcări reprezentative, descrise prin poziția încărcărilor, intensitatea și frecvența lor relativă.
- (3) **Eveniment de încărcare:** O secvență de încărcare aplicată structurii, care dă naștere la un istoric de încărcare.
- (4) **Încărcare de oboseală echivalentă de amplitudine constantă:** Încărcare simplificată de amplitudine constantă, reprezentând efecte de oboseală a evenimentelor – încărcări reale de amplitudini variabile.
- (5) **Istoric al tensiunilor:** înregistrarea sau calculul variațiilor de tensiune într-un element al structurii, în cursul unui eveniment de încărcare.
- (6) **Ecart de tensiune:** diferența algebrică între două extreme ale unui ciclu particular de tensiune care face parte dintr-un istoric al tensiunilor.
- (7) **Tensiune nominală:** Tensiune în materialul de bază, adiacent unui punct potențial de fisură, calculată în concordanță cu rezistența elastică simplă a teoriei materialelor, excluzând toate efectele de concentrare a tensiunilor.
- (8) **Tensiune nominală modificată:** O tensiune nominală mărită printr-un coeficient de concentrare de tensiune corespunzător, pentru a ține seama de o discontinuitate geometrică ce nu a fost luată în considerare în clasificarea unui detaliu constructiv particular.
- (9) **Tensiune geometrică:** este tensiunea principală maximă în materialul de bază, adiacent marginii cordonului de sudură, cu luarea în considerare numai a efectelor concentrării de tensiune determinată de geometria de ansamblu a îmbinării a detaliului constructiv particular, excluzând efectele concentrărilor de tensiuni locale, cauzate de geometria sudurilor și discontinuităților din sudură și din materialul de bază adiacent.
- (10) **Metoda picăturii de apă (Rainflow) și metoda rezervorului (Reservoir):** metode specifice de creare a unui spectru de ecarturi de tensiuni pornind de la un istoric de tensiuni.

Comentariu asupra creării spectrului de ecarturi de tensiuni, (10)

Pentru a determina numărul ciclurilor de solicitare se adoptă o metodă de numărare (rainflow, rezervor, etc.).

Metoda rezervorului (Reservoir)

Se presupune existența unor cicluri de forma celor din fig. II-9, care pot fi obținute prin măsurători electroextensiometrice efectuate pe elementele construcției portante. Metoda rezervorului (Fig. II-10), este potrivită în cazul încărcărilor de scurtă durată, cum sunt cele produse de ridicarea unei sarcini. Se imaginează diagrama de solicitare ca o secțiune transversală a unui rezervor care este golit succesiv, prin fiecare punct inferior, numărând un ciclu pentru fiecare golire. Prin golirea în punctul 1, înălțimea nivelului apei $\Delta\sigma_1$ corespunde unui ciclu complet cu ecartul de tensiuni $\Delta\sigma_1$. Golind succesiv fiecare compartimente ale rezervorului se determină nivelele $\Delta\sigma_2$, $\Delta\sigma_3$, etc.

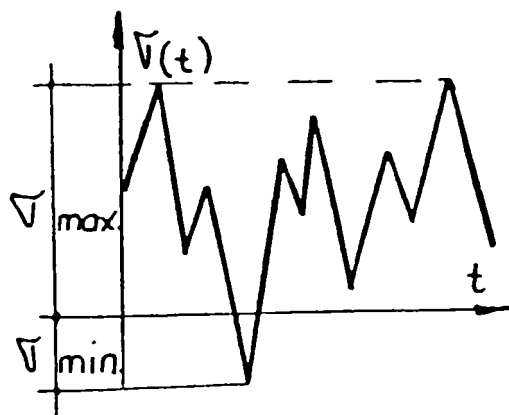


Fig.II-9 [203]

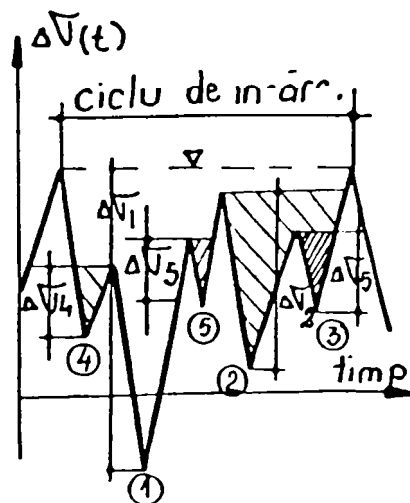


Fig.II-10 [203]

În final se întocmește lista finală (clasarea), care conține toate ecarturile de tensiune în ordine descrescătoare. În Prompt SA Timișoara există un program de calcul pentru numărarea ciclurilor de solicitare, cu prelucrare manuală sau automată (cu ajutorul unui digitizor) a diagramelor.

Metoda Rain Flow (picăturii de apă)

Conform acestei metode [71], cap. 10, se consideră că un semiciclu este definit de traseul unei picături de apă ce curge pe un acoperiș cu o formă corespunzătoare curbei de variație a lui σ (istoricul solicitărilor), așezată cu axa timpului pe verticală. Așa cum rezultă din figura II-11, traseul picăturii de apă începe la un vârf de tensiune și se termină în următoarele cazuri:

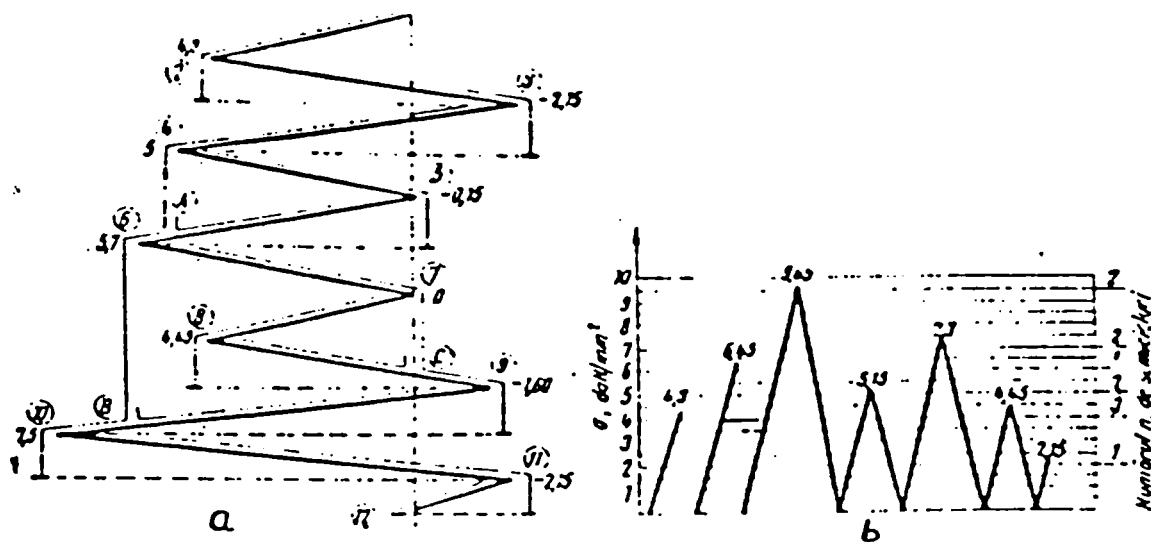


Fig.II-11 [71] Metoda "Rain flow" pentru stabilirea ciclurilor de tensiune
 a - istoricul solicitării și traseul picăturii de apă; b - semicicluri rezultate în urma aplicării regulilor Rain flow

- dacă ajunge într-un punct opus unui vârf de valoare negativă egal sau mai mare (în modul) decât cel de la care a pornit (de ex. pornește din 1, și se oprește imediat sub 2, deoarece trece printr-un punct aflat la același nivel cu vârful negativ 3, a cărui valoare - în moduli - depășește valoarea din punctul 1; se consideră astfel un semiciclu între 1 și 2).

- dacă ajunge într-un punct opus unui vârf pozitiv egal sau mai mare decât cel de la care a pornit (de ex., pornește din 2 și se oprește imediat sub 3, într-un punct opus vârfului 4 în care σ are o valoare mai mare decât în 2; se formează astfel un semiciclu între 2 și 3);
- dacă întâlnește traseul unei alte picături (de ex. începe în 5 dar se oprește în A, deoarece întâlnește traseul ce începe în 3 și se termină într-un punct opus lui 11);
- dacă ajunge la finele înregistrării (de ex., semiciclu dintre 10 și 11).

Se vede că fiecare porțiune a curbei de variație σ este parcursă numai o singură dată.

În figura II-11.b sunt puse în evidență semiciclurile obținute prin aplicarea metodei Rain flow pe figura II-11.a, precum și numărul de cicluri pentru diferite trepte de solicitare.

Această operație de formare și de clasificare a semiciclurilor de solicitare pe baza valorilor din vârfurile curbei înregistrate poate fi programată pe calculator.

(11) **Spectrul ecarturilor de tensiune:** histograma frecvențelor de apariție a tuturor valorilor ecarturilor de tensiune înregistrate sau calculate pentru un eveniment de încărcare dat.

(12) **Spectru de calcul:** ansamblul tuturor spectrelor ecarturilor de tensiune care trebuie luate în considerare în verificările la oboseală (Fig. II-12)

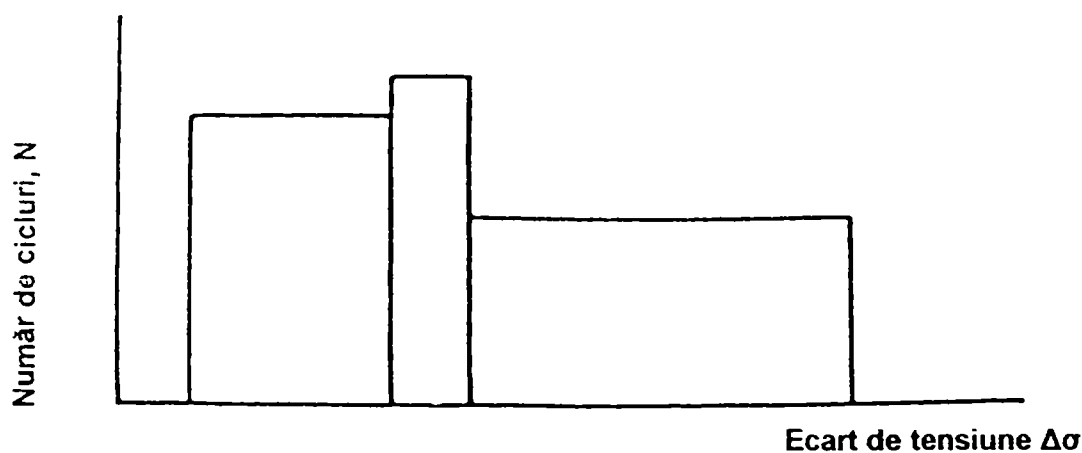


Fig.II-12 [107] Spectru de calcul

- (13) **Ecart de tensiune echivalentă de amplitudine constantă:** este ecartul de tensiune de amplitudine constantă, care produce aceeași durată de viață la oboseală ca și cea obținută pe baza unui spectru de variație variabilă, comparația fiind făcută pe baza însumării Miner (A se vede, mai jos, (16)).
- (14) Pentru simplificare, un ecart de tensiune echivalentă de amplitudine constantă se poate pune în legătură cu un număr total de 2 milioane de cicluri de ecarturi de tensiune de amplitudini variabile.
- (15) **Durata de viață la oboseală:** numărul total de cicluri de ecarturi de tensiuni care conduce la rupere prin oboseală.
- (16) **Însumarea Miner:** Calcularea degradării însumate, pe baza regulii Palmgren-Langer-Miner.

Comentariu

Principiul de cumulare a degradărilor

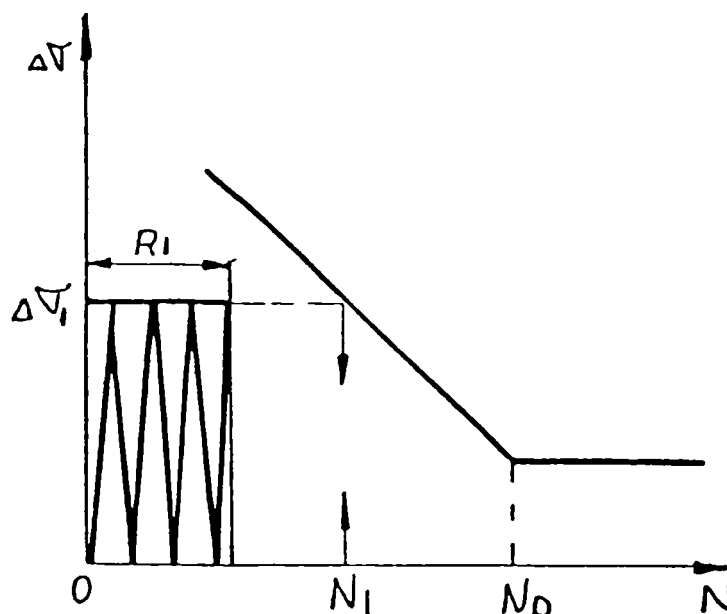
În general, se admite că fiecare ciclu de solicitare produce o anumită cantitate de degradare. [76], adică acestea se acumulează. Pentru calculul la oboseală în cazul când amplitudinile solicitărilor nu rămân constante în toate ciclurile, este nevoie de un criteriu fenomenologic de degradare. Cel mai cunoscut dintre criteriile care ia în considerare solicitările cu amplitudine variabilă, este criteriul propus independent de Palmgren (1925), Langer (1937) și Miner (1945) - principiul cumulării liniare a degradărilor [160]. Conform acestui principiu (A se vedea fig. II-13 [203]) .dacă un element solicitat la nivelul $\Delta\sigma_1$ se rupe după N_1 cicluri, adică atunci când degradarea este totală, înseamnă că la număr mai redus de repetări a solicitării $n_1 < N_1$, degradarea se produce doar în proporție de n_1/N_1 . Solicitând apoi elementul la un alt nivel $\Delta\sigma_2 < \Delta\sigma_1$ de un număr $n_2 < N_2$, fiind numărul de cicluri la care se produce degradarea totală la nivelul $\Delta\sigma_2$, se va adăuga degradarea n_2/N_2 .

Cumulând liniar degradările produse la diferite niveluri de solicitare $\Delta\sigma_i$, repetate de n_i ori, ruperea se va produce atunci când degradarea este totală, adică atunci când:

$$\sum \frac{n_i}{N_i} = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \dots + \frac{n_i}{N_i} = 1 \quad (\text{II.13})$$

- Dacă $\sum \frac{n_i}{N_i} < 1$, (II.14)

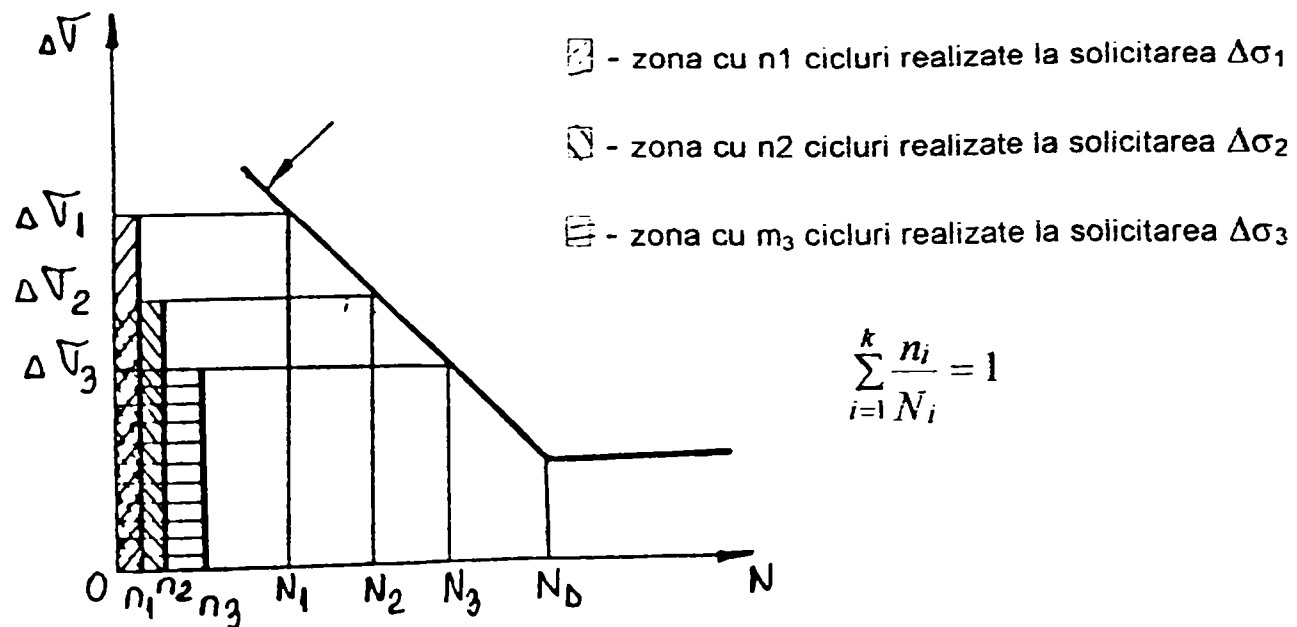
degradarea nu este totală și elementul mai poate funcționa.



Degradare parțială D1:

$$D_1 = \frac{n_1}{N_1} < 1$$

a) Reprezentarea unei degradări parțiale D1 după n1 cicluri pulsatorii la solicitarea $\Delta\sigma_1$



b) Reprezentarea degradării totale $\sum \frac{n_i}{N_i}$

Fig. II-13 [203] Reprezentarea degradării cumulate după criteriul Palmgren – Langer-Miner

Exemplu de calcul: $\frac{n_1}{N_1} = 0,5$; $\frac{n_2}{N_2} = 0,3$; $\frac{n_3}{N_3} = 0,2$; Total: $\sum_{i=1}^3 \frac{n_i}{N_i} = 1$

În Prompt SA există un program de calcul, LIFE-ACT, bazat pe principiul cumulării degradărilor - care stă la baza metodei Palmgren-Langer-Miner -, cu ajutorul căruia se poate stabili durata de viață, în număr de acțiuni.

Acest criteriu a făcut obiectul multor critici și în literatura tehnică au fost propuse alte criterii, atât liniare, cât și neliniare [82], care modelează mai corect degradarea cumulativă a unui element supus la solicitare variabilă. Dar criteriul Palmgren-Langer-Miner rămâne totuși foarte atrăgător pentru aplicațiile practice, datorită simplității lui. El poate fi acceptat dacă sunt satisfăcute anumite condiții [207]:

- să nu existe efecte de ecruisare și de adaptare;
- apariția unei fisuri să fie considerată ca o stare limită;
- eforturile unitare σ_i să fie mai mari decât σ_D ;
- efortul unitar mediu σ_m să fie pe cât posibil constant pentru toate ciclurile.

Solicitare echivalentă [160]. Pe baza criteriului Palmgren-Langer-Miner, se poate defini o solicitare cu variație sinusoidală, care să aibă un număr de cicluri egal cu suma ciclurilor solicitării reale și să fie echivalentă cu aceasta din punct de vedere al degradării cumulative. Efortul unitar σ_{max} al solicitării echivalente are în fiecare ciclu valoarea σ_{ech} , care rezultă din considerațiile prezentate în continuare. Se face ipoteza că dacă un element este supus la n_1 cicluri cu $\sigma_{max} = \sigma_1$, n_2 cicluri cu $\sigma_{max} = \sigma_2$, ..., n_i cicluri cu $\sigma_{max} = \sigma_i$, ..., n_q cicluri cu $\sigma_{max} = \sigma_q$ și dacă numărul maxim de cicluri

conform curbei Wöhler (fig.II-7) ar fi N_1 pentru σ_1 , N_2 pentru σ_2 , ..., N_i pentru σ_i , ..., N_q pentru σ_q .

condiția ca elementul să nu cedeze prin oboseală este $\sum_{i=1}^q \frac{n_i}{N_i} \leq 1$.

Din această relație și din relația II.8 rezultă:

$$\sigma_{ech} = \left[\sum_{i=1}^q \sigma_i^k \frac{n_i}{N} \right]^{\frac{1}{k}} = \sigma_D \left[\sum_{i=1}^q \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_D} \right)^k \frac{n_i}{N} \right]^{\frac{1}{k}} \quad (II.15)$$

- (17) **Limita de oboseală sub amplitudine constantă:** Valoarea ecartului de tensiune limită deasupra căreia trebuie evaluată rezistența la oboseală.
- (18) **Categorie de detaliu:** clasa asociată unui detaliu, sudat sau îmbinat cu șuruburi, care precizează care curbă de rezistență la oboseală este aplicabilă pentru evaluarea la oboseală.
- (19) **Curbă de rezistență la oboseală:** relație cantitativă care indică ruperea prin oboseală, în funcție de ecartul de tensiune și numărul de cicluri de tensiune, utilizată pentru evaluarea rezistenței la oboseală a unei categorii de detalii constructive (A se vedea în [107], fig. 9.1.2, reprodusă în fig.II-14).
- (20) **Durata de viață de calcul:** Durata de referință în care structura trebuie să se comporte în depline condiții de siguranță, cu un grad acceptabil de probabilitate că nu apare ruperea din cauza fisurilor provocate de oboseală.
- (21) **Limită de prag:** limita sub care ecarturile de tensiune ale spectrului de calcul nu contribuie la degradarea cumulată calculată.

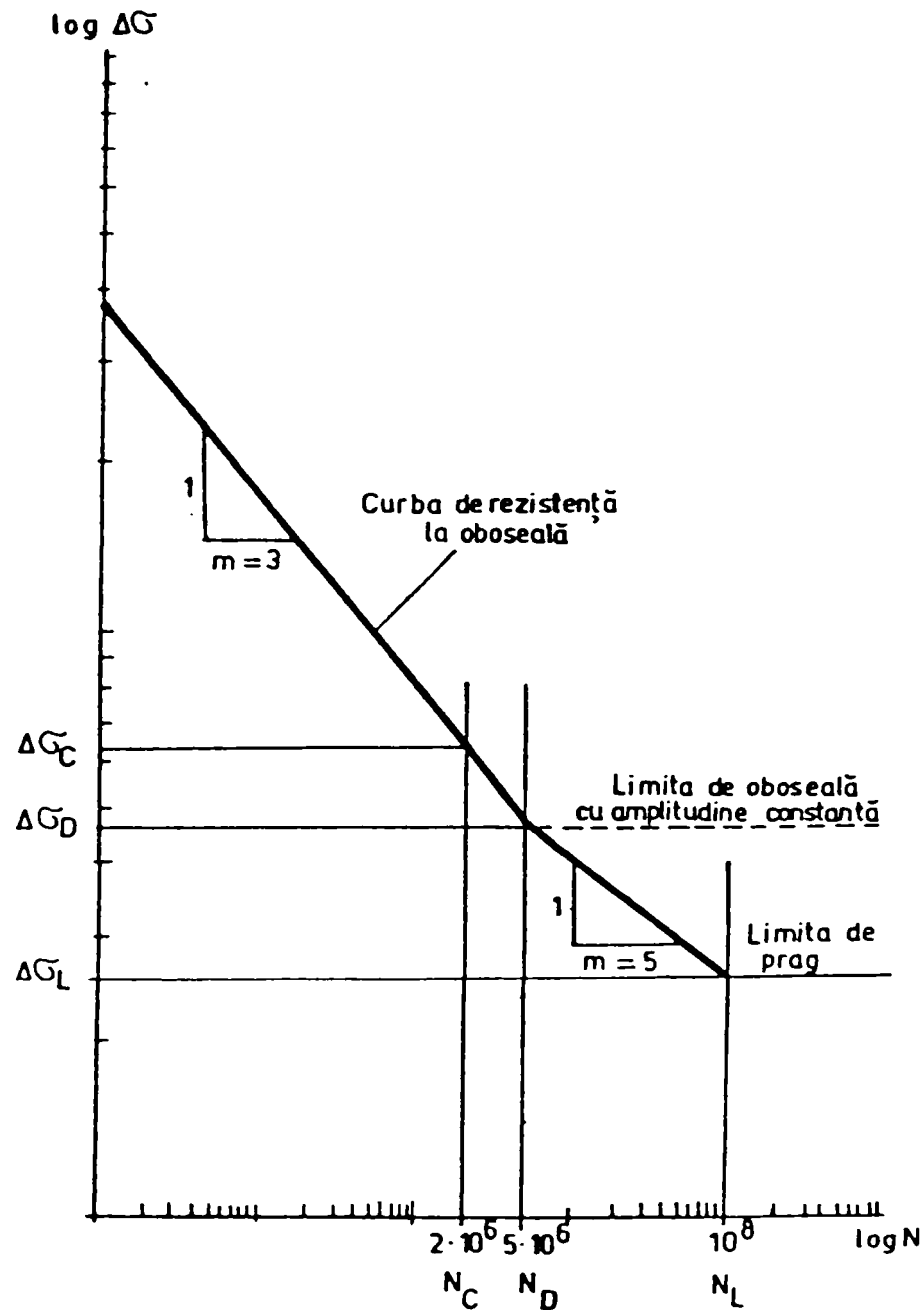


Fig.II-14 [107] Curba de rezistență la oboseală

II.3.1.6 Simboluri ale mărimilor caracteristice solicitării la oboseală

γ_{FF} - coeficient de siguranță parțial pentru încărcări la oboseală ;

γ_{Mf} - coeficient de siguranță parțial pentru rezistența la oboseală;

σ - tensiune normală ;

τ - tensiune tangențială;

σ_{max} , σ_{min} - tensiunea maximă, respectiv minimă în cursul unui ciclu de solicitare;

$\Delta\sigma$ - ecartul de tensiune nominală, pentru tensiune normală;

$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}$$

$\Delta\sigma_D$ – limita (rezistența) la oboseală pentru oscilații cu amplitudine constantă;

$\Delta\sigma_R$ – limita (rezistența) la oboseală, pentru tensiune normală;

$\Delta\sigma_C$ – Valoarea de referință a limitei (rezistenței) la oboseală la 2×10^6 cicluri, pentru tensiune normală;

$\Delta\sigma_E$ – ecartul de tensiune echivalentă de amplitudine constantă;

$\Delta\sigma_L$ – Limita de prag;

m – panta curbei de rezistență (limită) la oboseală;

n_i – numărul ciclurilor pentru ecartul de tensiune $\Delta\sigma_i$;

N – numărul total de cicluri;

N_i – numărul de cicluri cu ecart de tensiune $\gamma_{FF}\gamma_{MI}\Delta\sigma_i$ care provoacă ruperea

N_C – numărul de cicluri (2×10^6) la care este definită $\Delta\sigma_C$;

N_D – numărul de cicluri (5×10^6) la care este definită $\Delta\sigma_D$;

N_L – numărul de cicluri (10^8) la care este definită limita de prag;

II.3.2 Încărcări la oboseală

Încărcările la oboseală se stabilesc potrivit ENV 1991 Eurocode (în pregătire) sau din alt standard de încărcări relevant.

Efectul evenimentului de încărcare trebuie să fie reprezentat de istoria de tensiuni.

La modelele de încărcare pentru evaluarea oboselii structurilor de IR ar trebui luate în seama posibile schimbări în utilizare, în ceea ce privește proporția încărcării.

II.3.3 Coeficienți de siguranță parțiali

II.3.3.1 Generalități

Valorile coeficienților de siguranță parțiali trebuie conveniți între client, proiectant și autoritatea publică, în funcție de:

- comoditatea accesului la inspecții și reparații, frecvența inspecțiilor și întreținerii;
- consecințele cedării prin ruperi,

Dacă nu se prevede altfel, inspecțiile se fac vizual.

Nu se admite posibilitatea cedării totale înaintea unei prealarme.

II.3.3.2 Coeficientul de siguranță parțial pentru încărcarea la oboseală, γ_{Ff}

Coeficientul γ_{Ff} ține cont de incertitudinile (imperfecțiunile) în estimarea:

- nivelurilor încărcărilor aplicate;
- transformării încărcărilor în tensiuni și ecarturi de tensiune;
- ecartul de tensiune echivalentă de amplitudine constantă din spectrul ecarturilor de tensiune de calcul;
- durata de viață de calcul a structurii și evoluția încărcării de oboseală în timpul duratei de viață de calcul prescrise a structurii.

Dacă nu se specifică altfel în documentul normativ (Eurocode sau alt standard corespunzător de verificare adoptat), se poate lua $\gamma_{Ff} = 1$.

II.3.3.3 Coeficientul de siguranță parțial pentru rezistența la oboseală, γ_{Mf}

Valoarea de calcul a rezistenței la oboseală trebuie obținută prin împărțirea cu coeficientul de siguranță γ_{Mf} ; el (γ_{Mf}) ține seama de incertitudinile rezistenței la oboseală, determinate de:

- mărimea detaliului;
- dimensiunea, forma și vecinătatea discontinuităților;
- concentrările locale de tensiuni cauzate de imperfecțiunile sudurii;
- modul de efectuare a sudurii.

II.3.3.4 Valorile recomandate pentru coeficientul de siguranță γ_{Mf} sunt date în tabelul II-3

Tabelul II-3[107]

Posibilități de inspecție și acces	γ_{Mf} pentru componente	
	Principale ("non fail - safe")	Secundare ("fail - safe")
*Control și întreținere periodică. Accesibilitate la detaliile de asamblare	1,25	1,0
* Control și întreținere periodică. Accesibilitate redusă.	1,35	1,15

Componentă principală – componentă a cărei deteriorare are drept consecință distrugerea rapidă a structurii.

Componentă secundară – componentă a cărei deteriorare nu duce la distrugerea structurii. La aceste elemente se acceptă să apară, cu probabilitate scăzută, o degradare parțială, ușor detectabilă, cu viteză de extindere suficient de mică, pentru ca între 2 inspecții curente programate să nu fie afectată capacitatea portantă a structurii.

* Controlul periodic riguros poate duce la detectarea fisurilor înainte de producerea avariei. Un astfel de control se efectuează vizual, dacă nu se specifică altfel în documentația de exploatare.

Accesibilitatea redusă pentru control periodic și întreținere face ca detectarea și repararea fisurilor să fie imposibilă

II.3.4 Spectre de tensiune la oboseală

II.3.4.1 Calculul tensiunilor

Ipotezele de încărcare sunt precizate în [107], 9.2, respectiv la II.3.2. Tensiunile se determină printr-o analiză elastică (calcul în domeniul elastic) a structurii supusă încărcărilor repetate.

II.3.4.2 Ecarturi de tensiuni în materialul de bază

În funcție de felul după care se realizează evaluarea oboselei ([107], 9.5.2, respectiv II.3.5.2 sau [107], 9.5.3), respectiv II.3.5.3), se calculează ecarturile de tensiuni nominale sau geometrice. (A se vedea definițiile de la [107], 9.1.5, traduse la II.3.1.5).

II.3.4.3 Ecarturi de tensiuni în suduri

La îmbinările cu penetrație parțială și la sudurile de colț, efortul transmis de unitatea de lungime a cordonului trebuie descompus în 2 componente, perpendicular și paralel cu axa longitudinală a cordonului.

Se vor considera drept tensiuni care provoacă oboseală:

- tensiune normală, σ_w , perpendiculară pe axa longitudinală a cordonului;
- tensiune tangențială, τ_w , paralelă cu axa longitudinală a cordonului.

Valorile σ_w și τ_w se obțin:

- împărțind componenta forței transmise pe unitatea de lungime a cordonului la grosimea lui de calcul, a ,

sau, conform [107], anexa M:

- prin relațiile: $\sigma_w = [\sigma_{\perp}^2 + \tau_{\perp}^2]^{0.5}$; $\tau_w = \tau_{II}$. (II.16)

II.3.4.4 Spectru al ecarturilor de tensiune de calcul

Variația tensiunii (stress history) provocată de ciclurile de încărcare trebuie redusă la un spectru de ecarturi de tensiune, folosind o metodă de numărare a ciclurilor.

Pentru un detaliu particular, totalul tuturor spectrelor de ecarturi de tensiune, provocate de totalitatea ciclurilor de încărcare, trebuie adunate pentru a alcătui spectrul ecartului de tensiune de calcul utilizabil la evaluarea oboselei.

Spectrul de calcul, pentru un detaliu tip sau pentru un element structural, poate fi alcătuit din istorii de tensiuni obținute prin încercări corespunzătoare sau prin calcule bazate pe teoria elasticității. Metodele "rainflow" sau "reservoir", de numărare a ciclurilor de tensiune, în combinație cu însumarea Palmgren-Langer-Miner, sunt adecvate pentru numeroase aplicații.

II.3.5 Metode de verificare la oboseala

II.3.5.1 Generalități

Verificarea la oboseală a unei structuri se poate face prin:

- metoda cumulării degradărilor, comparând degradările produse cu cea admisibilă, sau
- metoda ecarturilor de tensiuni echivalente, comparându-le pe acestea cu rezistența (limita) la oboseală pentru un număr dat de cicluri.

Pentru o anumită categorie de detaliu (caz de încrestare), tensiunile ce trebuie luate în considerare pot fi tensiuni normale, tensiuni de tangențiale sau de ambele feluri. În cazul detaliilor prezentate în [107], tabelele (9.8.1...9.8.7), se utilizează ecartul de tensiune nominal (A se vedea [107],9.5.2, respectiv II.3.5.2).

Dacă un detaliu constructiv diferă față de un detaliu definit în [107], tabelele 9.8.1...9.8.7, printr-o discontinuitate geometrică inerentă detaliului, se utilizează ecarturi de tensiuni geometrice.

II.3.5.2 Verificarea la oboseală pe baza ecarturilor de tensiune nominală

II.3.5.2.1 Încărcări de amplitudine constantă

Pentru încărcările de amplitudine constantă, condiția de verificare la oboseală este:

$$\gamma_F \Delta \sigma < \Delta \sigma_R / \gamma_M \quad (\text{II.17})$$

unde: $\Delta \sigma$ - ecartul de tensiune nominală,

$\Delta \sigma_R$ - rezistența la oboseală a categoriei de detaliu (A se vedea [107], 9.8, respectiv II.3.8), pentru numărul total de cicluri de solicitare (tensiune), N , corespunzător duratei de viață de calcul.

II.3.5.2.2 Încărcări de amplitudine variabilă

Pentru încărcarea de amplitudine variabilă definite prin spectre de încărcare, evaluarea oboselii trebuie să se bazeze pe regula Palmgren-Langer-Miner a cumulării degradărilor.

Dacă ecartul de tensiune maxim produs de încărcările de amplitudine variabilă este mai mare decât limita (rezistența) la oboseală la încărcare cu amplitudine constantă, se folosește una din următoarele metode de evaluare:

- metoda degradărilor cumulate:
- metoda ecartului de tensiune echivalentă, de amplitudine constantă.

Metoda degradărilor cumulate, D_d , se exprimă prin relația:

$$D_d \leq 1, \text{ unde } D_d = \sum \frac{n_i}{N_i} \quad (\text{II.18})$$

În care n_i - numărul de cicluri de tensiune $\Delta \sigma_i$

N_i – numărul de cicluri cu ecarturi $\gamma_{Ff} \gamma_{Mf} \Delta\sigma_i$, care produce ruperea categoria de detaliu respectivă (A se vedea [107], 9.8, respectiv II.3.8)

Verificarea la oboseală pentru **degradările cumulate** se face având la bază una din următoarele curbe de rezistență la oboseală:

- curbe de rezistență la oboseală cu o singură pantă, $m = 3$;
- curbe de rezistență la oboseală cu două pante, $m = 3$ și $m = 5$;
- curbe de rezistență la oboseală cu două pante și o limită de prag la $N = 108$;**
- curbe de rezistență la oboseală cu o singură pantă $m = 5$ și limita inferioară $N = 108$ – pentru detalii din profiluri tubulare.

Cazul c). este cel mai general – ecarturile de tensiune situate sub palierul curbei pot fi neglijate.

Calculul lui N_i

Dacă se utilizează cazul c), cu o limită (rezistență) la oboseală de amplitudine constantă $\Delta\sigma_D$ la 5×10^6 cicluri, N_i se poate calcula cu una din următoarele relații:

$$\text{- dacă } \gamma_{Ff} \Delta\sigma_i \geq \Delta\sigma_D / \gamma_{Mf}, \quad \text{II.19, atunci } N_i = 5 \cdot 10^6 \cdot \left[\frac{\sigma_D / \gamma_{Mf}}{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_i} \right]^3 \quad (\text{II.20})$$

$$\text{- dacă } \Delta\sigma_D / \gamma_{Mf} > \gamma_{Ff} \Delta\sigma_i \geq \Delta\sigma_L / \gamma_{Mf}, \quad (\text{II.21}), \text{ atunci } N_i = 5 \cdot 10^6 \cdot \left[\frac{\sigma_D / \gamma_{Mf}}{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_i} \right]^5 \quad (\text{II.22})$$

$$\text{- dacă } \gamma_{Ff} \Delta\sigma_i < \Delta\sigma_L / \gamma_{Mf}, \quad (\text{II.23}), \text{ atunci } N_i = \infty \quad (\text{II.24})$$

Metoda ecartului de tensiune echivalentă, de amplitudine constantă

- Procedeul de verificare pe baza condiției:** $\gamma_{Ff} \Delta\sigma_E \leq \Delta\sigma_R / \gamma_{Mf}$ (II.25)

unde $\Delta\sigma_E$ – ecartul de tensiune echivalent, de amplitudine constantă, care, pentru un număr de cicluri dat, provoacă aceeași degradare cumulată ca și spectrul de calcul;

$\Delta\sigma_R$ – rezistența la oboseală aferentă categoriei de detaliu constructiv . A se vedea [107], 9.8, respectiv II.3.8, pentru un număr de cicluri identic cu cel considerat pentru determinarea lui $\Delta\sigma_E$.

Dacă la determinarea $\Delta\sigma_E$ și $\Delta\sigma_R$ se utilizează o curbă cu o singură pantă $m=3$, verificarea se plasează în domeniul de siguranță.

În mod mai general, $\Delta\sigma_E$ se poate calcula cu curba cu 2 pante și prag, cum este definită în figura [107], în fig. 9.1.2, reprodusă în II-14.

- Procedeul de verificare cu ajutorul condiției :** $\gamma_{Ff} \Delta\sigma_{E,2} \leq \Delta\sigma_C / \gamma_{Mf}$ (II.26)

unde: $\Delta\sigma_{E,2}$ – ecartul de tensiune echivalent, de amplitudine constantă, corespunzător a $N = 2 \times 10^5$;

$\Delta\sigma_c$ - valoarea de referință a rezistenței la oboseală, corespunzătoare a $N = 2 \times 10^6$ cicluri a categoriei de detaliu constructiv (A se vedea [107], 9.8, respectiv II.3.8).

II.3.5.2.3 Ecarturi de tensiuni tangențiale

Tensiunile de tangențiale $\Delta\tau$ trebuie tratate în același fel ca și ecarturile de tensiuni normale, utilizând o curbă de rezistență la oboseală cu o singură constantă de pantă $m=3$, după cum urmează:

- dacă $\gamma_{Ff} \Delta\tau_i \geq \Delta\tau_L / \gamma_{Mf}$ (II.27), atunci $N_i = 2 \cdot 10^6 \cdot \left[\frac{\Delta\tau_c / \gamma_{Mf}}{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\tau_i} \right]^5$; (II.28)

- dacă $\gamma_{Ff} \Delta\tau_i < \Delta\tau_L / \gamma_{Mf}$ (II.29), atunci $N_i = \infty$. (II.30)

II.3.5.2.4 Combinarea ecarturilor de tensiuni normale și tangențiale

În cazul combinării tensiunilor normale și tangențiale, verificarea la oboseală trebuie să țină seama de de efectul compus.

Dacă ecartul de tensiune echivalent al tensiunilor de tangențiale reprezintă mai puțin de 15% din ecartul echivalent al tensiunilor normale, efectul tensiunilor de tangențiale poate fi neglijat.

Cu excepția cordonului de sudură, se poate utiliza ecartul tensiunii principale maxime, dacă tensiunile normale și tangențiale produse de aceeași încărcare variază simultan sau dacă direcția tensiunii principale maxime nu variază semnificativ pe parcursul încărcării.

- Dacă în același loc, tensiunile normale și cele tangențiale variază independent, degradările provocate de ele trebuie estimate separat prin regula Palmgren-Langer-Miner și apoi combinate, fiind necesară **respectarea condiției de cumulare a degradărilor**:

$$D_{d,\sigma} + D_{d,\tau} \leq 1 \quad (II.31)$$

unde $D_{d,\sigma} = \sum (n_i / N_i)$, pentru ecarturile de tensiuni normale, $\Delta\sigma_i$; (II.32)

și $D_{d,\tau} = \sum (n_i / N_i)$, pentru ecarturile de tensiuni de tangențiale $\Delta\tau_i$. (II.33)

- În cazul utilizării ecarturilor de tensiuni echivalente de amplitudine constantă, condiția de mai sus devine:

$$\left[\frac{\gamma_{Ff} \Delta\sigma_E}{\Delta\sigma_R / \gamma_{Mf}} \right]^3 + \left[\frac{\gamma_{Ff} \Delta\tau_E}{\Delta\tau_R / \gamma_{Mf}} \right]^5 \leq 1 \quad (II.34)$$

sau
$$\left[\frac{\gamma_{Ff} \Delta\sigma_{E,2}}{\Delta\sigma_C / \gamma_{Mf}} \right]^3 + \left[\frac{\gamma_{Ff} \Delta\tau_{E,2}}{\Delta\tau_C / \gamma_{Mf}} \right]^5 \leq 1 \quad (II.35)$$

Ecarturile de tensiune în sudură se determină ca la [107], 9.4.3, respectiv II.3.4.3.

Degradările se calculează separat, pentru tensiunile normale și tangențiale, utilizând regula Palmgren-Langer-Miner, apoi se combină cu relația:

$$D_{d\sigma} + D_{d\tau} \leq 1, \text{ în care} \quad (\text{II.36})$$

$$D_{d\sigma} = \sum (n_i/N_i), \text{ pentru ecarturi de tensiuni normale, } \sigma_w \text{ (definite în [107], 9.4.3, respectiv II.3.4.3);} \quad (\text{II.37})$$

$$D_{d\tau} = \sum (n_i/N_i), \text{ pentru ecarturi de tensiuni tangențiale, } \tau_w \text{ (definite în [107], 9.4.3, respectiv II.3.4.3).} \quad (\text{II.38})$$

II.3.5.3 Verificarea la oboseală bazată pe ecarturi de tensiuni geometrice

Valoarea maximă a ecartului de tensiune geometrică (A se vedea definiția din [107], 9.1.5 (9), tradusă la II.3.1.5 (9)) se obține studiind starea de tensiune în diferite puncte la marginea cordonului în jurul îmbinării sudate sau în zonele de concentrări de tensiuni.

Tensiunile geometrice pot fi determinate folosind coeficienți de concentrare printr-o analiză de element finit sau cu ajutorul unor modele experimentale.

Verificările la oboseală pe baza ecartului tensiunilor geometrice se fac similar cu evaluarea din [107], 9.5.2, respectiv II.3.5.2, înlocuind însă în această relație ecartul tensiunilor nominale cu ecartul tensiunilor geometrice.

II.3.6 Rezistență la oboseală

II.3.6.1 Generalități

Rezistența (limita) la oboseală pentru tensiuni normale (A se vedea figura II-15 după [107], fig. 9.6.1) se definește printr-o serie de curbe $\log \Delta\sigma_R = f(\log N)$, fiecare curbă referindu-se la o **categorie de detaliu tip**). Fiecare **categorie de detaliu** este denumită printr-un număr ce reprezintă, în N/mm^2 , valoarea de referință $\Delta\sigma_C$ a rezistenței la oboseală, la $2 \cdot 10^6$ cicluri. Valorile corespund categoriilor de detalii din tabelul II-4 (A se vedea [107], tabel 9.6.1, respectiv la II.3.6.2.1).

Curbele sunt definite de relația:

$$\log N = \log a - m \log \Delta\sigma_R, \quad (\text{II.39})$$

unde $\Delta\sigma_R$ - rezistența la oboseală;

N - numărul de cicluri al ecartului de tensiune;

m - constanta pantei curbelor de rezistență la oboseală, cu valorile 3 și/sau 5;

$\log a$ - constantă care depinde de panta curbei folosite.

Când informațiile încercărilor sunt folosite pentru determinarea categoriei de detaliu pentru un detaliu constructiv particular, valoarea ecartului de tensiune $\Delta\sigma_R$ corespunzând lui N de $2 \cdot 10^6$ cicluri trebuie calculată pentru 75 % interval de încredere la 95 % probabilitate de supraviețuire (raportul procentual dintre epruvetele care se rup și cele care nu se rup) pentru $\log N$, ținând seama de abaterea standard și de mărimea epruvetei. Numărul punctelor de informații (nu mai mic de 10) trebuie considerat în analiză statistică.

Pe măsura creșterii probabilității de supraviețuire scade ecartul de tensiuni $\Delta\sigma$ corespunzător aceluiași număr de cicluri.

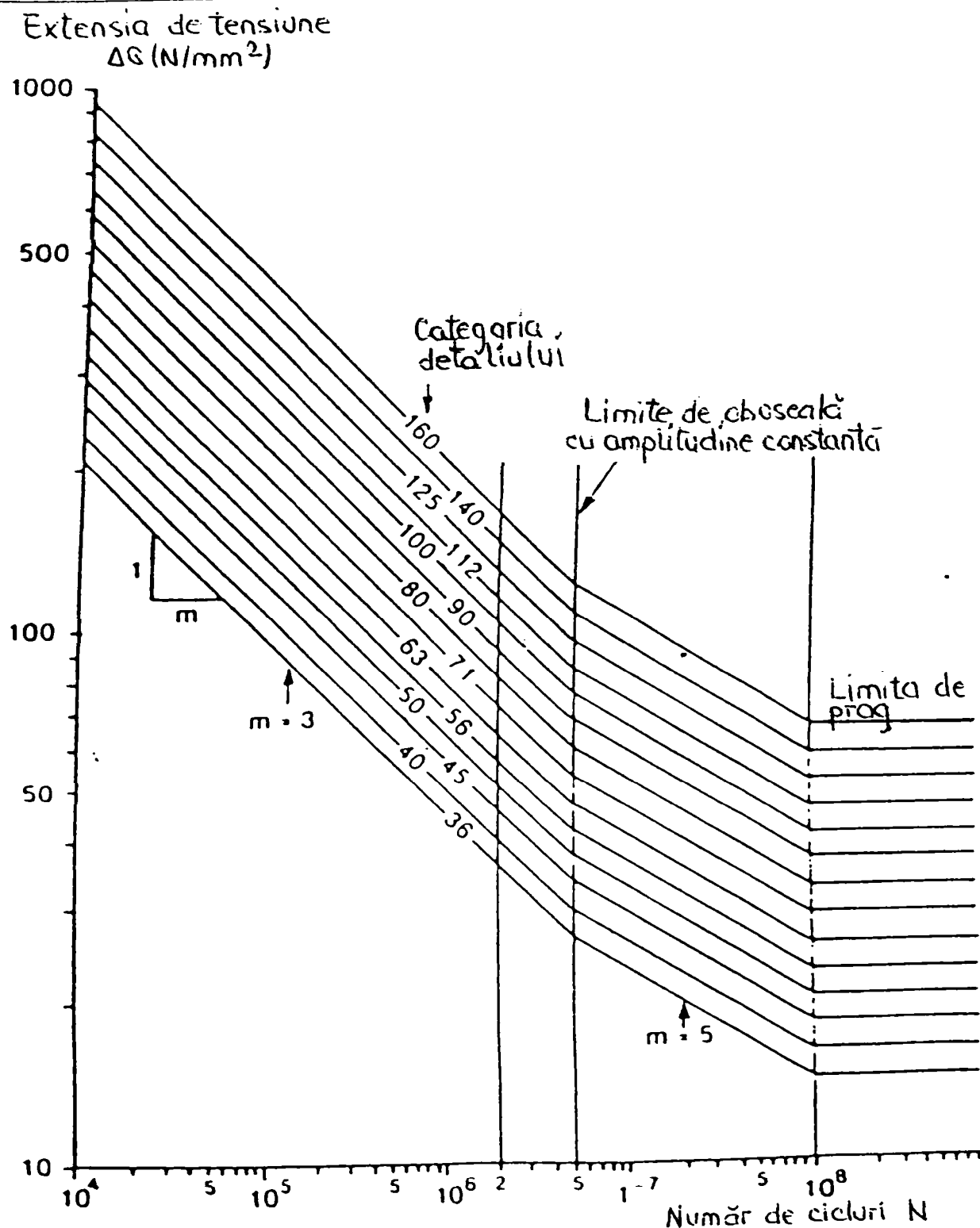


Fig.II-15 [107] Curbele de rezistență la oboseală pentru ecarturi de tensiuni normale

Curbe de rezistență la oboseală sunt stabilite pentru

- detalii clasificate, pentru care este valabilă procedura de ecart de tensiune nominală (A se vedea [107], 9.6.2, respectiv II.3.6.2);
- detalii neclasificate, pentru care este valabilă procedura de ecart de tensiune geometrică (A se vedea [107], 9.6.3, respectiv II.3.6.3);

II.3.6.2 Curbe de rezistență la oboseală pentru detalii clasificate

II.3.6.2.1 Curbe de rezistență la oboseală pentru secțiuni deschise

Categoriile de detalii în care pot fi încadrate diferitele **detalii constructive tip** ale secțiunilor deschise sunt prezentate în [107], tabelele 9.8.1...9.8.5, sub titlurile:

- Detalii nesudate;
- Secțiuni sudate;
- Cordon de sudură cap la cap;
- Îmbinări sudate care nu transmit eforturi;
- Îmbinări sudate care transmit eforturi.

În [107], tabelul 9.8.1 (reprodus în tabelul II-5) și la următoarele, săgețile de la detaliile desenate indică locul și direcția tensiunilor pentru care este valabilă rezistența la oboseală corespunzătoare.

Categoria de detaliu care se folosește pentru a denumi o curbă particulară de rezistență la oboseală corespunde la o valoare de referință (în N/mm^2) a rezistenței la oboseală de $2 \cdot 10^6$ cicluri, după caz $\Delta\sigma_c$, $\Delta\tau_c$.

În [107], fig. 9.6.1, reprodusă în fig. II-15, sunt prezentate curbe de rezistență la oboseală pentru ecarturi de tensiune normale nominale pentru câteva **categorii de detalii tip**. Limita de oboseală la amplitudine constantă corespunde rezistenței la oboseală pentru 5×10^6 cicluri, iar limita de prag corespunde rezistenței la oboseală pentru 10^8 cicluri.

Tabelul II-4 (după [107])

Valori numerice ale curbelor de rezistență la oboseală, pentru ecarturi de tensiuni normale				
Categoria de detaliu N/mm^2	"log a" pentru $N \cdot 10^8$		Ecartul de tensiune la limita de oboseală sub amplitudine constantă ($N = 5 \cdot 10^6$) N/mm^2	Ecartul de tensiune la limita de prag ($N = 10^8$) N/mm^2
	$N \leq 5 \cdot 10^6$ ($m = 3$)	$N \leq 5 \cdot 10^6$ ($m = 5$)		
160	12.901	17.036	117	64
140	12.751	16.786	104	57
.
40	11.101	14.036	29	16
36	10.951	13.786	26	14

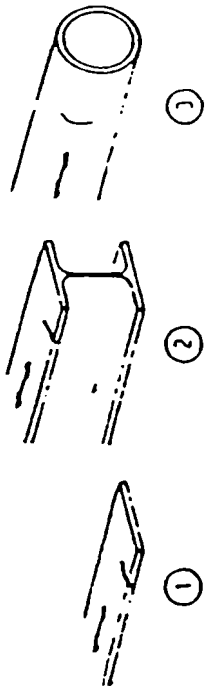
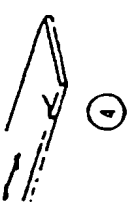
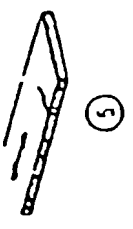
Pentru tensiunile tangențiale

Curbele de rezistență la oboseală pentru ecarturi de tensiuni tangențiale nominale sunt prezentate în [107], fig. 9.6.2, iar valorile pentru calcularea rezistenței la oboseală – în [107], tabelul 9.6.2.

II.3.6.2.2 Rezistență la oboseală pentru secțiuni tubulare

Pentru detalii tubulare în [107] sunt date de calcul, așa cum rezultă din indicațiile tabelului II-6.

Tabelul II-5 [107]

DETAIL CATEGORY	CONSTRUCTIONAL DETAILS	DESCRIPTION	REQUIREMENT
160		<p>Rolled and extruded products</p> <p>① Plates and flats. ② Rolled sections. ③ Seamless hollow sections (see Tables 9.8.6 and 9.8.7).</p>	<p>① to ③ Sharp edges, surface and rolling flaws to be improved by grinding.</p>
140		<p>Sheared or gas cut plates</p> <p>④ Machine gas cut or sheared material with no drag lines.</p>	<p>④ All visible signs of edge discontinuities should be removed.</p>
125		<p>⑤ Manually gas cut material or material with machine gas cut edges with shallow and regular drag lines.</p>	<p>⑤ Subsequently dressed to remove all edge discontinuities.</p> <p>④ and ⑤</p> <ul style="list-style-type: none"> • No repair by weld refill. • Re-entrant corners (slope <math>\le 1:4</math>) or aperture should be improved by grinding for any visible defects. • At apertures the design stress area should be taken as the net cross section area.

Tabelul II-6

		Reprezentare a detaliilor	Curbă de rezistență la oboseală	Valori de calcul numeric al rezistenței la oboseală	Coeficienți pentru efecte ale încovoierii din îmbinare
Detalii cu secțiuni tubulare		Tabel 9.8.6	Figura 9.6.1	Tabel 9.6.3	-
Detalii de îmbinare secțiuni tubulare pentru grinzi cu zăbrele	<i>Circulare</i>	Tabel 9.8.7	Figura 9.6.3	Tabel 9.6.3	Tabel 9.6.4
	<i>Rectangulare</i>				Tabel 9.6.5

II.3.6.3 Curbe de rezistență la oboseală pentru detalii neclasificate

Verificarea la oboseală a tuturor detaliilor constructive necuprise în [107], tabelele 9.8.1...9.8.7 (de tipul II-5, care corespunde cu 9.8.1), precum și a elementelor cu secțiuni tubulare și a îmbinărilor tubulare cu grosimi a peretelui mai mari de 12,5 mm trebuie să se facă utilizând procedeul bazat pe ecarturi de tensiuni geometrice, conform [107], 9.5.3, respectiv II.3.5.3.

Evaluările de oboseală bazate pe ecarturi de tensiuni geometrice utilizează următoarele curbe de rezistență la oboseală:

a) pentru suduri cap la cap cu penetrație completă:

- categoria 90 din [107], figura 9.6.1 (aici fig. II-15), dacă sunt satisfăcute ambele condiții de acceptabilitate a profilului cordonului și ale defectelor de sudură;
- categoria 71 din [107], figura 9.6.1 (aici fig. II-15), dacă sunt satisfăcute numai condițiile de acceptare a defectelor de sudură admisibile.

b) Pentru cordonale de sudură cap la cap cu penetrație parțială și sudurile de colț care transmit eforturi:

- categoria 36 din [107], figura 9.6.1 (aici fig. II-15) sau o curbă dedusă din rezultate experimentale.

Pentru ecarturile de tensiuni a se vedea [107], 9.4.3, respectiv II.3.4.3.

II.3.7 Modificări ale rezistenței la oboseală

II.3.7.1 Ecarturi de tensiuni în detalii fără sudură sau în detalii cu tensiuni reduse

În detaliile fără sudură sau în detaliile sudate cu tensiuni mici, ecartul de tensiune efectivă care se utilizează la evaluarea la oboseală trebuie determinată prin adunarea cotei-părți de tracțiune din ecartul de tensiune cu 60% din cota-parte de compresiune a ecartului de tensiune.

II.3.7.2 Influența grosimii

Pentru materiale cu grosimi mai mari de 25 mm rezistența la oboseală se reduce astfel:

$$\Delta\sigma_{R,t} = \Delta\sigma_R(25/t)^{0,25} \text{ unde } t > 25 \text{ mm} \quad (\text{II.40})$$

Reducerea pentru grosime se aplică numai la detalii structurale cu suduri perpendiculare pe direcția tensiunilor normale.

II.3.7.3 Curbe modificate ale rezistenței la oboseală

Rezultate experimentale arată că unele detalii nu se încadrează pe curbele de oboseală prezentate în [107], figura 9.6.1, reprodusă în fig. II-15. Se recomandă ca aceste detalii să fie încadrate la o categorie de detaliu imediat inferioară față de rezistența lor la oboseală la $2 \cdot 10^6$ cicluri, cum ar fi fost altfel indicat. Clasificarea unor asemenea detalii poate fi îmbogățită printr-o categorie de detaliu în tabelul 9.6.1, cu condiția ca curbele de rezistență la oboseală modificate să fie adoptate în cele la care limita de oboseală de amplitudine constantă este considerată la o rezistență la oboseală de $10 \cdot 10^6$ cicluri pentru $m=3$, conform [107], figura 9.7.1. În [107], tabelele 9.8.1...9.8.5 (de tipul II-5), aceste detalii sunt marcate cu asterisc (detaliile 50, 45 și 36). Prin săgeți sunt marcate direcțiile tensiunilor la care se referă rezistența la oboseală

II.3.8 Tabele de clasificare

Clasificarea detaliilor în [107], tabelele 9.8.1...9.8.7 (de tipul II-5, care reproduce tabelul 9.8.1), a fost făcută pe baza tensiunilor în direcția săgeților, pentru potențiale fisuri la suprafața metalului de bază sau în cazul fisurării cordonului de sudură, pe baza tensiunilor calculate în cordonul de sudură.

II.4 MECANICA RUPERII

II.4.1 Moduri de ruperi

La analiza mecanicii ruperii se pleacă de la premisa existenței defectelor de material sub formă de fisuri, rezistența materialului studiindu-se sub aspectul extinderii fisurilor [3] (Hütte, D47, 9.2.6.).

- **După deformațiile permanente** care o precedă ruperile sunt de 2 feluri:

- rupere ductilă;

- rupere fragilă.

Comportarea ductilă este de preferat, ea permițând o redistribuire a eforturilor, micșorând efectul catastrofal al ruperii.

În afară de faptul că ductilitatea sau fragilitatea caracterizează un anumit material, trebuie cercetate condițiile (eforturi peste o anumită mărime, stări complexe de eforturi, temperaturi scăzute, concentratori –fisuri, defecte, suduri etc.- deformații plastice mari) care favorizează ruperea fragilă.

- **În funcție de solicitarea mecanică** ce produce ruperea, se face distincție între:

- ruperea la solicitări statice progresive;

- ruperea prin oboseală.

- **După mișcarea relativă a suprafețelor de rupere**, situate de o parte și de alta a planului în care se extinde fisura, propagarea (extinderea) fisurilor are 3 moduri caracteristice [3] și [185], ilustrate de fig. II-16 [3]..

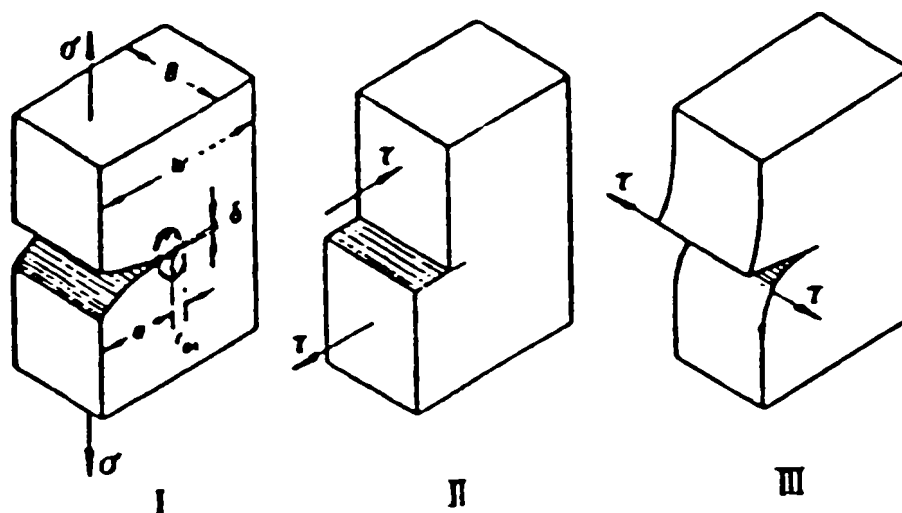


Fig.II-16 [3] Principale categorii de sollicitare în cazul extinderii fisurilor

- Se disting 2 moduri de analiză [3]

- Teoria ruperii liniar-elastice

Consideră că până la rupere materialul se comportă, macroscopic, elastic. Când tensiunea normală atinge valoarea σ_B apare o extindere a fisurii și o rupere fragilă.

$$\sigma_B = K_{Ic} / Y (\pi a)^{1/2} \quad (\text{II.41})$$

unde, K_{Ic} - tenacitatea la rupere, iar Y – factor de corecție, pentru geometria piesei și forma fisurii.

Teoria mecanicii liniar-elastice a ruperii este valabilă numai pentru materialele extrem de fragile. La majoritatea materialelor, la vârful fisurii se formează o zonă plastică (caracterizată de raza r_{pl} (A se vedea fig. II-16), astfel încât în ecuația de mai înainte se introduce o lungime efectivă de rupere

$$a_{ef} = a + r_{pl} \quad (\text{II.42})$$

O prezentare detaliată se face în capitolul V.

Teoria ruperii elasto-plastice

Se disting 2 metode:

- a) Conceptul COD (crack opening displacement) [3]

La deformări plastice mai mari în vârful fisurii ($r_p/a > 0,2$) trebuie plecat de la conceptele mecanicii elasto-plastice a ruperii. În conformitate cu conceptul COD apare o extindere ireversibilă a fisurii, când deschiderea fisurii δ depășește valoarea critică

$$\delta_c = K_c^2 / E R_p \quad (\text{II.43})$$

Conceptul COD permite totuși, în general, numai o evaluare calitativă, deoarece tranziția elasto-plastică nu este foarte simplu de determinat.

O prezentare detaliată se face în capitolul V.

b) Integrală J

Alături de conceptul COD, comportarea elasto-plastică a vârfului fisurii se încearcă a fi caracterizată prin așa numita integrală de linie a vârfului fisurii între limitele alungire-tensiune.

O prezentare detaliată se face în capitolul V.

O altă sistematizare a calculului mărimii defectului maxim admis, cu referire la structurile sudate, este prezentată și în [215] punctul 3.2, , procedeele de evaluare fiind grupate în 3 situații:

- $\sigma_{\max} < \sigma_c$, condițiile de solicitare sunt elastice, criteriul de referință fiind K_{Ic} ;
- $\sigma_c \leq \sigma_{\max} < 2 \sigma_c$; condițiile de solicitare pentru zone limitate ca extindere, cu gradient ridicat, putându-se considera elasto-plastice; criteriul de referință este δ_c (COD);
- $\sigma_{\max} > 2 \sigma_c$, condițiile de solicitare sunt în domeniul pur plastic, fiind nevoie de determinat deformația plastică echivalentă din zona cu defecte.

II.4.2 Viteza de propagare a fisurii în condiții de oboseală

Dacă în construcția metalică au apărut fisuri, iar elementul este supus la solicitări variabile, durata de viață previzibilă se poate aprecia prin încercări de stabilire a vitezei de propagare a fisurii la oboseală sau cu ajutorul formulelor adecvate din mecanica ruperii.

O schema de evaluare, prin calcule cu formule din mecanica ruperii, a duratei de viață a unui element cu fisură superficială, solicitat la oboseală, este dată în figura II-17. Se utilizează formula lui Paris, considerată și în [215], punctul 3.2, adecvată pentru asemenea calcule la structuri sudate.

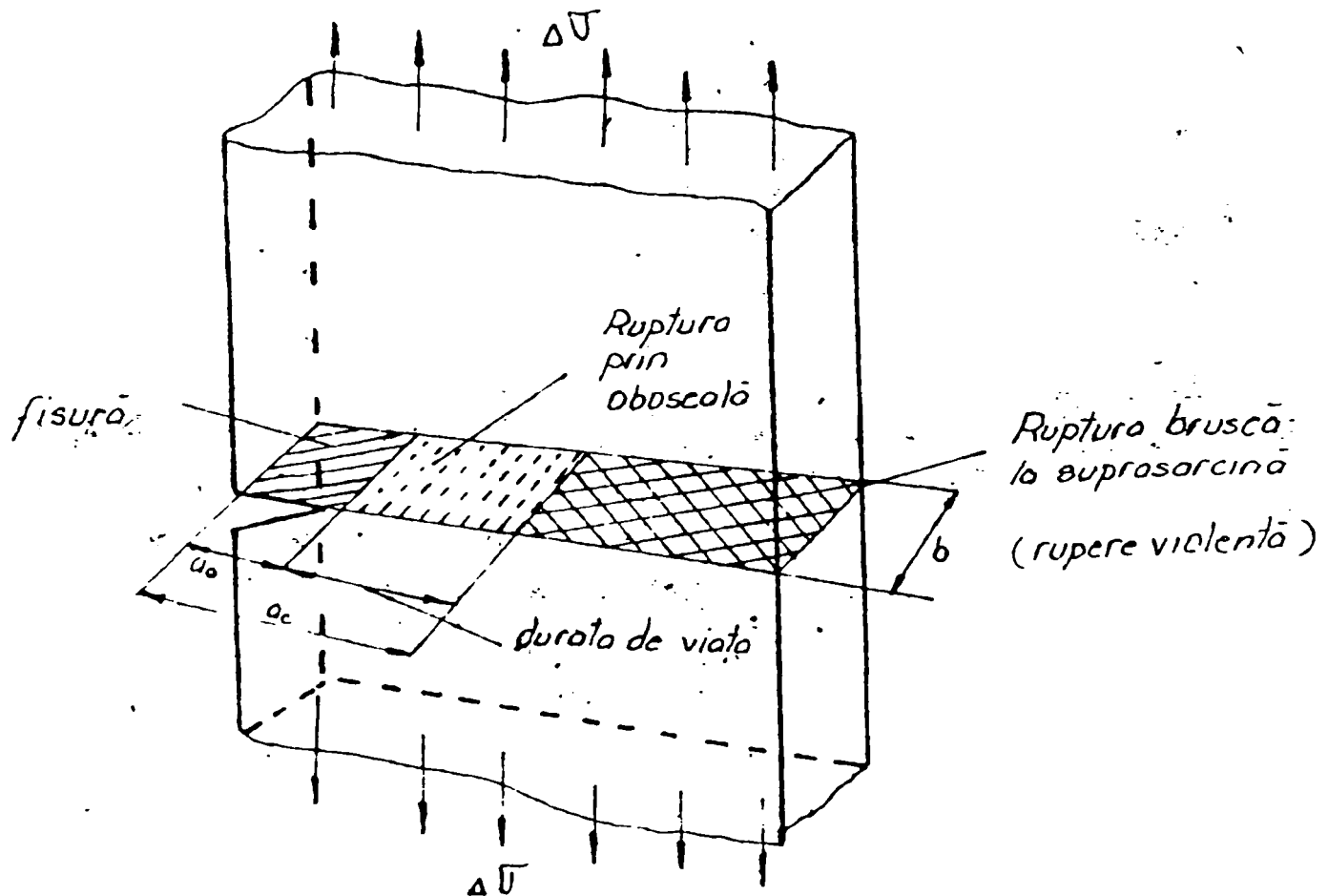


Fig.II-17 [199] Schema de analiză a duratei de viață la un element cu fisură superficială

Durata de viață este definită prin numărul de cicluri necesar propagării fisurii, N , de la cota inițială " a_0 " până la cota critică " a_c ", la care apare ruperea.

N este dat de relația lui Paris:

$$N = \frac{1}{c} \int_{a_0}^{a_c} \frac{1}{\Delta k^m} da$$

(II.44)

unde:

c și m – constante de material; Δ_K – variația de intensitate a sollicitării.

Variația de intensitate Δ_K este diferența dintre K_{\max} – K_{\min} și se exprimă prin relația:

$$\Delta_K = K_{\max} - K_{\min} = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) \sqrt{\pi \beta a} \quad (\text{II.45})$$

unde β se dă în tabelele sau diagrame funcție de mărimea fisurii (lățimea "b" și lungimea "a")

După Takashima, constantele C și m se adoptă în funcție de rezistența de curgere σ_C și rezistența de rupere σ_r .

$$\log C = 0,0483 \sigma_C - 12,432 \text{ sau } \log C = 0,0556 \sigma_r - 13,726, \text{ iar (II. 46)}$$

$$m = 4,52 - 0,026 \sigma_C \text{ sau } m = 5,19 - 0,0297 \sigma_r. \quad (\text{II.47})$$

Indicații și interpretări privind desfășurarea calculelor sunt date în [215], punctul 3.2.

II.4.3 Calculul față de ruperea fragilă , după Eurocode 3, ENV 1993-1-1[107]

II.4.3.1 Rezistența față de ruperea fragilă

Ruperea fragilă este definită ca cedarea materialului fără deformații plastice, cedare care depinde de următorii factori:

- rezistența oțelului (calitate, marcă);
- grosimea elementului;
- viteza de încărcare;
- temperatura de serviciu cea mai joasă;
- reziliența materialului;
- tipul structural al elementului.

Calitatea oțelului este exprimată prin testul care determină temperatura la care oțelul are o reziliență Charpy de minimum 27 J.

Procedeu prezentat în continuare își propune să determine cea mai joasă temperatură de serviciu funcție de: marca oțelului, grosimea elementului și cazul de încărcare.

În procedură se au în vedere oțeluri conform EN 10025 [104] și EN 10113 [105], pentru temperaturi sub – 40 C (Standardele respective sunt adoptate identic în România, ca SR EN 10025 și ca SR EN 10113).

II.4.3.2 Procedeu de calcul

II.4.3.2.1 Condiții de lucru, nivelul de severitate

Sunt definite trei nivele de severitate, cu eforturi unitare calculate cu valorile de calcul ale încărcărilor și cu un coeficient de siguranță parțial $\gamma_F = 1,0$.

Nivelul S1

- elemente fără sudură;
- elemente sudate cu eforturi unitare reziduale ce nu depășesc 0,2 din efortul unitar de curgere;

- elemente tratate termic în scopul eliminării tensiunilor reziduale, la care ținând cont de concentratorii geometrici, nu se depășește 0,67 din limita de curgere

Nivelul S2:

- elemente sudate la care eforturile reziduale locale se încadrează în 0,2 – 0,67 din limita de curgere;
- elementele supuse la tratamente termice postsudură cu factori de concentrare a eforturilor de până la de două ori limită de curgere.

Nivelul S3:

- elemente sudate cu tensiuni reziduale între 0,67 – 2 ori;
- elemente sudate supuse la tratamente termice postsudură la care factorul concentrator al eforturilor este cuprins între 2 și 3 limita de curgere.

II.4.3.2.2 Cazuri de încărcare

Sunt definite două cazuri de încărcare, după cum urmează:

- R1 – încărcări statice normale, ca de exemplu greutatea proprie, încărcări mobile, vânt, încărcări la macarale.
- R2 – încărcări de impact (explozii, ciocniri).

II.4.3.2.3 Consecințele cedării

Din acest punct de vedere există două tipuri de elemente:

- C1 – elemente sau îmbinări necritice, la care cedarea are doar efecte locale, fără consecințe locale;
- C2 – elemente sau îmbinări a căror cedare duce la colapsul structurii.

II.4.3.2.4 Limita de curgere nominală.

Valoarea nominală a limitei de curgere, redusă cu grosimea elementului se obține cu relația:

$$f_{y1} = f_{y0} - 0,25(f/t_1)(f_{y0}/235) \quad (II.48)$$

unde f_{y0} – valoarea de bază pentru f_{yt} (N/mm^2)

t – grosimea elementului

$$t_1 = 1 \text{ mm}$$

Tabelul II-7 [107]

Valori de bază pentru limite de curgere minime			
Marca oțelului	Fe 360	Fe 430	Fe 510
f_{y0}	235	275	355

II.4.3.2.5 Parametri

Tabelul II-8 [107]

Valorile constantelor			
Nivelul de încărcare (solicitare)	S1	S2	S3
K_a	0,18	0,18	0,1
K_b	0,4	0,15	0,07
K_c	0,03	0,03	0,04
Caz de încărcare	R1	R2	
K_d	10^{-3}	1,0	
Consecințele cedării	C1	C2	
Valoarea lui γ_c	1,0	1,5	

Valorile pentru temperatura T_{cv} , funcție de grosimea elementului, sunt date în tabelul II-9.

Tabelul II-9 [107]

Temperatura de încercare T_{cv} pentru epruvete Charpy cu creștătura în V					
Nivelul rezilienței	Valori precizate			Valoarea nominală T_{cv} pentru reziliență de 27 J, pentru grosimea t (mm)	
	Temperatura de încercare (°C)	Reziliența J minimă, pentru grosimea t (mm)		$t \leq 150$	$150 < t \leq 250$
		$10 < t \leq 150$	$150 < t \leq 250$		
E 10025					
B	+20	27	23	+20	+25
C	0	27	23	0	+5
D	-20	27	23	-20	-15
DD	-20	40	33	-30	-25

II.4.3.2.6 Relații de calcul

Coeficientul de reziliență se calculează cu relația:

$$K_{Ic} = (\gamma_c \alpha)^{0,65} f_{yt}^{0,5} / 1,226 \quad (II.49)$$

$$\text{unde: } \alpha = \frac{1}{K_a + K_b \ln(t/t_1) + K_c (t/t_1)^{0,5}} \quad (II.50)$$

Temperatura minimă de serviciu se calculează cu relația:

$$T_{min} = 1,4T_{cv} + 25 + \beta + (83 - 0,08 f_{yt}) [Kd]^{0,17} \quad (II.51)$$

în care: $\beta = 100(\ln K_{1c} - 8,06)$

(II.52)

\

II.5 Îmbătrânirea metalului Îmbătrânirea reprezintă totalitatea proceselor chimice și fizice ce se desfășoară

într-un material în decursul timpului [89], legate de modificări ale proprietăților materialelor (de cele mai multe ori defavorabile).

Cauzele îmbătrânirii [3] (D45, 9) pot fi:

- interioare, ca de exemplu stări termodinamice instabile ale materialului, relaxarea, reducere a tensiunilor, modificare a compoziției chimice și a structurii moleculare, transformări de fază sau de structură etc.;
- exterioare, ca de exemplu variațiile de temperatură, absorbția de energie sub formă de căldură, expunerea la radiații din spectrul vizibil, ultraviolet sau ionizante, influențele chimice etc.

La metale îmbătrânirea modifică: ductilitatea, limita de curgere, reziliența, prin înglobarea de atomi străini, ca de exemplu rigidizarea oțelului pentru construcții cu azot la prelucrarea la rece (îmbătrânire la sau după deformare) sau a oțelurilor cu crom sau mangan cu hidrogen (cu rețele cubice cu volum centrat).

În faza de proiectare, una din cauzele esențiale ale îmbătrânirii, cu efectul ei deosebit de periculos-fragilizarea, a fost rezolvat, prin utilizarea oțelurilor sudabile cu granulație fină [84]. Este știut că aceste oțeluri sunt calmate (dezoxidate suplimentar cu Al) și conțin mici cantități de elemente de aliere care, la temperaturi mai înalte dau naștere unor precipitate foarte fine răspândite, cum ar fi nitruirile, carbonitruirile și/sau carburile. Astfel de precipitate împiedică mărirea grăunților în domeniul austenitic și determină formarea unei granulații reale, fine (mărirea grăunțului feritic δ și chiar mai fină în starea de livrare normalizată, care se menține și după sudare. În consecință, oțelurile sudabile cu granulație fină au o rezistență mărită față de ruperea fragilă. Prin urmare, este de așteptat ca structurile utilajelor proiectate după 1970, să aibă în puține cazuri elemente cu metal îmbătrânit, cauza principală fiind înlăturată. Oricum, procedurile descrise la Capitolul V permit evidențierea fenomenului.

II.6 MODIFICĂRI ÎN GEOMETRIA STRUCTURII

Abateri de la geometria structurii

Structura, elementele sale și căile de rulare nu trebuie să depășească anumite abateri geometrice, impuse prin proiect, deoarece apar tensiuni și solicitări suplimentare, care conduc la degradare prematură.

Măsurările, de volum mare, iar unele și de complexitate - așa cum poate rezulta și din Anexa II-1 [179] - se fac cu dotările specifice ale laboratoarelor de măsurări, cu proceduri care nu fac obiectul prezentei lucrări.

II.7 PRINCIPALELE ETAPE ÎN EVALUAREA ȘI PRELUNGIREA DURATEI DE VIATĂ A CONSTRUCȚIILOR PORTANTE ALE INSTALAȚIILOR DE RIDICAT

Stadiul actual din țară este caracterizat de sistematizarea din [199]. Completări ale metodologiei din [199], al căror obiectiv a fost particularizarea, iar în cazurile necesare și dezvoltarea aspectelor care țin de specificul categoriei de utilaj (structură) – IR sau utilaje “grele” din carierele de cărbune de suprafață sau din gospodăriile de cărbune ale centralelor termice - , sunt făcute în lucrările [201], [203] [202] și [179]. Prezentarea de mai jos urmărește expunerea din [199].

II.7.1 Faza preliminară, de adunare de date

II.7.1.1 Fișa utilajului

Fișa utilajului, Anexa II-2 [201] și Anexa II-3 [179] este un formular ce se transmite beneficiarului utilajului, care-l analizează și-l completează. În funcție de gradul de completare cu date a fișei, se poate decide modul de abordare a lucrării, volumul de încercări și măsurători necesar.

Istoricul de încărcare. Din punctul de vedere al verificării stării de oboseală, cel mai important element este istoricul de încărcare, notat la punctul B al fișei; el conține toate perioadele distincte de lucru, reconstituite din cartea utilajului. Aceste perioade vor ține seamă de încărcarea utilajului, regimul de lucru, funcție de schimbările profilului de lucru din locul unde este montat utilajul, condițiile de exploatare. De o importanță deosebită este numărul ciclurilor de încărcare pe oră sau pe schimb. Această informație fiind greu de obținut, se va aprecia numărul maxim și minim.

Istoricul de încărcare mai conține încărcarea medie raportată la sarcina nominală, în procente, respectiv stabilirea spectrului de încărcare. Prin acest lucru se precizează cât la sută din numărul total de cicluri se efectuează la sarcina nominală și cât la fracțiuni din sarcina nominală.

II.7.1.2 Constatare la fața locului

După completarea fișei utilajului de către beneficiar, se face o confruntare a acesteia cu utilajul, prin constatare la fața locului.

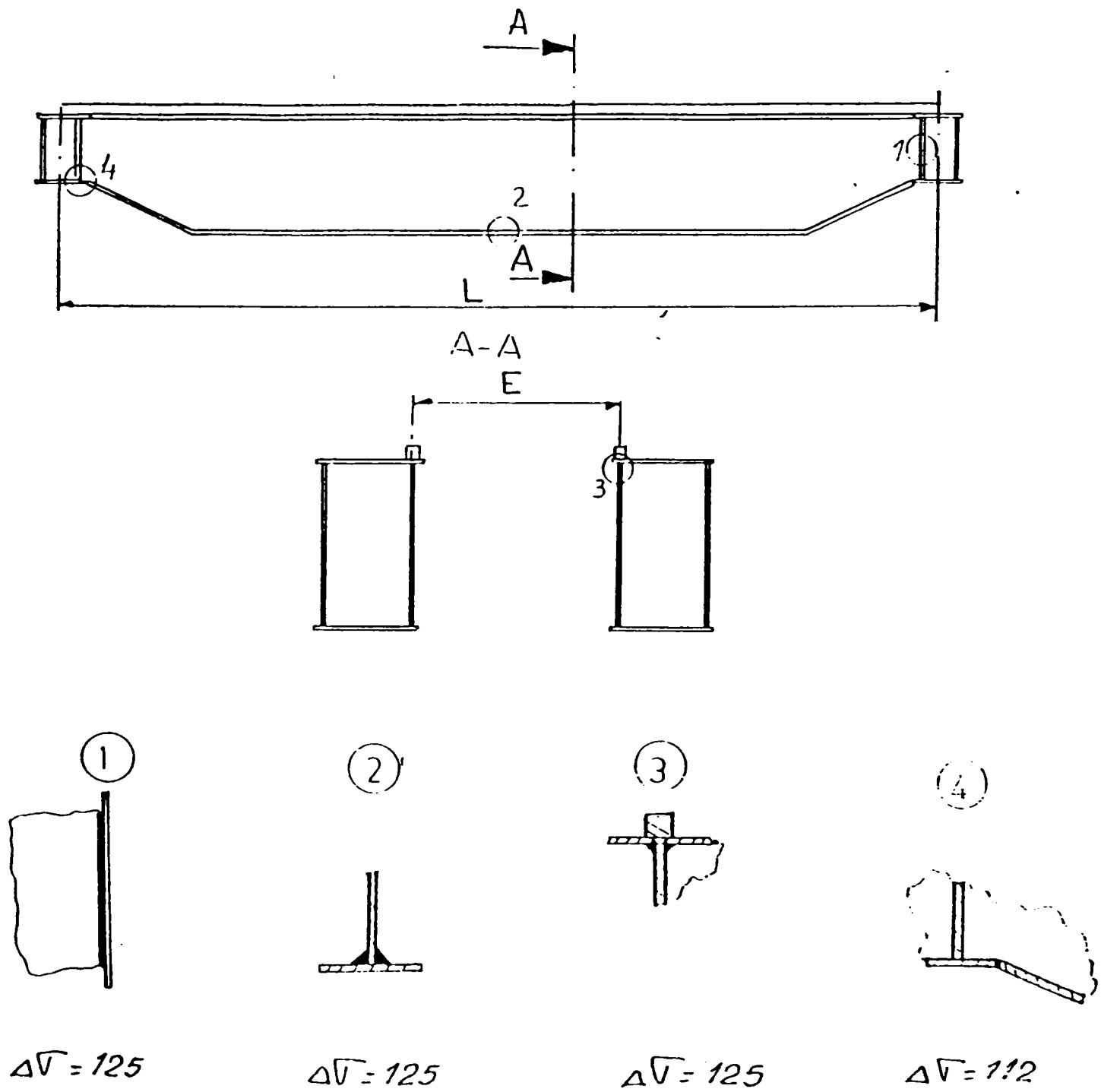
Se verifică corectitudinea completării fișei și se completează datele lipsă.

De asemenea, la constatare se mai urmărește:

- existența și funcționarea corectă a dispozitivelor de siguranță;
- verificarea vizuală a zonelor periculoase în scopul detectării eventualelor fisuri;
- stabilirea accesibilității zonelor periculoase – acest lucru influențând valoarea coeficientului de siguranță γ_{Mf} ;
- la structurile cu îmbinări (nituite sau fixate cu șuruburi) se verifică dacă nu există urme de rugină, "scurse", în dreptul niturilor, ceea ce ar putea indica slăbirea acestora;
- starea (funcționarea, alinierea, gradul de uzură) mecanismelor utilajului;
- accesibilitatea zonelor periculoase, existente de fisuri;
- funcționarea, alinierea, gradul de uzură a mecanismelor;
- starea căilor de rulare;
- existența documentației tehnice și a breviarului de calcul.

La această fază se verifică punctele critice ale solicitărilor, ele fiind de regulă cele indicate la punctul II.7.3.1.

Pentru utilajele grele se va proceda suplimentar conform [179], punctul 9.4; în Anexa II-4 se prezintă un model de fișă de constatare.



Pod rulant bigrindă cheson

Fig.II-18 [201]

II.7.2 Analiza datelor preliminare

În baza datelor din fișa utilajului și a constatărilor de la fața locului, se stabilește modul de continuare a lucrării.

Dacă din proiectul utilajului se poate determina ecartul de tensiune nominal $\Delta\sigma$ pentru o categorie de detaliu din [199]-tabelele 4.4 –4.10 , [201]-tabelele 3.1 –3.7 , [203]-tabelele 3.1 –3.7 , [202]-tabelele 3.1 –3.7 , [179]-tabelele 6.1 –6.7 , se poate trece la stabilirea necesității verificării la oboseală a structurii; tabelele indicate sunt adaptări din [107] ale tabelor 9.8.1...9.8.5. În tabelul M-1 se prezintă tabelul 3.1 din [201], adaptat după [107], tabelul 9.8.1.

În cazul în care este satisfăcută una din condițiile de mai jos, verificarea la oboseală nu este necesară.

$$a) \gamma_{Ff} \Delta\sigma \leq 26/\gamma_{Mf} \text{ N/mm}^2 \quad (\text{II.53})$$

b)

$$N \leq 2 \cdot 10^6 \left[\frac{36/\gamma_{Mf}}{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E.2}} \right]^3 \quad (\text{II.54})$$

$$c) \gamma_{Ff} \Delta\sigma \leq \sigma_D/\gamma_{Mf} \quad (\text{II.55})$$

Dacă nu se poate determina $\Delta\sigma$ prin calcul sau dacă nu sunt satisfăcute condițiile de mai sus, este nevoie de completarea datelor preliminare cu măsurări.

II.7.3 Reconstituirea istoricului de încărcare

Modul de abordare a lucrării în continuare depinde de posibilitatea de refacere a istoricului de încărcare.

II.7.3.1 Analiza stării de oboseală la utilaje cu istoricul de încărcare cunoscut

Dacă istoricul de încărcare al construcției portante ca ansamblu se poate reconstitui pe baza datelor înscrise în fișa utilajului, analiza stării de oboseală se face folosind principiul cumulării degradărilor (Palmgren – Langer - Miner).

În acest scop, prin măsurări electroextensiometrice se stabilesc ecarturile de tensiuni nominale corespunzătoare sarcinii nominale și fracțiunilor de sarcină nominală cuprinse în fișa utilajului, capitolul B, care redă istoricul de încărcare.

Punctele de măsurare se stabilesc astfel încât să se poată utiliza una din curbele de oboseală corespunzătoare categoriilor de detalii din:

-[199],tabelele 4.4 –4.10 ; [201], tabelele 3.1 –3.7 ;

-[203],tabelele 3.1 –3.7 ; [202],tabelele 3.1 –3.7 ;

-[179], tabelele 6.1 –6.7;

sau, mai simplu, se aleg ca puncte de măsurare caracteristice, locurile indicate în

-[201]-cap. 5, fig. 5.1...5.8 ; -[203]-cap. 5 –fig. 5.1...5.20,

-[202]- fig. 5.1...5.15 ; [179]- tabelele 6.1 –6.7;

tabelele și figurile indicate sunt adaptări ale tabelelor 9.8.1...9.8.5 din [107] ,:..., făcute de Prompt SA. Pentru exemplificare, în fig. II-18 este reprezentată, din [201], figura 5.5.

Prin măsurători geometrice, se stabilesc abaterile față de prevederile [241] la ecartamentul, aliniamentul și nivelmentul căii de rulare și de deschidere, diagonală și aliniere roți la utilaj.

Cu ajutorul ecarturilor de tensiuni $\Delta\sigma_i$, determinate experimental, se calculează degradările parțiale n_i/N_i și degradarea totală.

$$D = \sum \frac{n_i}{N_i} \quad (\text{II.56})$$

Dacă $D < 1$, utilajul mai poate funcționa. (II.57)

Dacă $D \geq 1$, utilajul nu mai poate funcționa. (II.58)

Autorizarea de funcționare, în cazul $D < 1$, va fi condiționată de remedierea deficiențelor constatate la utilaj, eliminarea abaterilor față de [241] .

II.7.3.2 Analiza stării de oboseală la utilaje cu istoricul de încărcare necunoscut

În cazul în care beneficiarul nu poate furniza suficiente date pentru refacerea istoricului de încărcare există două posibilități:

Utilajul a lucrat în condiții asemănătoare de la punerea în funcțiune până la momentul efectuării analizei.

Se determină spectrul real de încărcare, urmărind funcționarea utilajului o perioadă de timp determinată. Prin extrapolare, acest spectru se extinde pe toată perioada de funcționare a utilajului, de la punerea în funcțiune; se apreciază astfel istoricul de încărcare.

Analiza se desfășoară în continuare ca la punctul precedent.

Pentru determinarea spectrului real de încărcare se poate utiliza dispozitivul electronic de clasare, a cărui schemă, prezentată în [199], este reprodusă în Anexa II-5.

Acest dispozitiv, elaborat în Prompt SA, permite clasarea încărcării utilajului în 5 sau 6 clase plecând de la sarcina nominală la diferite fracțiuni de sarcină nominală. (Q_N ; $0,8 Q_N$; $0,6 Q_N$ etc.).

Dacă în locul traductorului de forță, se folosește un timbru electroextensiometric, se poate determina spectrul real de solicitare a utilajului – adică se determină numărul de apariții (în perioada urmărită) a diferitelor ecarturi de tensiune, $\Delta\sigma$.

II.7.3.3 Utilajul a lucrat în condiții diferite și nu există nici o informație referitoare la regimurile de funcționare.

Se fac măsurări electroextensiometrice succesive, cu încărcare la sarcina nominală și sarcini mai mici. Se determină sarcina la care ecartul de tensiune $\Delta\sigma$ corespunzător satisface condiția:

$$\gamma_{Ff}\Delta\sigma \leq \Delta\sigma_D/\gamma_{Mf} \quad (II.59)$$

unde $\Delta\sigma_D$ este valoarea de referință a rezistenței la oboseală la 5×10^6 cicluri, pentru categoria de detalii constructiv adoptată.

Autorizarea de funcționare pentru utilaj se va da, în acest caz, pentru sarcina la care a fost îndeplinită condiția de mai sus.

Pentru utilajele grele se va proceda suplimentar conform [179]. punctul 9.5, 9.6.

II.7.4 Criterii de decizie pentru încercări distructive, complementare la analiza stării de oboseală

În anumite situații, pe lângă analiza stării de oboseală a structurii metalice cu una din metodele de mai sus, poate apărea necesitatea efectuării unor încercări distructive pentru obținerea de informații privind starea de îmbătrânire a materialului și anume:

analiza compoziției chimice;

analiza metalografică;

încercarea de tracțiune;

încercarea de îndoire la 180°;

încercarea de încovoiere prin șoc (reziliență).

Pentru utilajele grele se execută suplimentar lucrările prezentate în [179], punctul 9.4.

Necesitatea efectuării încercărilor distructive se stabilește după inspectarea utilajului, ținând seama de următoarele aspecte:

- importanța utilajului, influențe asupra procesului tehnologic;
- implicațiile unei căderi (pierderi de vieți omenești, efecte ecologice, pagube posibile);
- condițiile de mediu (extern cu variații mari de tensiune umiditate, mediu coroziv);
- regim de lucru (intensitatea regimului, dacă s-a lucrat frecvent cu sarcina nominală sau sarcini apropiate);
- existența și funcționarea a dispozitivelor de siguranță;
- geometrie generală a utilajului (abateri mari față de cele admise în STAS 6911-80, respectiv SR ISO 8306);
- existența unor evenimente deosebite în timpul funcționării.

II.7.5 Decizia după expertiză

În funcție de rezultatele obținute după încercările distructive, se adoptă decizia de autorizare a funcționării sau de oprire.

II.7.6 Viteza de propagare a fisurii, în condiții de solicitare variabilă

Dacă în construcția metalică au apărut fisuri, aprecierea duratei de viață se face fie cu ajutorul formulelor din mecanica ruperii (A se vedea fig. II-17), fie prin încercări de stabilire a vitezei de propagare a fisurii la oboseală.

II.8 CONCLUZII

Stadiul actual în evaluarea capacității ER ale SP de a suporta sarcini variabile în timp s-a dezvoltat pornind de la încercarea de a utiliza standardul [244], în vigoare pentru calculul SP ale IR. Astfel în primele lucrări ale Prompt SA Timișoara - [198], [147] - în anii 1992... 1993, cu spectre de încărcare care s-au evaluat pornind de la temele de proiectare, s-au făcut calcule de verificare la oboseală asupra utilajelor proiectate înainte de aplicarea [244], când nu se făceau asemenea calcule, și s-au obținut numere de cicluri, care a permis să se facă aprecieri de ordin general, anume că unele categorii de utilaje nu ar face față duratei de viață normate, iar altele au rezerve.

Dar în fața specialiștilor a apărut problema evaluării duratei de viață a utilajelor cu un istoric de încărcare, iar [244] nu are prevederi privitoare la cumulara degradărilor, la calculul ruperii fragile. Acestea au fost puncte de plecare pentru care s-a apelat la [107], introdus în metodologia Prompt SA, prezentată mai sus.

Autorul lucrării de față a fost implicat în implementarea acestei metodologii, prin participarea la lucrări relevante de aplicare a ei (expertize avarii) [188] și a abordat lucrări [179] de dezvoltare a metodologiei pentru o categorie complexă de utilaje, utilajele grele din exploatarea de suprafață a cărbunelui sau de manipulat cărbune în CET.

Capitolul III

STUDIU STATISTIC PRIVIND DEFECTAREA ÎN EXPLOATARE A STRUCTURILOR PORTANTE

III.1 GENERALITĂȚI

Potrivit scopurilor prezentei lucrări, în abordarea problemei defectărilor, se va acorda atenție mai ales acelor care au avut consecințe grave, unele atingând starea de avarie. Se va proceda la parcurgerea unor statistici din literatura tehnică de specialitate, pentru a afla care este ponderea defectărilor structurilor portante (SP) și care sunt cauzele defectărilor. În acest spirit, mai jos, sunt prezentate date semnificative ale unor statistici, din România, Germania și Suedia, referitoare la structurile portante (SP) ale instalațiilor de ridicat (IR) și utilajelor grele (UG) din exploatarea de suprafață ale cărbunelui.

III.2 SITUAȚIA AVARIILOR ÎN ROMÂNIA, ÎN PERIOADA 1970...1990

III.2.1 Date statistice despre avariile la SP ale IR

În [180], sunt întocmite mai multe situații statistice despre avarii la SP ale macaralelor portal (capră), ale podurilor rulante și ale macaralelor portic (portal portuare), prin prelucrarea informațiilor despre 983 de avarii. Cu informații din [180], în figurile următoare sunt ilustrate principalele aspecte relevate.

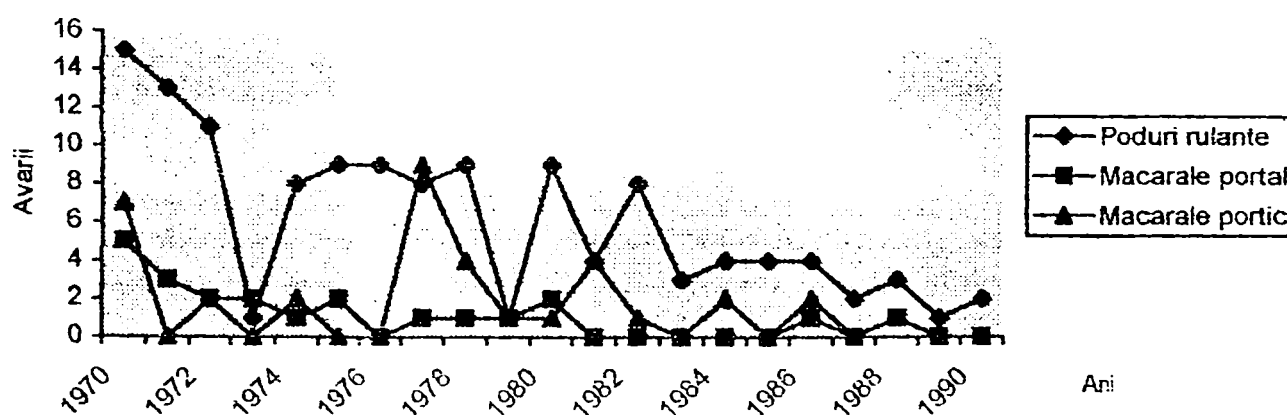


Figura III- 1 [180] -Situația avariilor SP pentru principalele categorii de IR, între anii 1970...1990

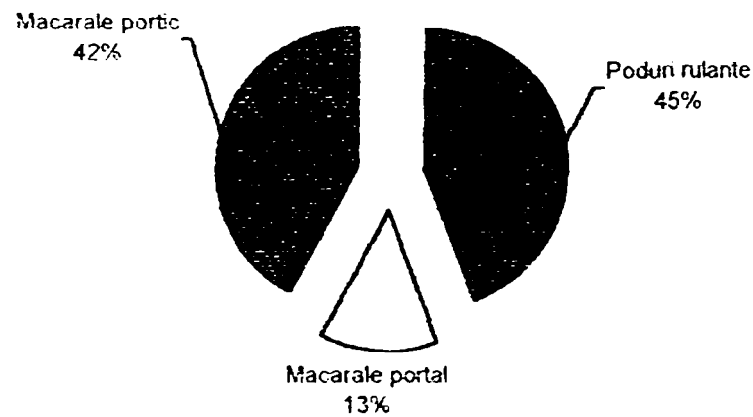


Figura III- 2 [180]- Pondere avariilor SP, între anii 1970...1990, pe categorii de IR

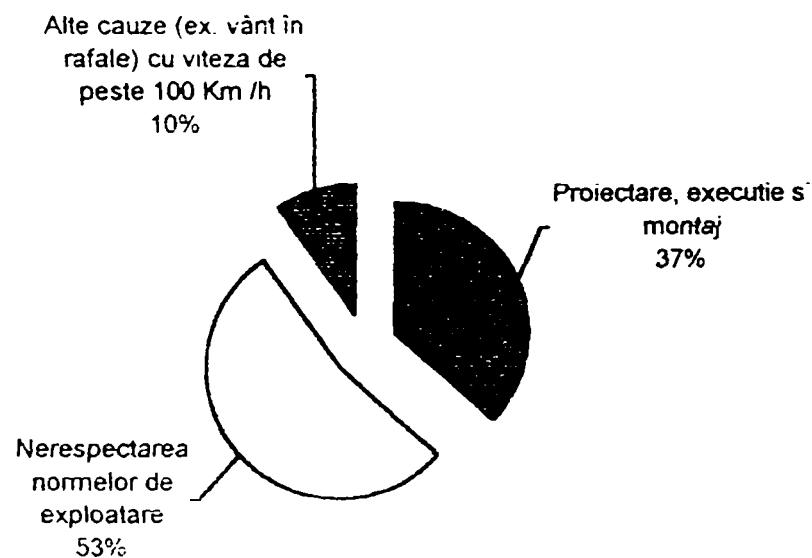


Figura III- 3 [180] -Cauzele avariilor la SP ale podurilor rulante, ale macaralelor portal și ale macaralelor portic, în perioada 1970...1990

III.2.2 Descrierea unor avarii deosebite ale SP ale IR

Din [180] s-au selectat și rezumat aspectele esențiale ale avariilor produse la SP, rezultând situația din tabelul de mai jos

Tabelul III- 1

Nr. crt.	Denumire IR	Executant / an de execuție	Amplasament	Descrierea avariei	Cauzele avariei
1	Pod rulant cu braț și turn rotitor, 8 t - 31 m	UCM Reșița / 1968	Secția laminare ajustaj mijlociu, la Combinat Siderurgic Reșița.	Rupere grindă principală pod, în zona sudurii de îmbinare cap la cap a tălpii superioare, perpendicular pe axa longitudinală a grinzii. A urmat căderea căruciorului la sol.	Execuție: - îmbinare sudată realizată incorect (neprelucrare margini la cele 2 elemente în vederea sudării); - lipsă control nedestructiv al îmbinării după execuție; Exploatare: - frecvent în condiții de suprasarcină; analizele efectuate asupra materialului, în zona ruperii, au evidențiat un aspect specific de oboseală; Proiectare: dimensionare exagerată, greutatea proprie mare a căruciorului, de 46,7 t, deși sarcina utilă de ridicare era doar 8 t.
	Pod rulant 5 t-22m	/1971	CIC Valea Călugărească	leșire pod de pe calea de rulare, urmată de deformare construcție metalică	Montaj: - opritorii de la capăt cale rulare montați incorect, fără sudare de talpă; - limitatori fine cursă nemontați.
2	Pod rulant de 3,6 t -12,9 m	/1958	Secția vane, IUP Târgoviște	Ruperea în patru secțiuni a profilelor U 140 ce formau grinzile de capăt (o grindă de capăt era formată din 2 profile U 140 sudate); ruperile au apărut la marginea sudurilor de îmbinare a grinzilor de capăt cu cele principale, în zona de rigidizare a elementelor construcției metalice (care este un concentrator, ca urmare a schimbării secțiunii datorită cordonului de sudură.).	Execuție: îmbinare sudată incorect, fără prelucrare margini subansambluri în vederea sudării și fără control nedestructiv după execuție; Exploatare: frecvente condiții de suprasarcină, în mod ciclic, ceea ce a condus la un grad ridicat de oboseală a materialului (analizele și încercările efectuate au evidențiat schimbări de structură, cu cristale mari, alungite, scădere pronunțată a rezilienței și alungirii materialului, ș.a.
3	Pod rulant 80 t-31 m	/1980	Intr. Mat. Izolat. Vaslui	Cădere pod la sol	Montaj: incorect al opritorilor de la capetele căii de rulare, care au cedat la vânt de 125 km/h
3	Pod rulant 8 t - 31 m	/1976	JCM Arad	Cădere pod la sol	Montaj: incorect al opritorilor de la capetele căii de rulare, care au cedat la vânt de 144 km/h
4	Pod rulant 5 t-27,8 m (2 buc.)	/1968 și 1970	Fabrica de osii și boghiuri BALS	Cădere la sol, în condiții de nefuncționare limitatori	Proiectare: dimensionare incorectă a opritorilor

Nr.crt.	Denumire IR	Executant / an de execuție	Amplasament	Descrierea avariei	Cauzele avariei
5	Pod rulant cu comandă de la sol	/1975	I. Autocamioane Brasov	Cădere la sol, ca urmare a ruperii profilului I de către o roată de rulare, care a frecat excesiv pe profil	Montaj: mecanism deplasare pod.
6	Macara portal cu console, de 8 t,	Uzina București	IFET Bistrița	Rupere lonjeron superior, din țevă ϕ 152 x 12, OLT 45; a urmat răsturnare macara și deformare puternică a construcțiilor metalice care compun piciorul rigid, tronsonul de capăt și piciorul flexibil.	Execuție: - calitate necorespunzătoare material construcției metalice; încercările de reziliență, la 0°C și la - 20°C, au evidențiat valori inferioare față de norme; - existența, din fabricație, a unui defect de material, respectiv a unei fisuri pe circa 50% în secțiunea de rupere.
7	Macara portal cu console, 10t, echipată cu prafțar		Refinăria Ploiești.	Rupere șuruburi îmbinare tirant de legătură cu ramurile piciorului rigid, deformarea uneia din cele 2 grinzi principale în zona de îmbinare și a grinzii de capăt.	Montaj: - utilizare șuruburi inferioare dimensional și calitativ față de prevederi proiect.
8	Macara portal de 5 t		Intrepr. județeană de Construcții Montaj Botoșani	Răsturnare macara la demontare; a urmat deformare puternică a construcției metalice, a 3 tronsoane la picioarele macaralei și 2 tronsoane la grinda superioară de rezistență.	Execuție - erori grave, respectiv îmbinări sudate cu defecte de tipul fisuri și lipsă de topire.
9	Macara portal de 5 t		Poligon de prefabricate	Multe fisuri în îmbinările sudate, având ca urmare scoaterea din funcție a instalației.	Montaj: nerespectare proiect montaj reductor, care funcționând necorespunzător, a generat aparitia de tensiuni peste limita admisibilă în îmbinările sudate ale construcției metalice.
10	Macara portal 30t	Electroce ntrale București	Sud	Deformare talpă inferioară, urmare a nefuncționării limitator de cursă cârlig	Întreținere- revizie: lucrări superficiale
11	Macara portal cu console, 5		Într. Mater. Constr. Constanța	Răsturnare macara, deformare picioare	Execuție: nerespectare prescripții execuție picioare de calare
12	Macara portic (portal portuară) de chei 10t-30		"NAVROM" Constanța	Rupere braț în 2 secțiuni, în partea inferioară, și deformarea accentuată a contraflanșei.	Proiectare: - prevăzut materiale cu caracteristici mecanice și tehnologice slabe; Exploatare: frecvent suprasarcini, ceea ce a condus la oboseala materialului

Nr. crt.	Denumire IR	Executant / an de execuție	Amplasament	Descrierea avariei	Cauzele avariei
13	Macara portic (portal portuară), 6,3/5 t – 32	I.C.M. Bocșa	"NAVROM" Constanța.	Rupere cremalieră, la circa 560 mm de axa articulației cu brațul, într-o îmbinare sudată.	Execuție: - îmbinării sudate la talpa cremalierii, cu defecte de tip lipsă de topire; Întreținere-revizie: existența unei fisuri mai vechi, de circa 20 mm lungime, care a constituit amorsa ruperii în secțiunea de rupere.
14	Macara portic (portal portuară), 6,3/5 t – 32 m	Import (fosta) R.D.G.	Portul fluvial Moldova Veche	Rupere tirant de la parte superioară braț, la circa 2 m de vârf, într-o secțiune perpendiculară pe axă element, în zona unor cordoane de sudură.	Execuție: realizarea unor îmbinări sudate cu defecte de tipul lipsă de topire și subdimensionate față de prevederi proiect.
15	Macara portic (portal portuară)		Șantierul naval Galați	Deformare braț la circa 4 m de la articulația cu platforma rotitoare.	Exploatare: suprasarcină în condițiile nefuncționării limitator moment sarcină Întreținere-revizie: - lucrări superficiale.
16	Macara portic (portal portuară), 6,3 t – 32 m		"NAVROM" Constanța	Rupere construcție metalică braț susținere contragreutate, urmată de căderea acesteia peste 2 vagoane CFR, care au fost avariate.	Execuție: necorespunzătoare construcție metalică a subansamblului în cauză Exploatare: manevre cu șocuri reprezentate în toate elementele macaralei.
17	Macara portic (portal portuară)	NAVROM Constanța		Deformare și rupere elemente braț	Revizie-reparație: superficialitate, nefuncționare limitator cursă cârlig
18	Macara portic (portal portuară)	NAVROM Constanța		Deformare boghiuri	Exploatare: lovire de către o navă, la vânt de 130 km/h
19	Macara portic (portal portuară)	Dana Vitrocim Constanța		Deformare construcție metalică, în urma răsturnării	Proiectare: dispozitive prindere pe șine subdimensionate

III.2.3 Situația defectărilor grave la utilajele grele

În legătură cu defectările utilajelor grele, în [34] se prezintă informațiile care sunt reproduse în tabelele de mai jos.

Tabelul III- 2

Cauze generatoare de defecțiuni la excavatorul ERC 1400	Procentaj %
Folosirea de materiale necorespunzătoare	12
Tratament termic necorespunzător	12
Suduri necorespunzătoare	17
Sistem de lăgăruire și lubrifiere insuficient	18
Danturi necorespunzătoare	25
Antraxări și planități necorespunzătoare	10
Soluții de concepție inadecvate	6

Tabelul III- 3

Ponderea defecțiunilor grave la excavator ERC 1400 și la Mașina de haldat IH 6500 x 90	Procentaj %
la punerea în funcțiune	7,7
sub 1000 ore de funcționare	35,4
între 1001 și 2000 ore de funcționare	15,4
între 2001 și 3000 ore de funcționare	12,4
între 3001 și 5000 ore de funcționare	14,7
între 5001 și 10000 ore de funcționare	10,7
peste 10000 ore de funcționare	7,7

III.3 SITUAȚIA AVARIILOR ÎN GERMANIA (FOST RDG), ÎN PERIOADA 1945...1984

Problema este expusă în [198], Anexa 1,), fiind prezentate date statistice referitoare la 67 avarii produse la macarale și 36 avarii la utilajele grele din carierele de cărbune.

Respectând clasarea făcută de autorul statisticii, mai jos s-au expus date utile prezentului studiu.

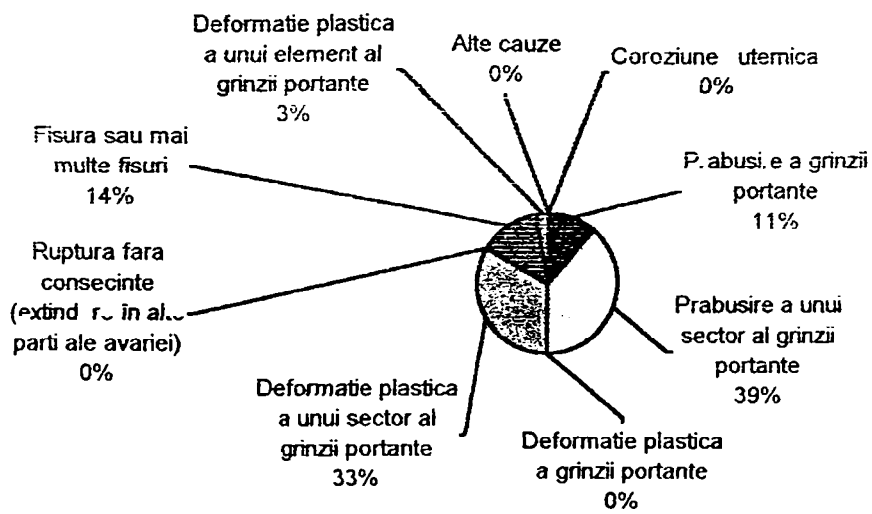


Figura III- 4 [198] - Clasarea avariilor la SP ale macaralelor, după cauzele producerii

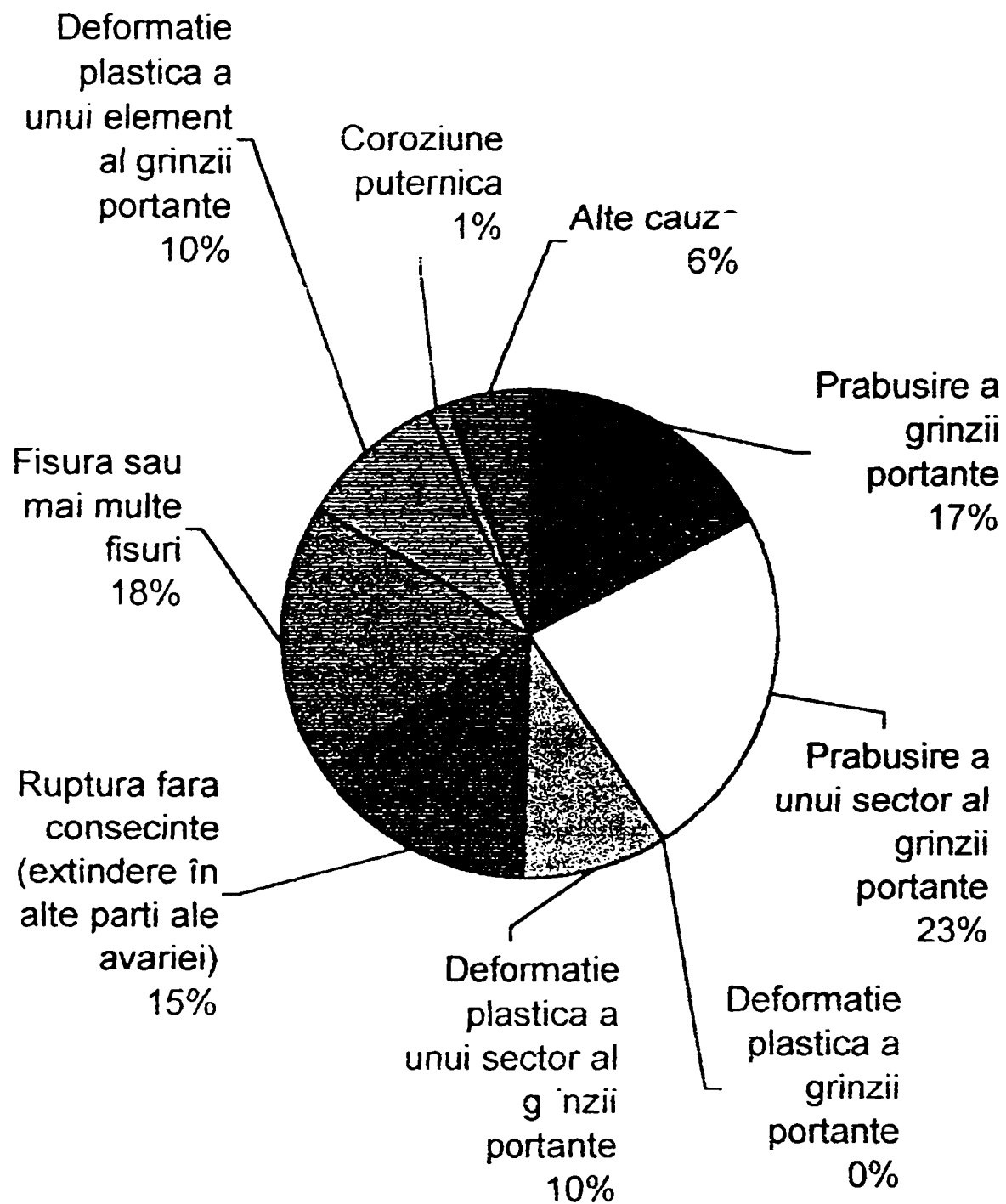


Figura III- 5 [198] - Clasarea avariilor la structurile portante ale utilajelor grele din cariere, după cauzele producerii

Se observă că la utilajele grele din cariere, ordinea în ponderea avariilor este aproape aceeași ca la macarale, cu excepția deformației plastice a unui sector, care se află pe locul 2. La aceste utilaje nu pot să apară, fără consecințe, deformații plastice ale grinzii portante sau rupturi, deoarece apar eforturi foarte mari și avaria se amplifică producând, fie prăbușirea, fie deformația plastică a unui sector, ceea ce rezultă și din creșterea ponderii acestor tipuri de avarii.

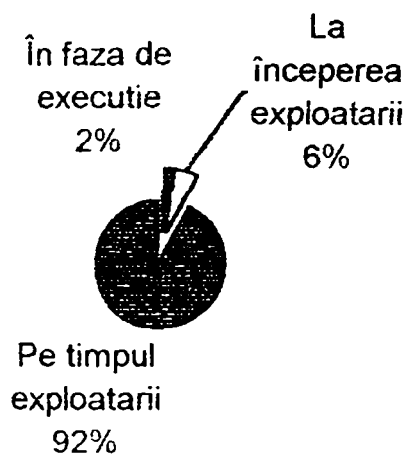


Figura III- 6 [198] - Clasarea avariilor la macarale, după faza apariției

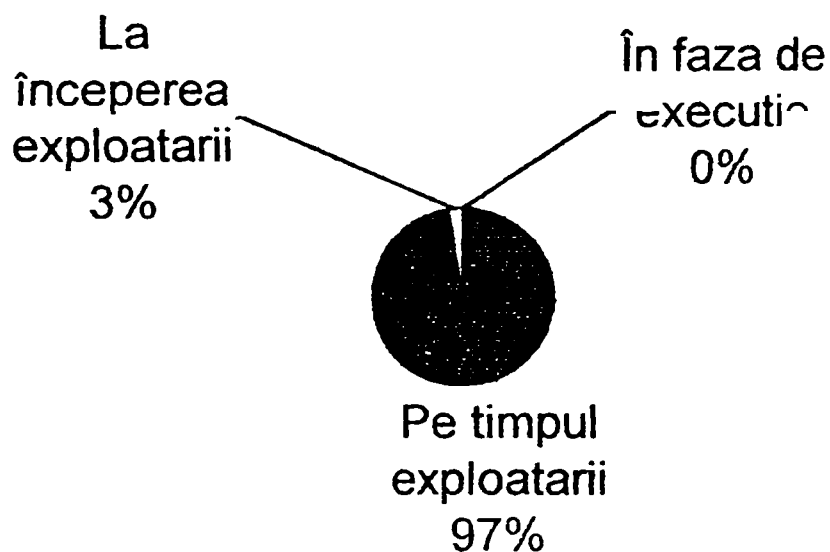


Figura III- 7 [198] - Clasarea avariilor la utilajele grele din cariere, după faza apariției

Studiul citat în [198] precizează printre cauzele care duc la avarierea construcției portante a macaralelor suprasolicitarea din exploatare, determinată de: manevre nepermise, șocuri și vibrații produse în construcția metalică datorită căii de rulare, nefuncționarea – în caz de vânt - a clemei de fixare a macaralei pe calea de rulare etc.

De asemenea, studiul citat în [198], conchide că, la situația care a existat în RDG, macaralele și utilajele grele, fiind supuse unor condiții grele de exploatare, sunt supuse și unor proceduri riguroase de urmărire a execuției. De aceea, avariile în faza execuției aproape că lipsesc (la macarale s-a înregistrat numai un singur caz), iar în faza de începere a exploatării sunt minime (la macarale numai 4 cazuri, iar la utilajele grele numai un caz).

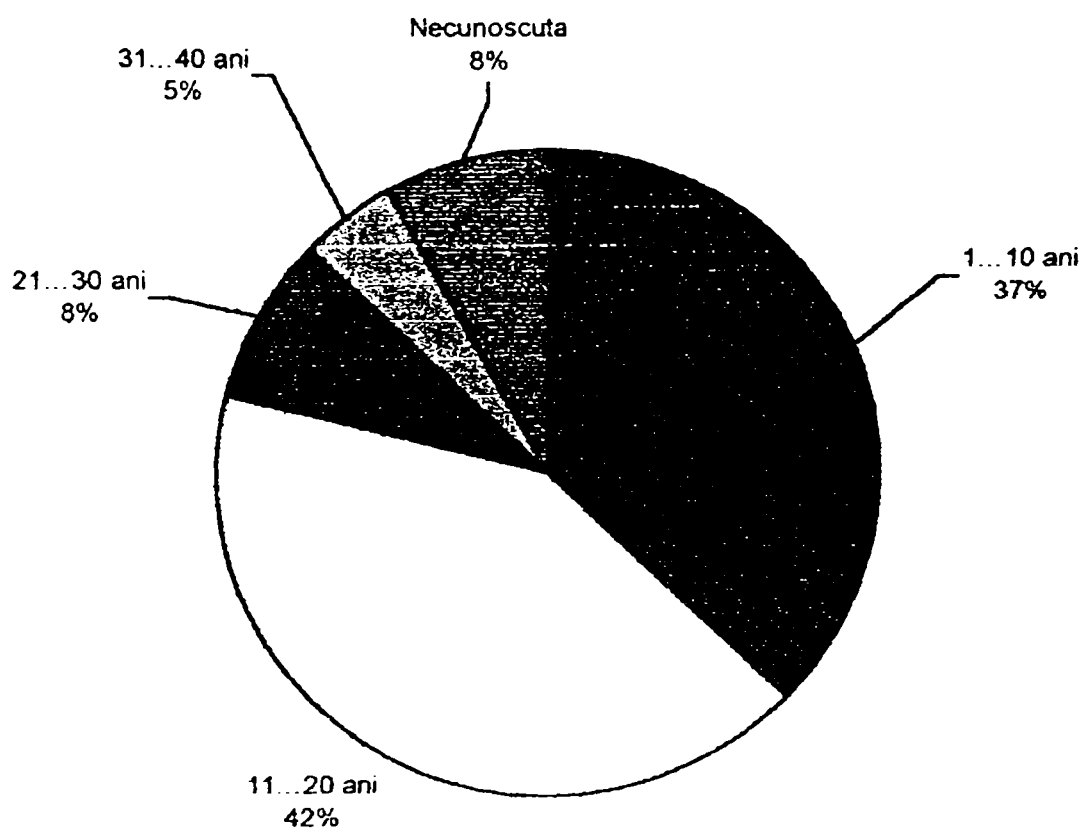


Figura III- 8 [198] - Clasarea avariilor la SP ale macaralelor, în funcție de durata de serviciu a SP

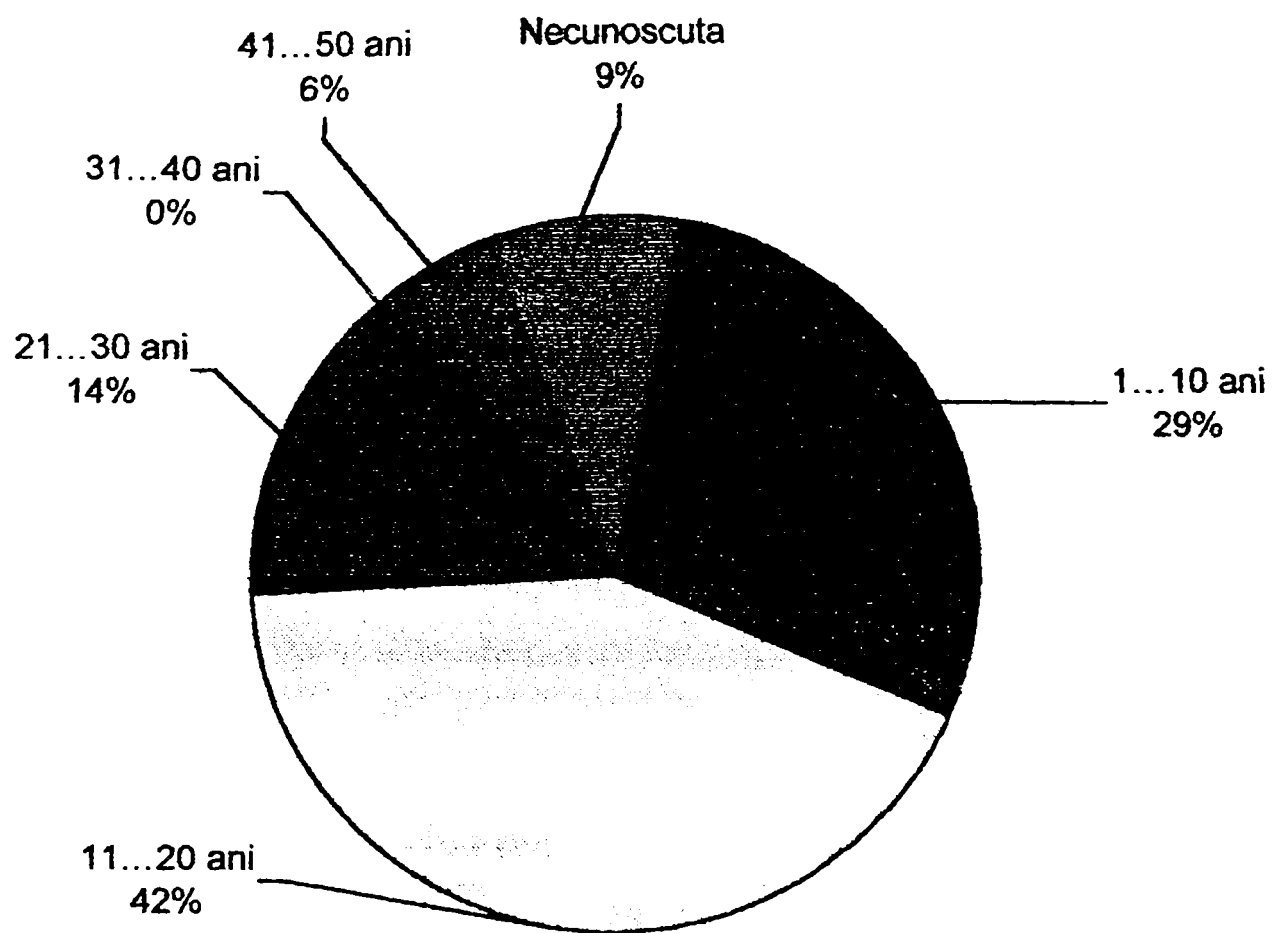


Figura III- 9 [198] - Clasarea avariilor la SP ale utilajelor grele din cariere, în funcție de durata de serviciu a SP

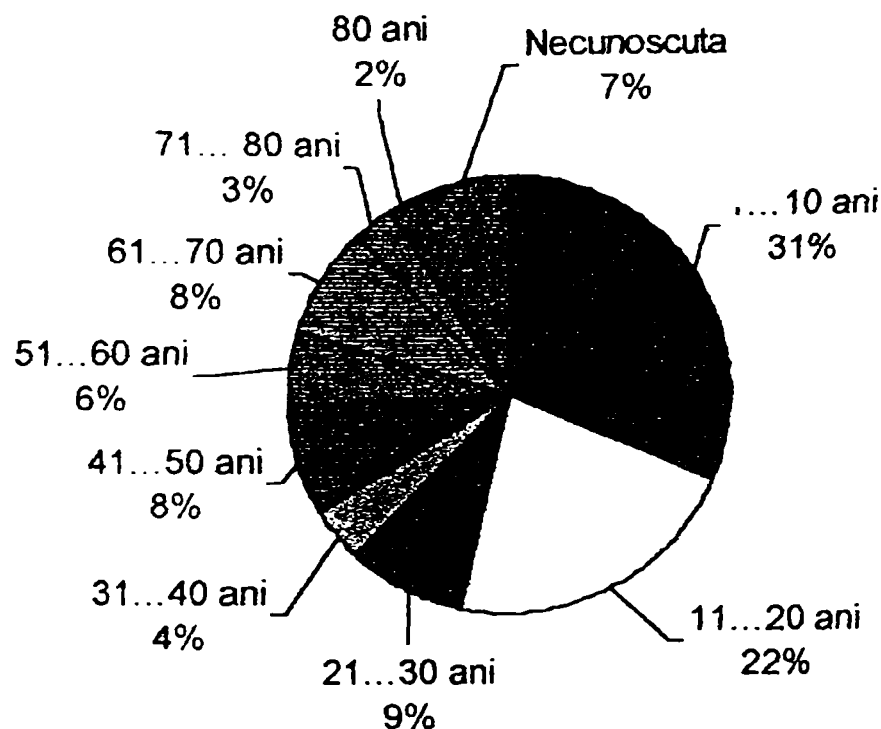


Figura III- 10 [198] - Clasarea avariilor la construcțiile portante ale construcțiilor industriale, macaralelor și utilajelor grele din cariere, în funcție de durata de serviciu a SP

Figurile 3.8, 3.9 și 3.10 prezintă diferențe între restul SP, pe de o parte, și macaralele și utilajele grele, pe de altă parte. La data întocmirii studiului, în Germania durata de serviciu a macaralelor putea ajunge la maximum 40 de ani, a utilajelor grele – la maximum 45 de ani; iar a celorlalte tipuri de SP putea depăși și 80 de ani.

Clasarea avariilor după cauzele care stau la baza producerii lor

În [198], tabelul 1.6, se reproduce, după studiul german, o grupare a cauzelor avariilor, în 5 clase.

Clasa 1: Evenimentele întâmplătoare de categoria I-a. Această clasă cuprinde avarii produse în urma periclitării siguranței SP din punctul de vedere al probabilității apariției unor fenomene aleatorii, ca de ex.: depășire, întâmplător, a sarcinii maxime; execuție cu materiale cu caracteristici inferioare sau secțiuni inferioare celor luate în calcul (abateri negative).

Clasa 2: Evenimentele întâmplătoare de categoria a II-a (care n au fost prevăzute în calcul). Exemple: cutremur puternic,

Clasa 3 : Fenomene care nu puteau fi cunoscute în faza de proiectare pe baza nivelului tehnic mondial actual.

Clasa 4: Nerespectarea îndatoririlor

Această clasă cuprinde avariile care s-au produs datorită nerespectării îndatoririlor, săvârșite în mod conștient sau inconștient de oameni, în diferite faze prin care trece produsul de la proiectare până inclusiv la exploatare, și anume: proiectare, execuție, exploatare, reparații sau întreținere; faptele, care au declanșat avariile, puteau fi în mod normal evitate. De exemplu, căderea unui pod rulant pe timpul ridicării lui pe calea de rulare, produce deformații în construcția metalică care nu pot fi remediate complet și e posibil ca podul rulant să deraieze în exploatare.

Clasa 5: Nerespectări involuntare. Nu sunt imputabile personalului, nu pot fi sancționate juridic.

Cele mai multe avarii de construcții metalice se încadrează în clasa a 4-a, și anume: la macarale 77,1%, la utilajele grele din cariere 46,7 %, iar la SP luate în ansamblu (deci inclusiv cele industriale), 52,0%. Urmează, în ordinea ponderii, clasa a 5-a, în care macaralele și utilajele grele au câte 20%, iar SP, în ansamblu, 23,3%.

Trebuie să se sublinieze că macaralele sunt supuse unui regim sever de autorizare și construirea lor este reglementată prin prescripții experimentate, astfel că din 70 de cazuri analizate, în clasa I se încadrează numai 2 cazuri (2,9%), iar în clasele 2 și 3 nu apare nici un caz. La utilajele grele din cariere, care au apărut după 1945, iar tipurile mai perfecționate datează de numai 10 – 20 de ani, la început alegerea formelor constructive și apariția unor încărcări dinamice nu erau perfect stăpânite, astfel că, din 45 cazuri analizate, repartizarea avariilor în primele trei clase este următoarea:

- în clasa 1: 6 cazuri (13,3%);
- în clasa 2: 2 cazuri (4,45%);
- în clasa 3: 7 cazuri (15,6%).

Studiul [198], în tabelul 1.7, prezintă, situația avariilor, după criteriul fazei în care s-a produs nerespectarea îndatoririlor. Mai jos ponderile sunt înfățișate grafic.

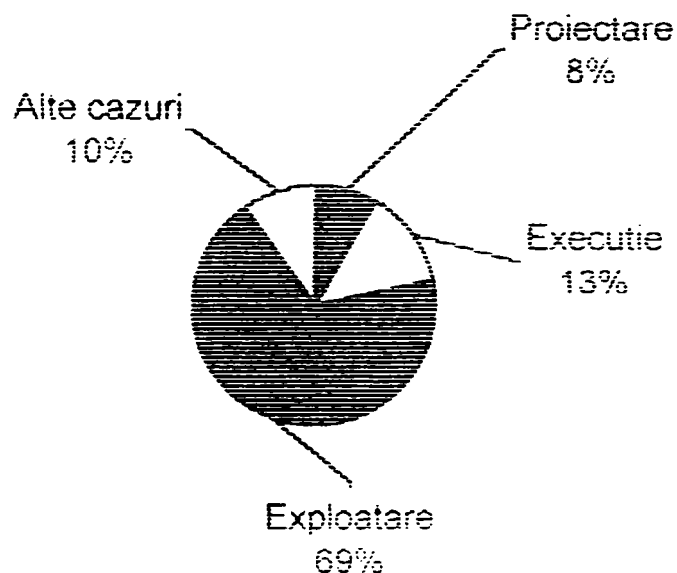


Figura III- 11 [198] – Clasarea avariilor la macarale, din cauza nerespectării îndatoririlor, în funcție de faza producerii avariei

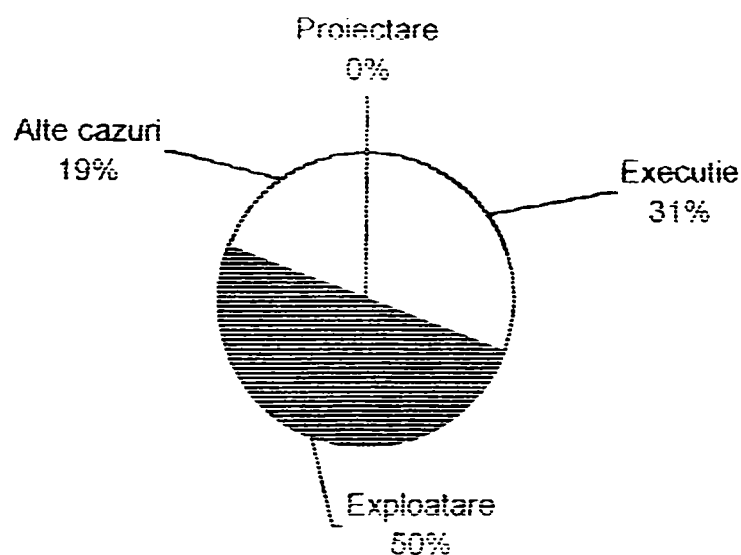


Figura III- 12 [198] - Clasarea avariilor la utilaje grele, din cauza nerespectării îndatoririlor, în funcție de faza producerii avariei

Cele mai multe avarii, la toate tipurile analizate, s-au produs datorită nerespectării îndatoririlor în exploatare, și anume la macarale 69 %, iar la utilajele grele - 50 %. În execuție, procentele avariilor cauzate de nerespectarea îndatoririlor au fost, la macarale - 13,3%, la utilajele grele - 30,8% iar în ansamblu la SP de 26,5%.

Și din această situație rezultă că la macarale, datorită regimului de autorizare și de control pe timpul execuției, apar mai puține avarii în categoria (clasa) "nerespectare de prescripții și îndatoriri pe timpul execuției".

III.4 SITUAȚIA AVARIILOR ÎN SUECIA

Pe baza verificării a 65000 de echipamente de ridicat de toate tipurile, în 1999, de către DNV din Regiunea de Sud a Suediei, în [124] sunt prezentate ponderile cauzelor ruperilor . Mai jos, utilizând datele prezentate, sunt infățișate aceste ponderi, după diverse criterii.

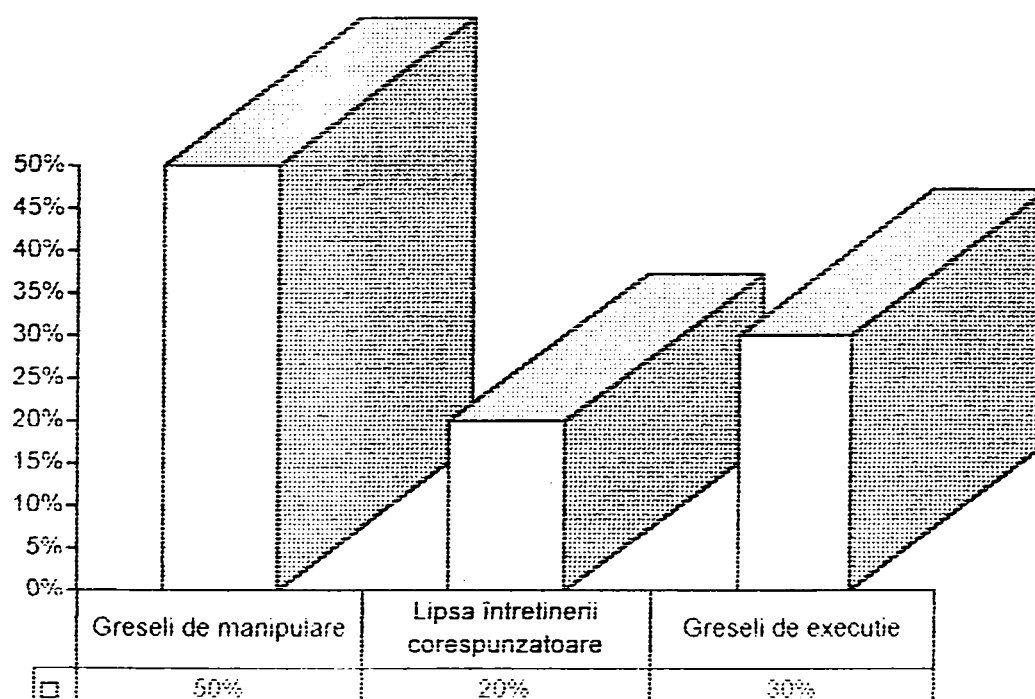


Figura III- 13 [124]– Ponderea defectărilor IR, în funcție de cauzele producerii

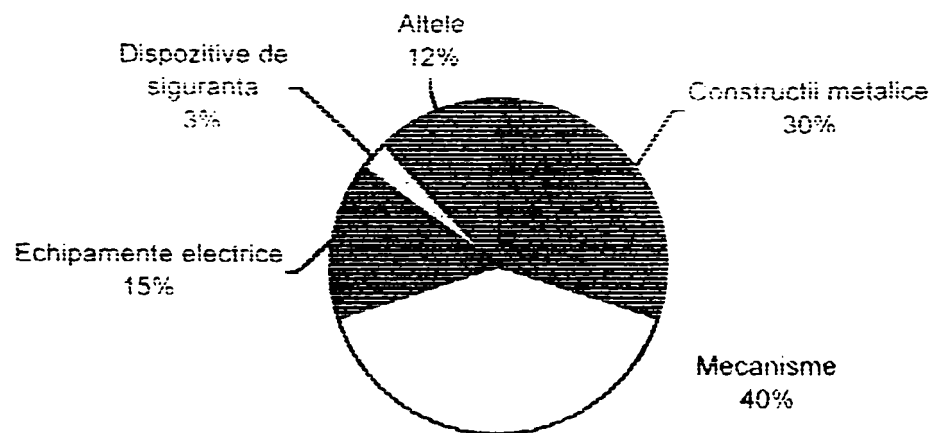


Figura III- 14 [124]– Ponderea defectărilor, în funcție de subansamblul în care s-au produs

Altă statistică, rezultată din programul de monitorizare a stării de funcționare în Suedia, desfășurat de DNV din regiunea de sud, exprimă, ponderea cauzelor de rupere a 150 de macarale mobile. Figura de mai jos reproduce reprezentarea din [124].

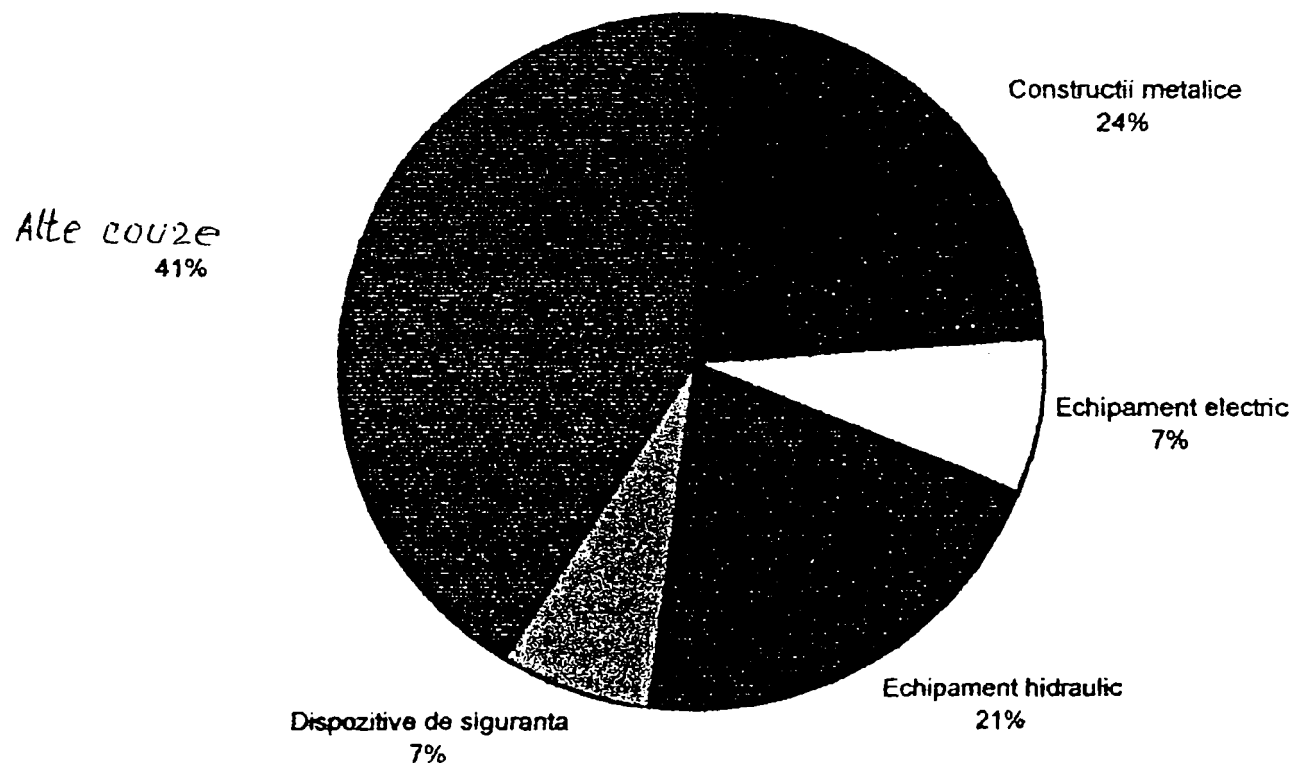


Figura III- 15 [124]– Cauzele defectărilor a 150 de macarale mobile

III.5 CONCLUZII

În general SP sunt proiectate pentru o durată de viață limitată. Solicitățile estimate la proiectare sunt în numeroase cazuri depășite de situația reală din exploatare. Din statistici rezultă că **în exploatare se manifestă cei mai mulți factori perturbatori:** exploatarea nerațională (regimuri dure, blocarea unor limitatoare de sarcină sau de moment), nerespectarea perioadelor de revizii sau de reparații capitale, personal operator care nu întotdeauna respectă funcționarea în regim de lucru normal a utilajelor, suprasarcini, vibrații necontrolate. Toți acești factori contribuie la degradări premature, iar în unele cazuri la avarii. Statisticile indică și diverse alte cauze. Astfel, din tabelul III-1 rezultă că **un mare număr de defectări grave pornesc de la calitatea necorespunzătoare a sudurilor.** Prin urmare este de așteptat ca un utilaj care a lucrat o un anumit timp să fi fost solicitat la un alt spectru de încărcări decât cel estimat la proiectare. Rezultă că de regulă situația este complexă. Se impune cunoașterea cât mai exactă a acestui istoric de încărcare. **Din motive subiective, de comportament uman, nu sunt dezvăluite toate aspectele de suprasolicitare.**

Tinând seama de cele de mai sus, rezultă că metodele de apreciere a degradării elementelor de rezistență trebuie să cuprindă un complex de proceduri, care să apeleze la variate tehnici de evidențiere a caracteristicilor la care au ajuns ER. Acest lucru justifică și efortul de studii și cercetări în domeniul evaluării duratei de viață consumate /disponibile.

CAPITOLUL IV

STUDII PRIVIND APLICAREA NORMATIVELOR EUROCOD PENTRU STĂRI LIMITĂ

IV.1 EUROCODURI STRUCTURALE

În statele Uniunii Europene activitățile din ramura construcțiilor sunt reglementate prin directivele [91] și [90], prevederile lor fiind introduse în legislațiile tuturor țărilor membre. Vizând aplicarea în practică a cerințelor esențiale ale Directivei [90], Comisia Uniunii Europene a mandatat organismul de standardizare al UE, CEN, recte Comitetul Tehnic de Standardizare TC 250, să creeze un set de reguli tehnice armonizate (cu Directiva 89/106), pentru proiectarea clădirilor și construcțiilor ingineresti. Aceste reguli au primit numele de "Eurocoduri structurale"; pe măsura definitivării eurocodurilor, ele înlocuiesc, pentru tematica respectivă, standardele naționale existente în țările membre ale UE.

Programul de lucru al CEN/TC 250 de elaborare a eurocodurilor structurale prevede [95]:

Eurocodurile urmează să servească drept documente normative de referință, recunoscute de către autoritățile statelor membre, constituind:

- un mijloc de dovedire a conformității lucrărilor pentru clădiri și a lucrărilor ingineresti cu criteriilor esențiale (ale Directivei);
- bază tehnico-legală pentru contractele de execuție a lucrărilor de construcții și serviciilor ingineresti corespunzătoare;
- un context de lucru pentru elaborarea specificațiilor tehnice armonizate pentru materiale și produse utilizate în construcții..."

Programul "Eurocoduri structurale" preconizează un sistem coerent și cuprinzător de standarde de proiectare a structurilor, pentru toate tipurile de clădiri și lucrări ingineresti, din diverse materiale de construcții, metode de proiectare variate și alte elemente de proiectare de importanță practică generală.

Din preambulul [107], rezultă amploarea programului "Eurocoduri structurale" ("Eurocode programme): astfel, el prevede, pentru început, elaborarea a nouă

documente normative. Pentru scopurile prezentei teme, prezintă interes "Eurocode 3: Design of steel structures " [Eurocode 3 - Calculul structurilor metalice]. Tot din preambulul [107] rezultă că Eurocode 3, conceput a fi un standard structurat pe 8 părți, va acoperi proiectarea tuturor tipurilor de structuri metalice. Pentru lucrarea de față, prezintă interes, în partea 1 (care este ENV 1993-1-1 [107]), capitolul "9. Fatigue" [Oboseala] și "Annex C (informative) – Design against brittle fracture" [Anexa C (informativă) – "Calculul la rupere fragilă].

Ca și la elaborarea altor standarde europene - EN, eurocodurile structurale și anexele aferente se publică mai întâi sub formă de prestandarde europene (simbolizate ENV). Astfel, la EUROCODE 3, partea 1 [107] a fost pusă în circulație (ratificată) ca ENV, în 1992.

După o perioadă de testare, se va organiza conversia prestandardelor în standarde europene - EN, trecându-se prin fazele: elaborare proiect de standard (simbolizat prEN), anchetarea la organismele naționale de standardizare ale UE și votul acestora.

În evoluția Eurocode 3 spre EN există, ca și la aproape toate celelalte eurocoduri structurale, o anumită întârziere a finalizării (conform CEN/TC 250 Work Programme – **Internet, 9/23/2001**, astfel că majoritatea părților EC 3, în loc să fie finalizate ca standarde, conform programării inițiale, nu au atins încă faza de difuzare ca proiecte prEN, pentru anchetă și vot; în ceea ce privește capitolul "9 Oboseala", din [107], acesta urmează a fi difuzat ca prEN separat : prEN 1993-1-9: Eurocode 3: Design of steel structures Part 1-9: Fatigue strength of steel structures [Eurocod 3 - Calculul structurilor metalice - Partea 1.9 – Rezistența la oboseală a structurilor metalice]. [191]

IV.2 CONCEPTE DE SIGURANȚĂ

Ideea realizării unor construcții cât mai sigure reprezintă una din principalele cerințe puse inginerului proiectant de structuri portante. De aceea, în evoluția metodelor de calcul al construcțiilor, elementul cel mai important l-a constituit filosofia conceptului de siguranță [62] . Se disting 2 categorii de concepte:

Conceptul determinist. El are la bază observarea de către om a fenomenelor simple. Admite principiul fizicii deterministe, al relației între cauză și efect, adică al faptului că efectele vor putea fi întotdeauna prevăzute. Relația acțiune-răspuns este deterministă: la o valoare (unică) a acțiunii se obține o singură valoare a răspunsului "S". Conceptului determinist îi corespund metode de calcul deterministe, în care parametrii de calcul (acțiuni, rezistențe, mărimile geometrice ale elementelor, etc.) sunt considerați nealeatorii, de mărimi certe, bine precizate (determinate). Siguranța este apreciată printr-un coeficient de siguranță, c :

$C = S_L / S$, unde S - valoarea răspunsului ca efect al acțiunilor, iar S_L - valoarea limită a răspunsului. Din această categorie face parte metoda rezistențelor admisibile (MRA) – aplicată încă, așa cum s-a precizat și la capitolul II, în majoritatea standardelor de construcții portante. MRA pune condiția $\sigma \leq \sigma_a$. În fapt MRA a fost aproape unanim folosită în prima jumătate a secolului 20. Principala observație critică este că problema siguranței se rezolvă empiric: o problemă cu mai multe variabile este soluționată printr-un parametru unic, "c", care nu poate evidenția explicit mărimea și natura abaterilor pe care trebuie să le acopere.

Conceptul probabilist. A apărut din două direcții. Prima este legată de acțiunile de îmbunătățire a MRA. Încercându-se obținerea unor mai bune definiții a încărcărilor și a rezistențelor admisibile, a rezultat că, în fapt, toate datele și rezultatele sunt dispersate; apoi s-a constatat că unele fenomene n-au putut fi prevăzute prin conceptul determinist. A doua direcție are la bază studiile statistice asupra unor experimente care arată că valorile înregistrate respectă anumite legi privind răspândirea și repartiția. De aici, observația că există fenomene pentru care este posibilă o previziune colectivă suficient de precisă, în cazul în care fenomenul s-a repetat suficient de des, deși nu se poate prevedea ce se va întâmpla într-un caz unic; aceste fenomene sunt tratate prin calculul probabilităților. Rezultă că pentru un experiment viitor se poate prevedea valoarea mărimii (variabila aleatorie) studiate, **cu o probabilitate acceptată aprioric**. Pe baza câmpului de valori probabile ale acțiunilor, se poate determina, prin relații de natură probabilistică, câmpul de valori probabile ale răspunsului (tensiunilor). Regulile legăturilor dintre câmpurile aleatorii acțiuni-răspuns (tensiuni) fac obiectul **teoriei statistice a structurilor**. Concordanța foarte bună între rezultatele obținute prin calculul de probabilitate și cele experimentale au dovedit că abordarea probabilistică dă realității o reprezentare

suficient de exactă. Ideea folosirii teoriei probabilităților și a metodelor statisticii matematice în studiul siguranței structurilor, preluată de la constructorii de avioane, a fost dezvoltată începând mai ales cu deceniul al cincilea; s-a luat în considerare caracterul aleatoriu al proprietăților materialelor, variabilitatea – în cea mai mare parte statistică - a acțiunilor și a solicitărilor rezultate, precum și alți factori, cum este, de pildă, probabilitatea apariției simultane a diferitelor acțiuni etc.

Siguranța se apreciază **prin probabilitatea de cedare**, adică probabilitatea ca valoarea S a răspunsului să depășească valoarea probabilă a răspunsului limită. Condiția de rezistență se exprimă astfel: $P(S > SL) \leq Pa$, adică probabilitatea de cedare să fie inferioară unei valori admise Pa .

Rezolvarea în manieră complet probabilistă a siguranței este inabordabilă. Din motive practice s-au elaborat metode semiprobabiliste.

Conceptul semiprobabilist, în care parametrii sunt parțial aleatorii. În el se înscrie **metoda semiprobabilistă a stărilor limită**, utilizată în țară la calculul structurilor metalice din construcțiile civile și industriale, STAS 10108/0-78[231], a structurilor de beton (STAS 10107/0-76), precum și în prestandardul [107] Eurocode 3, ENV 1993-1-1: Design of steel structures. Part 1.1: General rules and rules for buildings și [190].

Starea limită [162] este situația în care o structură, în totalitate sau parțial, devine inaptă pentru utilizare, încetează să îndeplinească condițiile de exploatare legate de destinația stabilită construcției, implică apariția unor pericole pentru sănătatea oamenilor, sau pericolul de degradare a unor bunuri materiale. Așadar, sunt situații în care nu mai sunt satisfăcute exigențele de performanță pentru care a fost concepută structura. Stările limită sunt grupate în 2 categorii:

- ultime;
- ale exploatarei normale.

În principiu, în MSL sunt analizate statistic acțiunile și rezistențele și sunt stabilite valorile cele mai defavorabile ale încărcărilor (de regulă valorile maxim probabile), respectiv ale rezistențelor (valorile minim probabile). Apoi, pe baza unei relații de tip determinist între acțiuni și răspunsul structurii (tensiuni), se studiază un număr limitat

de combinații ale valorilor variabilelor aleatoare ce intervin. Condiția de siguranță se exprimă prin relația:

$$S \leq S_L$$

în care S – valoarea maxim probabilă a răspunsului determinat prin combinarea cea mai defavorabilă a acțiunilor, iar
 S_L – valoarea minim probabilă a răspunsului limită, stabilit cu considerarea valorilor minim probabile ale rezistențelor.

În MSL, se ține seama de variația posibilă a încărcărilor, rezistențelor și dimensiunilor, prin coeficienți diferențiați (în locul coeficientului de siguranță unic din metodele deterministe). Metoda stărilor limită (a coeficienților diferențiați) acceptă, ca și metoda rezistențelor admisibile, lucrul materialelor în domeniul elastic, dar în locul unui coeficient de siguranță unic, introduce mai mulți coeficienți, care țin seama de diferitele grupări de abateri pe care le pot avea premisele calculului față de comportarea reală a elementelor și structurilor [161]. În continuare se vor face referiri la [107], Eurocode 3, ENV 1993-1-1: Design of steel structures. Part 1.1: General rules and rules for buildings.

Starea limită la oboseală aparține stării limită ultime.

În aprecierea siguranței apar însă multe incertitudini, având conținut sau origine neprobabiliste. Incertitudinile de mai sus sunt acoperite din punctul de vedere al siguranței prin prevederea unor coeficienți γ_M (material), de reducere a rezistențelor normate – care devin “rezistențe de calcul”, și a unor coeficienți de majorare a încărcărilor normate, $\gamma_{F,-}$ care devin “încărcări de calcul” (A se vedea [107], 9.3.2, 9.3.3 și 9.3.4), respectiv, în lucrarea de față, punctul II.3.3.

Acești coeficienți, γ , au parțial un caracter convențional deterministic, fiind stabiliți pe baza unor aprecieri ingineresti. Pe acest considerent, metoda de calcul se numește “semiprobabilistică”.

Siguranța calculului este dată de relațiile, din [107], 9.5.1 și 9.5.2, prezentate la punctulele II.3.5.1 și II.3.5.2.

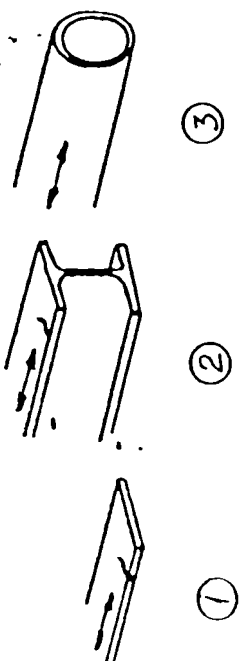
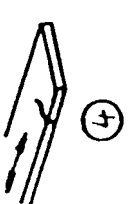

IV.3 ADAPTAREA PREVEDERILOR “EUROCODE 3”

La asamblările construcțiilor portante, numărul parametrilor care influențează factorul de încreștere fiind foarte mare, elaboratorii “ENV 1993-1-1- Eurocode 3 - Part 1-1” [107] s-au bazat pe testarea diferitelor tipuri de soluții constructive caracteristice. Pe baza unui vast program de încercări experimentale, prestandardul [107] definește 14 categorii de detalii, fiecare fiind identificată prin rezistența la oboseală $\Delta\sigma$, la 2×10^6 cicluri de solicitare (A se vedea [107], tabelul 9.6.1, respectiv cap. II, tab. II-4). Clasificarea se întinde de la $\Delta\sigma = 160 \text{ N/mm}^2$ - pentru elemente fără concentratori, deci practic neafectate de oboseală, până la $\Delta\sigma = 36 \text{ N/mm}^2$ - pentru elementele cele mai afectate (grupa cea mai defavorabilă).

În metodologia Prompt SA, pentru aplicarea corectă și unitară a Eurocode 3-ENV-1993-1-1[107], o primă acțiune a constat într-o analiză comparativă a cazurilor de încreștere din STAS 8290-83, punctul 5.9.2.1, și a detaliilor constructive din [107], - clasate în tabelele 9.8.1...9.8.7; în diverse categorii de detalii (rezistențe admisibile). În final s-au întocmit tabele de lucru, având o coloană în plus față de cele din [107], în care sunt înscrise simbolurile concentratorilor din STAS 8290-83. Ele se regăsesc în lucrările Prompt [201], [203], [202], [179]. Exemplu: - tab. IV-1, reprodus din [201]; -tabelele 6.1...6.7 din[179] .

Tot în vederea aplicării unitare și sistematice a [107], s-au analizat principalele componente de rezistență ale diferitelor categorii de IR , comparativ cu detaliile constructive din [107], tabelele 9.8.1...9.8.7, finalizând cu încadrarea componentelor respective în categoriile de detalii ale [107]. În anexele acestui capitol (Anexe IV-1...IV-13) sunt reproduse, din [201] (T5141/6-93), figurile 5.1..5.13, care ilustrează încadrări de elemente de rezistență.

În continuare se prezintă modul de încadrare a elementelor constructive de structură portantă în diversele categorii de detalii [201].

Categoriile de detalii	Detalii constructive	Descriere	Condiții cerute	Caz în creșterea conf. STAS
160	 <p>① ② ③</p>	<p><u>Produce laminate și extrudate</u> ① Plăci și platbande ② Profile laminate ③ Tuburi fără sudură (ef. Tabloului 3.6. și 37.)</p>	<p>① la ③ Muchii vii, defecte de suprafață și de laminare ameliorate prin polizare.</p>	V601
140	 <p>④</p>	<p><u>Platbenzi tăiate oxi sau cu foarfeca</u> ④ Materiale tăiate oxi-automat sau forfecat fără striuri de tăiere. ⑤ Materiale tăiate oxi normal sau cu muchii tăiate oxi-automat cu linii de temperatură de topire puțin adânci și regulate.</p>	<p>④ Eliminarea tuturor defectelor vizibile de muchie. ⑤ Prelucrarea pt îndepărtarea tuturor defectelor de muchie. ④ și ⑤ - Nu se resudează rădăcina - Ameliorarea unghiurilor de racordare (panta 1:4) sau a adânciturilor prin șlefuire a tuturor defectelor vizibile - În dreptul cavităților tens. de calcul se determină cu secțiunea netă.</p>	V11
125	 <p>⑤</p>			V11

Poduri rulante cu grinzi principalele cu inimă plină sau chesonate

- Debitarea tălpilor și inimilor grinzilor podurilor rulante se efectuează oxiacetilenic, manual sau automat. Dacă tăietura se finisează ulterior prin polizare sau așchiere eliminând creștăturile și ciupiturile – se adoptă clasa de detaliu $\Delta\sigma = 160\text{N/mm}^2$.
- Grinzile cu inimi foarte înalte, la care inima se realizează din două elemente îmbinate prin sudură longitudinală, se încadrează în grupa $\Delta\sigma = 140\text{N/mm}^2$.
- Podurile rulante cu deschidere mai mare decât lungimea de laminare a tablelor, au inimile și tălpile din elemente sudate cap la cap transversal. Această zonă se încadrează în grupa $\Delta\sigma = 112\text{N/mm}^2$.
- Cazul de încrestare coboară la $\Delta\sigma = 90\text{N/mm}^2$ dacă cusătura nu respectă condițiile tehnologice prescrise (șanfrenare și resudarea prin crăițuire a rădăcinilor) sau la $\Delta\sigma = 70\text{N/mm}^2$ dacă nu se elimină craterele finale.
- În situația în care se realizează un control nedistructiv (Roentgen, US) și nu se constată defecțiuni, se poate adopta grupa $\Delta\sigma = 125\text{N/mm}^2$.
- Sudurile de colț continue dintre inimi și tălpi se încadrează în una din categoriile 140; 112 sau 100 N/mm^2 în funcție de modul de execuție;- manual sau automat;
 - cu pătrundere totală sau parțială;
 - cu sau fără prelucrare (șanfrenare);
 - cu sau fără cratera finale.
- Îmbinările sudate longitudinal ale diafragmelor și cele de prindere ale rigidizărilor longitudinale și transversale se încadrează în grupa $\Delta\sigma = 71\text{N/mm}^2$
- Îmbinările de elemente suprapuse cu sudură de colț conduc la cazuri de încrestare foarte severe care depind atât de modul de execuție a cordonului cât și de grosimea elementelor suprapuse:

$$\Delta\sigma = 50 \text{ N/mm}^2 \text{ pentru } t \leq 20 \text{ mm}$$

$$\Delta\sigma = 36 \text{ N/mm}^2 \text{ pentru } t > 20 \text{ mm}$$

În Anele IV-1...IV-8 (reproducând figurile 5.1 – 5.8 din [201]) sunt reprezentate cazuri tip de poduri rulante cu inimă plină sau în cheson cu încadrările corespunzătoare în categoriile de detalii.

Poduri rulante cu grinzi principale cu zăbrele

- Laminele folosite la alcătuirea grinzilor principale cu zăbrele se încadrează în grupa $\Delta\sigma = 160 \text{ N/mm}^2$.

- Îmbinările cap la cap cu suduri transversale se încadrează după cum urmează:

grupa $\Delta\sigma = 71 \text{ N/mm}^2$, pentru secțiuni tubulare circulare;

grupa $\Delta\sigma = 56 \text{ N/mm}^2$, pentru secțiuni tubulare rectangulare.

- Încadrarea în grupe trebuie să țină cont atât de modul de prelucrare a suprafețelor cât și de grosimea pereților profilelor. Profilele cu pereți sub 8 mm se încadrează mai defavorabil cu două trepte.
- Îmbinările cu sudură cap la cap cu flanșe a pieselor cu capetele prelucrate prin rabotare se încadrează în:

grupa $\Delta\sigma = 50 \text{ N/mm}^2$, pentru secțiuni tubulare circulare;

grupa $\Delta\sigma = 45 \text{ N/mm}^2$

- În cazul îmbinărilor sudate de colț încadrarea se face în:

grupa $\Delta\sigma = 40 \text{ N/mm}^2$, pentru secțiuni tubulare rotunde;

grupa $\Delta\sigma = 36 \text{ N/mm}^2$, pentru secțiuni tubulare rectangulare.

- Prinderea zăbrelelor în noduri se face în două moduri: direct și prin intermediul guseelor.

La prinderea directă, încadrarea în cazurile de crestare depinde de următorii factori:

- unghiul pe care zăbrelele le fac cu talpa (îmbinare în "K" cu ambele zăbrele înclinate sau îmbinare "N" dacă una din zăbrele este normală pe talpă.)
 - de modul de centrare a zăbrelelor în nod;
 - forma secțiunii diagonalelor-tubulară rotunde sau tubulară rectangulară;
 - raportul d_o / d_i dintre diametrele tălpii și diagonale sau b_o / b_i dintre latura tălpii și cea a diagonalei;
 - raportul t_o / t_i dintre grosimea tălpii și cea a diagonalei
- Ținând cont de cele de mai sus, îmbinările în "K" și "N" pentru secțiuni tubulare circulare se încadrează în grupa 90N/mm^2 , pentru $t_o / t_i > 2,0$, sau în grupa 45N/mm^2 , pentru $t_o/t_i=1,0$.
 - Îmbinările în "K" și "N" pentru secțiuni tubulare rectangulare se încadrează în grupa 71 N/mm^2 pentru $t_o / t_i \geq 2,0$ și în grupa 36N/mm^2 pentru $t_o/t_i=1,0$.
 - Îmbinările prin suprapunere în "K", pentru ambele tipuri de secțiuni tubulare, se încadrează în grupa 71 N/mm^2 pentru $t_o / t_i > 1,4$ și 56N/mm^2 pentru $t_o / t_i = 1,0$.
 - Îmbinările prin suprapunere tip "N" la ambele tipuri de secțiuni tubulare se încadrează în grupa 71 N/mm^2 pentru $t_o / t_i \geq 1,4$ și 50 N/mm^2 pentru $t_o / t_i = 1,0$.
 - Pentru îmbinările suprapuse se mai impun următoarele condiții:

suprapunere definită prin raportul $q/p \times 100$ să se înscrie între 30% și 100%, unde "q" reprezintă distanța dintre axeie de greutate a celor două diagonale măsurate la nivelul superior al tălpii și "p" lungimea tăieturii înclinate a diagonalei care calcă în întregime pe talpă.

De asemenea se prescriu unele condiții limită;

- diametrul, respectiv lățimea elementelor se limitează la $d_o \leq 300$ mm, respectiv $b_o \leq 200$ mm;
- unghiul de îmbinare al diagonalelor $35^\circ \leq \theta \leq 50^\circ$
- rapoartele: $b_o/t_o \leq 25$ și $d_o/t_o \leq 25$;
- raportul dintre lățimea (diametrul) diagonalei și cel al tălpii:
- $0,4 \leq b_i/b_o \leq 1,0$;

$$0,25 \leq d_i/d_o \leq 1,0.$$

- Zona de prindere a guseelor de elementul tălpilor se face în funcție de raportul dintre zona de racordare a guseului "r" și lățimea elementului de care se sudează guseul "w":

$$\Delta\sigma = 90 \text{ N/mm}^2; \text{ pentru } 1/3 \leq r/w; r > 150 \text{ mm.}$$

$$\Delta\sigma = 71 \text{ N/mm}^2; \text{ pentru } 1/6 \leq r/w < 1/3;$$

$$\Delta\sigma = 45 \text{ N/mm}^2; \text{ pentru } 1/6 > r/w$$

În Anele IV-9...IV-13 (reproducând figurile 5.9 – 5.13 din [201]) sunt reprezentate cazuri tip de poduri rulante în zăbrele cu încadrările corespunzătoare în categoriile de detalii (încrестare).

Detalii fără sudură, la structuri cheson sau în zăbrele

- Atât la structurile în cheson cât și la cele în zăbrele îmbinările cu buloane se încadrează în categoria de detaliu $\Delta\sigma = 112 \text{ N/mm}^2$.
- Bulioanele sau tijele filetate întinse intră în grupa

$$\Delta\sigma = 36 \text{ N/mm}^2$$

- Buloanele păsuite, care lucrează la presiune pe gaură supuse la simplă sau dublă forfecare se încadrează în categoria de detaliu $\Delta\sigma = 100\text{N/mm}^2$ (panta $m=5$).

În același mod, în lucrările Prompt [203], [202], [202] s-au analizat principalele componente de rezistență ale altor categorii de IR , comparativ cu detaliile constructive ale tabelelor 9.8.1...9.8.7 din [107], activitatea finalizându-se cu încadrarea componentelor respective în categoriile de detalii ale [107].

IV.4 EXEMPLE DE LUCRĂRI ÎN CARE S-A UTILIZAT “EUROCODE 3”

IV.4.1 Evaluarea duratei de viață la elemente fără fisuri

IV.4.1.1 Fișa utilajului

Se prezintă cazul analizat în lucrarea [201], , efectuată de către Prompt SA după metodologia descrisă la punctul II- 7.

S-a verificat starea de oboseala la un pod rulant bigrindă cheson, 30 t – 20 m, pentru care este dată fișa utilajului în fig. IV-1[201] .

IV.4.1.2 Prelucrarea datelor experimentale și din fișa utilajului

Cu date extrase din fișa utilajului, se calculează numărul de luni pe perioadă, numărul de cicluri pe lună și numărul total de cicluri pe perioadă – date trecute în tabel IV-2). S-a considerat, până în dec. 1989- 25,6 zile /lună, iar din ian. 1990 - 21,3 zile /lună. Numărul de cicluri n_i corespunzător ecarturilor de tensiune $\Delta\sigma_i$ măsurate la diferitele fracțiuni ale sarcinii nominale sunt trecute în tabel, coloanele 4-8, ele reprezentând părți din numărul total de cicluri înscris în col.3, proporționale cu încărcarea lunară medie dată în % în fișa utilajului.

În cazul tabel au fost trecute ecarturile de tensiune maxime corespunzătoare limitelor superioare ale domeniilor de sarcină, determinate experimental.

IV.4.1.3 Alegerea coeficienților de siguranță

Se alege $\gamma_F = 1$, conf. [107], 9.3.2, respectiv II.3.3.2 și $\gamma_M = 1,15$, conf. [107], 9.3.4, respectiv II.3.3.4.

IV.4.1.4 Calculul parametrilor principali ai curbei Wöhler

Pentru exemplul de calcul s-a adoptat grupa de încrestare $\Delta\sigma_C = 160 \text{ N/mm}^2$, la $N_C = 2 \cdot 10^6$ cicluri.

FISA UTILAJULUI

A. Date generale despre utilaj

I. Identitatea utilajului

1. Firma Electroputere SA.2. Utilajul Pod rulant 30t-20mProiect nr. T 826Adresa CraiovaLoc montaj _____ Nr. inv. 6-218Furnizor ICM Bocsa Nr. fabr. _____

Nr. telex _____

An fabric. 1949 An pun. în funcț. 1950

II. Condiții de lucru :

In exterior — Mediu necoroziv x Mediu uscat —

In interior (hală) x _____ — _____ —

2. Destinația (uz general, forjare, trat. term., etc.) _____

III. Date tehnice:

1. Grupa de funcționare macara : (vezi cartea macaralei) B. 3. IV

2. Vitezele de lucru : viteze ridicare nominală/rețușă

-mecanism principal _____

-mecanism auxiliar _____

-viteza deplasare cărucior _____

-viteza deplasare macara _____

3. Structura de rezistență : (tip cheson, zăbrele, monogriudă, bigriudă, etc.) bigriudă tip cheson4. Calea de rulare: Înălțimea căii 4,5mLungimea căii 120mNr. utilaje pe cale 3Dacă este circulabilă da. Posarele de circulațiela ambele fize

IV. Starea tehnică actuală a utilajului și căilor eficiente de rulare:

1. Starea tehnică a mecanismelor (Mărimi care trebuie reținute: cuplaje, ioni și a frinelor, limitatori, etc.) Mecanisme corespunzătoare normelor mai puțin frâna transtație. cărucior care trebuie reparată.

2. Starea construcției metalice (coroziuni, deforțări, fisurări, etc.):

Construcția metalică a podului bună. Nu s-au găsit fisuri
fisuri aici deforțări3. Starea căilor de rulare (derivelări, abateri de elinare, starea jonctelor, uzuri, etc.) Căile de rulare acceptabile la nivelmentunde abateri la nivelment corectabile foarte bune.

4. Alte observații :

C Intreținere și reparații

I. Ritmul de efectuare a lucrărilor de întreținere și reparații

1. Foarte rar (niciodată), pt. că funcț. bine
2. Numai când apar defecțiuni
3. Numai la termenele de revizie și reparații.
4. Deseori, utilajul este necorespunzător
5. Alt caz.
6. Câte rotații de rulare se schimbă în medie pe an.

SUBANS. UTILAJ			CALE RULARE
ELECTR.	MEC.	C.MET	
		✓	
			✓
✓	✓		
	0,5		

II. Evenimente deosebite care au apărut pe durata de funcționare a utilajului și modul de remediere al acestora:

Utilajul nu a suferit evenimente deosebite

Intocmit

B. REGIMUL DE FUNCTIONARE A UTILAJULUI

Nr. crt.	Perioade distincte de lucru		Nr. de schimburi	Nr. de cicluri pe schimb	Încărcarea medie estimată pe schimb în %										
	Caracteristica perioadei	De la lună-ori			Până la lună-ori	La ciclul auxiliar		La ciclul principal							
						0-1/3 Q _N	1/3-2/3 Q _N	2/3-1 Q _N	Peste Q _N						
			min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.					
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	Motoare auxiliare RUV 5	XII - 1950	XII - 1952	2	50	-	-	-	10	-	40	-	40	-	10
	Motini CC I 500 R R.	XII - 1952	XII - 1964	2	80	-	-	-	10	-	90	-	-	-	-
	Motoare DEH 3500. A.	XII - 1964	XII - 1982	3	80	-	-	-	0	-	30	-	65	-	5
	Motoare Metr. 300	XII - 1982	XII - 1989	2	75	-	-	-	5	-	80	-	15	-	-
	Motoare diverse	XII - 1984	XII - 1992	1	70	-	-	-	15	-	60	-	25	-	-

Fig. IV-1 [201], pag.3

Tabelul IV-2 [201]

Nr per dist.	Nr. de luni pe perioada pe lună #	Nr de cicluri pe lună #	Total cicluri pe perioadă distinctă	n _i pe perioade distincte, la ecarturi n _i măsurate				
				pentru 2N	pt 1/3 Q _N	pt 2/3 Q _N	pt Q _N	peste Q _N
				ΔV ₁ = 0	ΔV ₂ = 34	ΔV ₃ = 68	ΔV ₄ = 102	ΔV ₅ = 117
0	1	2	3	4	5	6	7	8
1	36	2560	0,09216 × 10 ⁶	-	0,0092 × 10 ⁶	0,0368 × 10 ⁶		0,0092 × 10 ⁶
2	132	4096	0,5407 × 10 ⁶	-	0,0541 × 10 ⁶	0,4866 × 10 ⁶	-	-
3	216	6144	1,3271 × 10 ⁶	-	-	0,3991 × 10 ⁶	0,8626 × 10 ⁶	0,0663 × 10 ⁶
4	84	3840	0,3225 × 10 ⁶	-	0,0161 × 10 ⁶	0,2580 × 10 ⁶	0,0484 × 10 ⁶	-
5	36	1491	0,0537 × 10 ⁶	-	0,0081 × 10 ⁶	0,0322 × 10 ⁶	0,0134 × 10 ⁶	-
6								
7								
8	Nr cicluri n _i la ecarturi ΔV _i →			-	0,0875 × 10 ⁶	1,2127 × 10 ⁶	0,9612 × 10 ⁶	0,0755 × 10 ⁶
9	Ecarturi de comp ₇ ΔV _i →			-	34	68	102	117
10	Cazul de calcul pentru N _i			-	<u>II</u>	<u>II</u>	<u>II</u>	<u>I</u>
11	Cicli de rupere N _i →			-	∞	38,9 × 10 ⁶	5124 × 10 ⁶	3,362 × 10 ⁶
12	Votămări parțiale n _i /N _i →			-	0	0,031	0,187	0,022
13	Votămări totală D = Σ n _i /N _i →			0,24				

Ecartul tensiunilor nominale $\Delta\sigma_D$ corespunzătoare la $N_D = 5 \times 10^6$ cicluri este:

$$\Delta\sigma_D = \Delta\sigma_C \left[\frac{N_C}{N_D} \right]^{\frac{1}{3}} = 117,9 \text{ N/mm}^2 \text{ respectiv} \quad (\text{IV.1})$$

$$\Delta\sigma_D / \gamma_M = \frac{117,9}{1,15} = 102,5 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{IV.2})$$

Ecartul tensiunilor nominale $\Delta\sigma_L$ de rezistență la oboseală, la $N_L = 10^8$ cicluri (limita de prag) este:

$$\Delta\sigma_L = \Delta\sigma_D \left[\frac{N_D}{N_L} \right]^{\frac{1}{5}} = 64,8 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{IV.3})$$

respectiv

$$\Delta\sigma_L / \Delta\sigma_M = 56,3 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{IV.4})$$

IV.4.1.5 Calculul numărului de cicluri N_i corespunzător ecarturilor de tensiune $\Delta\sigma_i$

Formulele de calcul ale ciclurilor N_i , conform [107], 9.5.2.2, respectiv II.3.5.2.2, sunt:

$$\text{- I. dacă } \gamma_{Ff} \Delta\sigma_i \geq \sigma_D / \gamma_{Mf}, \text{ atunci } N_i = 5 \cdot 10^6 \cdot \left[\frac{\sigma_D / \gamma_{Mf}}{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_i} \right]^3 \quad (\text{IV.5})$$

$$\text{- II. dacă } \Delta\sigma_D / \gamma_{Mf} > \gamma_{Ff} \Delta\sigma_i \geq \Delta\sigma_L / \gamma_{Mf}, \quad (\text{IV.6})$$

$$\text{atunci } N_i = 5 \cdot 10^6 \cdot \left[\frac{\sigma_D / \gamma_{Mf}}{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_i} \right]^5 \quad (\text{IV.7})$$

$$\text{- III. dacă } \gamma_{Ff} \Delta\sigma_i < \Delta\sigma_L / \gamma_{Mf}, \text{ atunci } N_i = \infty \quad (\text{IV.8})$$

Valorile calculate cu ajutorul acestor formule sunt trecute în tab.IV-2, , rândul 11.

IV.4.1.6 Calculul degradărilor parțiale și cumulara lor

Având reconstituit istoricul de încărcare al utilajului, analiza stării de oboseală se efectuează cu metoda cumulării degradărilor.

Degradările parțiale $\frac{n_i}{N_i}$ provocate de ecarturile de tensiune $\Delta\sigma_i$ în structura metalică a podului sunt trecute în tab.IV-2, la linia 12.

Prin însumarea degradărilor parțiale, se obține degradarea totală cumulate.

$$D = \sum \frac{n_i}{N_i} = 0,24 \leq 1 \quad (\text{IV.9})$$

Concluzie: Rezultă că podul rulant **mai poate funcționa** existând suficiente rezerve.

De remarcat ponderea destul de ridicată în degradarea totală a degradării produse de ciclurile efectuate la sarcini mai mari decât sarcina nominală.

IV.4.2 Evaluarea riscului ruperii fragile

IV.4.2.1 Prezentarea datelor de bază ale cazului analizat

O evaluare a condițiilor de rupere fragilă conform Eurocode 3, ENV 1993-1-1[107] s-a făcut în lucrarea [188] ., care este o lucrare de expertizare la avaria din 1995.01.15 a podului rulant 20 t-31,5 m, pod rulant tehnologic cu graifăr, de la ROMCIN Târgu-Jiu. Avaria, produsă la temperatura de circa -8°C (minus !), a constat în ruperea în două a grinzii principale a podului rulant, urmată de căderea la sol a părților rupte, torsionarea grinzilor de capăt și căderea căruciorului; expertizarea a implicat aspecte multiple, făcându-se de către Prompt SA în colaborare cu Catedra de Știința materialelor a Facultății de mecanică din Timișoara, INCERC Timișoara ; Laboratorul chimic al UMTimișoara.

În continuare se expune partea de expertiză referitoare la ruperea fragilă, executată conform [107], ENV 1993-1-1 - Eurocode 3 Part 1-1, Annex C, metodă prezentată la cap.II.

IV.4.2.2 Calculul temperaturii minime, fără risc de rupere fragilă, pentru *grindă fără fisură*

Valoare temperaturii minime se calculează pentru talpa grinzii, la care reziliența are valori mai mici decât la inimă.

- Valorile medii obținute [188] pentru reziliență (la materialul neîmbătrânit) sunt:

$$t = -20^{\circ}\text{C} \quad KV = 10 \text{ J}$$

$$t = -12^{\circ}\text{C} \quad KV = 13 \text{ J}$$

$$t = 0^{\circ}\text{C} \quad KV = 20 \text{ J}$$

$$t = + 20^{\circ}\text{C} \quad KV = 58 \text{ J}$$

În figura IV-2 este reprezentată grafic, așa cum s-a trasat în [188], cu valorile de mai sus, variația rezilienței în funcție de temperatură, punctele intermediare fiind determinate cu ajutorul unui polinom de interpolare.

Din grafic rezultă că reziliența de 27 J poate asigura o funcționare în siguranță la temperatura de +6°C

$$T_{cv} = +6^{\circ}\text{C}$$

Temperatura minimă T_{min} la care este eliminat riscul ruperii fragile este dată de relația

$$T_{min} = 1,4T_{cv} + 25 + \beta + (83 - 0,08 f_{y0}) [K_d]^{0,17} \quad ([107], \text{ C.3, respectiv (II.51)} \quad \text{(IV.10)})$$

În această relație; f_{y0} s-a luat egal cu $R_{c1} - 302,3 \text{ N/mm}^2$, valoarea nominală de curgere, determinată experimental (fiind determinare experimentală, nu s-a folosit f_{yt} , ci f_{y0}).

$$B = 100 (\ln K_{1c} - 8,06) \quad \text{(IV.11)}$$

K_{1c} – tenacitatea la rupere

Din [107], tab. C.2 (respectiv tab. II.8) se iau valorile coeficienților

$$K_a = 0,18; \quad K_b = 0,15; \quad K_c = 0,03; \quad K_d = 10^{-3}; \quad \gamma_c = 1,5$$

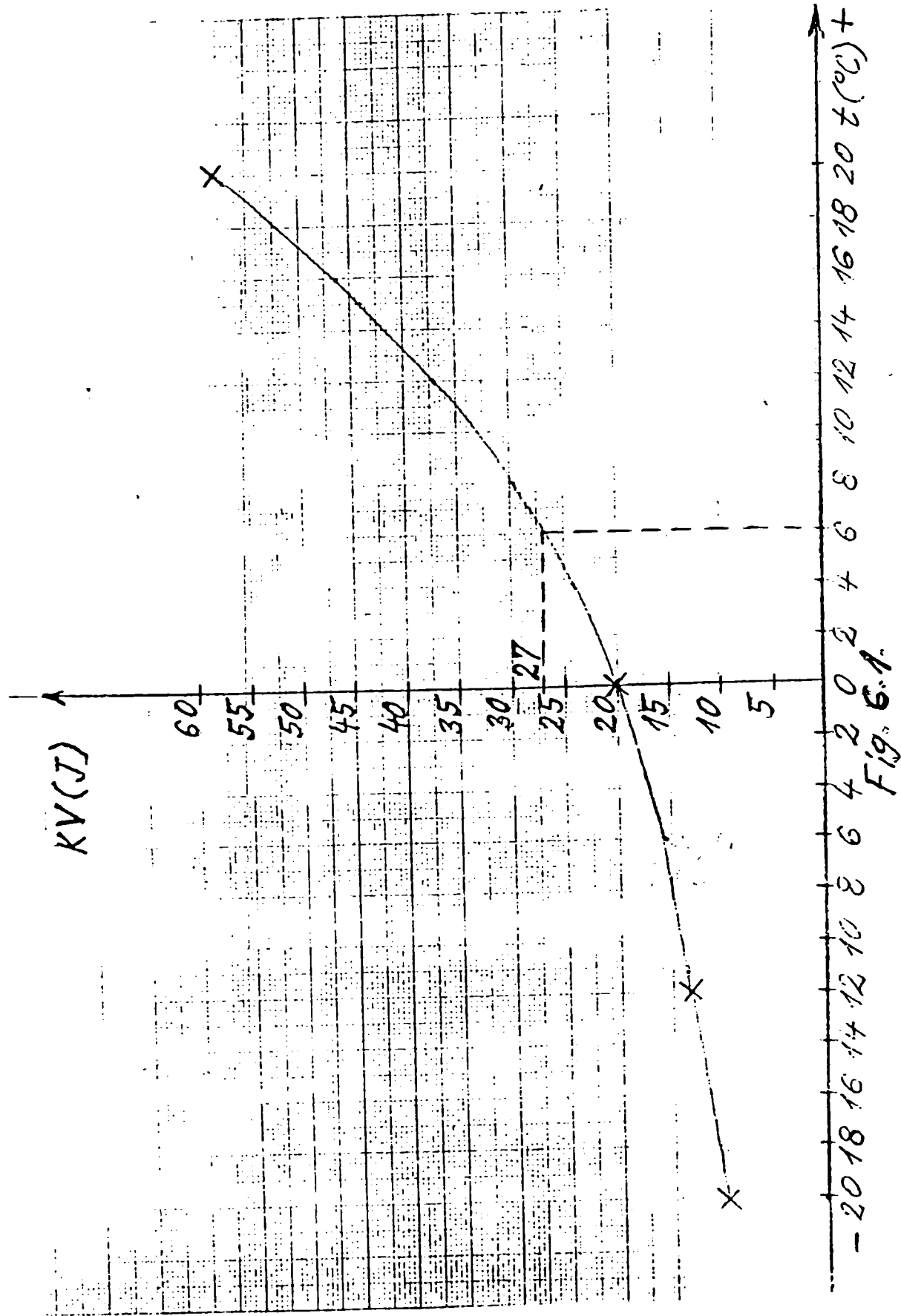


Fig. 6.1.

Fig. IV-2 [188]

Cu aceste valori rezultă, pentru grinda nefisurată:

$$K_{1C} = (1,424 \cdot 1,5)^{0,55} \cdot 302,3 \cdot 15^{0,55} / 1,226 = 1660,$$

$$\text{(relația [107], C.2, respectiv II.49)} \quad \text{(IV.12)}$$

$$\text{unde: } \alpha = \frac{1}{0,18 + 0,15 \ln(15/1) + 0,03 \cdot (15/1)^{0,5}} = 1,24 \quad \text{(IV.13)}$$

$t=15$ mm (grosimea tălpii analizate); $t_1=1$,
(conf. [107], C.2.4, respectiv II.3.3.2.4)

$$T_{\min} = 1,4 \cdot 6 + 25 - 64,5 + (83 - 0,08 \cdot 302,3)(10^{-3})^{0,17} =$$

$$= -12,9^{\circ}\text{C} \quad \text{(IV.14)}$$

$$\text{unde: } \beta = 100 (\ln 1660 - 8,06) = -64,5 \quad \text{(IV.15)}$$

Deci temperatura minimă la care este eliminat riscul ruperii fragile pentru grinda nefisurată este de $-12,9^{\circ}\text{C}$.

IV.4.2.3 Calculul temperaturii minime, fără risc de rupere fragilă, pentru *grindă cu fisură*

Deoarece în grindă analizată a existat o fisură de oboseală, categoria de eforturi este S3, la care corespund coeficienții:

$$k_a = 0,1; k_b = 0,07; k_c = 0,04$$

Cu aceste valori rezultă:

$$K_{1C} = (2,25 \cdot 1,5)^{0,55} \cdot 302,3 \cdot 15^{0,55} / 1,226 = 2135, \quad \text{(IV.16)}$$

$$\text{unde: } \alpha = \frac{1}{0,1 + 0,07 \ln 15 + 0,04 \cdot 15^{0,5}} = 2,250 \quad \text{(IV.17)}$$

$$T_{\min} = 1,4 \cdot 6 + 25 - 39,4 + (83 - 0,08 \cdot 302,30)(10^{-3})^{0,17} = +12,2^{\circ}\text{C} \quad \text{(IV.18)}$$

$$\text{Unde: } \beta = 100 (\ln 2135 - 8,06) = -39,4 \quad \text{(IV.19)}$$

Deci temperatura minimă la care putea fi utilizat, în deplină siguranță, podul rulant fisurat este de +12,2°C.

IV.4.2.4 Încercări ale materialului la care s-a evaluat ruperea fragilă

Spre a corela evaluările de mai sus cu celelalte elemente ale expertizei, se expun în continuare și acestea din urmă.

Analiza metalografică a materialului grinzii

Analiza metalografică a materialului grinzii avariate a fost efectuată, la Catedra de Știința Materialelor și Tratamente termice din cadrul Facultății de Mecanică, a Universității "Politehnica" Timișoara, atât pe epruvete extrase din talpă cât și pe epruvete extrase din inimă.

Debitarea probelor și pregătirea pentru analiza metalografică s-a făcut în conformitate cu STAS 4203-74 [236].

- **Examinarea microstructurală a probelor**, efectuată cu un microscop optic metalografic Epityp-2, a evidențiat faptul că zona centrală a tablei are o structură ferită-perlitică în șiruri, iar zona de margine a tablei are o structură ferită-perlitică cu grăunți echiacși și cu o cantitate mult mai mică de perlită, fiind decarburată.

Grosimea stratului decarburat este de 0,8 ... 1 mm - la talpă și de 1,7 ÷ 2mm- la inimă.

Decarburarea straturilor de margine poate fi produsă la laminare, ceea ce ar explica grosimea mai mare a acestui strat la inima grinzii (grosimea 10 mm), cu mai multe treceri prin valțuri decât talpa (grosimea 15 mm).

Zonele decarburate reduc limita la oboseală a materialului și favorizează apariția de fisuri.

Din punctul de vedere al calității, structura materialelor analizate corespunde cu cea a materialului OL 38.

- **Analiza macrofractografică**

Examinarea aspectului suprafeței de rupere a scos în evidență existența a două zone specifice ale suprafeței de rupere:

- zonă cu aspect neted;
- zonă cu aspect rugos.

Zona cu aspect neted a fost extinsă în talpă, pe o lungime de circa 50 mm.

Existența în zona netedă a unor linii în evantai, curbate dinspre zona netedă spre cea rugoasă, indică direcția de propagare a ruperii. Această direcție rezultă și din orientarea structurii (în zona rugoasă), sub forma acelor de brad.

Având în vedere aspectul macrostructural al zonei de rupere cu aspect neted, se poate trage concluzia că este vorba de o **rupere de oboseală**. Existența liniilor în evantai, indică zonele în care fisura s-a menținut un timp, după care s-a propagat din nou, până când a dus la cedarea secțiunii slăbite.

- Analiza microfractografică

Analiza microfractografică a fost efectuată cu un microscop electronic prin transmisie, BS 613 –Tesla, pe replici de carbon umbrite cu crom.

Imaginile microfractografice a probelor luate din zona netedă evidențiază elementul specific al microreliefului zonei de rupere, care constă din linii curbe care se succed – element **specific suprafeței de rupere la oboseală**.

De asemenea, aceste imagini au mai scos în evidență existența unor zgârieturi care au fost provocate de vârfurile celor două părți conjugate ale fisurii, care s-au mișcat una față de cealaltă.

Și analiza microfractografică indică faptul că rupura are **caracter de rupere prin oboseală**, fisura propagându-se în timp datorită solicitării ciclice, caracterizată podului rulant.

IV.4.2.5 Analiza istoricului de încărcare a podului rulant

De la punerea în funcțiune a podului rulant, la data 28.08.1969, până la momentul producerii avariei, la 15.01.1995, podul rulant a funcționat 25 ani și 4 luni. În conformitate cu datele din fișa utilajului, întocmită de beneficiar, fig. IV-3, rezultă un

regim de funcționare reprezentativ, adică funcționare în trei schimburi, cu un număr mediu de 90 de cicluri pe schimb, respectiv de 270 de cicluri pe zi.

Luând în considerare 300 zile de lucru într-un an, rezultă 81000 de cicluri. Pe toată durata de funcționare de 25 de ani și 4 luni rezultă un număr de 2 051 730 de cicluri.

În conformitate cu prevederile [244], podurile rulante cu graifăr se încadrează în clasa de ridicare R3; R4 și grupa de funcționare V; IV.

La verificarea la oboseală a construcției metalice a podurilor rulante, se iau în calcul un număr total de cicluri pe durata de viață, pentru grupa de funcționare $V - 6 \cdot 10^5 < N \leq 2 \cdot 10^6$, iar pentru grupa VI – $N > 2 \cdot 10^6$.

Se poate observa că, de la punerea în funcțiune până la producerea avariei, podul rulant a fost supus la un număr de cicluri mai mare de $2 \cdot 10^6$, luând în considerare că la fiecare ridicare are loc doar un ciclu de solicitare. În realitate, la fiecare ridicare în construcția metalică apar mai multe cicluri de solicitare determinate de elasticitatea construcției metalice și a cablurilor de ridicare.

Fiind vorba de un pod rulant tehnologic cu graifăr, în conformitate cu [237] (STAS 4662-79 "Instalații de ridicat. Prescripții generale de calcul pentru mecanisme", înlocuit de [227]), la starea de solicitare L_3 , în care mecanismele sau elementele de mecanisme sunt supuse tot timpul la solicitări apropiate sau egale cu solicitările maxime"

În consecință, podul rulant a fost supus la un număr mai mare de 2×10^6 cicluri de solicitare, la sarcina nominală sau apropiată de sarcina nominală.

IV.4.2.6 Calculul de verificare a grinzilor principale

Calcululele efectuate asupra grinzilor podului rulant au fost făcute pe calculator cu programul PODRUL și au constat în verificare capacității portante, verificarea condiției de rigiditate și calculul la oboseală. Spre a se verifica corectitudinea proiectării, verificările au fost făcute cu încărcările și coeficienții prevăzuți în proiectul

inițial, neluându-se în calcul eventuale modificări de reglementări apărute ulterior în perioada de exploatare a podului rulant.

În urma acestor verificări a reieșit corectitudinea calculelor inițiale din proiect, fiind respectate prescripțiile de proiectare și datele constructive din STAS 4664-63 (înlocuit de [244]), aceasta reprezentând standardul de referință în vigoare la data proiectării podului rulant.

De asemenea, s-a mai efectuat un calcul de verificare al chesonului în zona de rupere (secțiunea fisurată), luându-se în calcul numai secțiunea activă (mai puțin secțiunea hașurată) a secțiunii prezentate în figura IV-4. [188]

Verificarea în punctele caracteristice a dus la obținerea unor eforturi unitare mai mici decât cele admisibile, rezultând astfel că secțiunea din punct de vedere al rezistenței putea să preia solicitările maxime prevăzute în calcul. Din cele prezentate mai sus, se desprind următoarele concluzii:

- inițierea fisurii la oboseală a apărut într-o zonă de efort maxim, amplitudinea tensiunii fiind $\sigma_a = 451 \text{ daN/cm}^2$, la un coeficient de asimetrie $\rho = 0,305$;
- inițierea fisurii a apărut în timp, după un număr relativ mare de cicluri (>70%), putând avea cauze multiple;
- propagarea fisurii, în timp, a avut loc printr-un proces de deformare repetată și rupere în imediata vecinătate a vârfului fisurii. Aceasta a dus la o creștere lentă a fisurii, din aproape în aproape ("propagare stabilă"), creșterea lungimii fisurii determinând accelerarea procesului de fisurare;
- din datele obținute în urma expertizării rezultă că secțiunea chesonului grinzii principale ar fi trebuit să reziste la un ciclu de tensiuni cu amplitudinea rezultată din calculul la proiectare, nefiind o rupere prin suprasolicitarea materialului din secțiunea rămasă;
- o posibilă cauză care a generat ruperea finală ar putea fi o suprasolicitare rezultată din acțiuni dinamice suplimentare ciclului luat în calcul, factorii posibili fiind: cale de rulare cu denivelări în plan vertical, materialul granulat înghețat etc. Suprasolicitarea poate duce la creșterea amplitudinii

tensiunilor, peste cea luată în calculul inițial, ceea ce duce implicit la o mărire a vitezei de creștere a fisurii, cu pericolul producerii unei propagări instabile.

2) DATE DESPRE UTILITATEA: **60060**
 Denumirea utilitatii: **Podul ontocu graitor 207x31,5m**
 Beneficiar: **SC ROMCINSA filiala 19-jul**
 Societate de lucru: **Mari Cement**

DATE GENERALE	3) Furnizor: UCMMA BOCSA ROMANIA Proiect: T-271-1963	
	An fabricatie: 1964 An punere in functia: 1969 Inaltime: 31,5m	
UTILITATE	Sarcina nominala la carlig mare sau / carlig mic: 1 tona	
	Alimentare electrica prin cablu: <input type="checkbox"/> pantofan, <input checked="" type="checkbox"/> sau altfel: <input type="checkbox"/>	
STRUCTURA DE FUNDATII	Actionare cemenzi din cabluri de putere: <input checked="" type="checkbox"/> sau de la sol: <input type="checkbox"/>	
	Pod monogrină: <input type="checkbox"/> Necesari in aer liber: <input type="checkbox"/> Pod bigrină tip vârlă: <input type="checkbox"/> Necesari, nală inchisă: <input checked="" type="checkbox"/> Pod bigrină tip cascan: <input checked="" type="checkbox"/> Mediu marin: <input type="checkbox"/> Macara portal: <input type="checkbox"/> Cercetare chimica in aer: <input type="checkbox"/> Macara aspră: <input type="checkbox"/> Cercetare chimica in apă: <input type="checkbox"/> Alt tip: <input type="checkbox"/> Alt mediu: <input type="checkbox"/>	
CALE RUL.	Grinză met. inaltă plină: <input type="checkbox"/> Inaltimea celei ruli: 20 Grinză met. cu săbrele: <input type="checkbox"/> Lungimea celei rulare: 245 Grinză beton armată: <input checked="" type="checkbox"/> Nr. tălăje pe cale: 5 Longrina beton la sol: <input type="checkbox"/> Căle gine ruli: <input checked="" type="checkbox"/> Căi ruli denivelate: <input type="checkbox"/> Căle accesibile: <input checked="" type="checkbox"/> Altă structură: <input type="checkbox"/> Căle gine sudate: <input checked="" type="checkbox"/>	

PERIOADE DISTINCTE DE LUCRU	Nr. de luni	Nr. de zile	DISTRIBUȚIE A SARCINILOR (%)				
			1	2	3	4	5
1	3	90					
2	3	90					

2) INTRETINERE SI REPARATII EFECTUATE	SUBANS. UTILAJ		CALE RUL.
	Flac	Mec.	
Poarta rot (niciodată pe parcursul existenței sale) - funcționează corect. Numai când apar defecțiuni care opresc producția. Numai la terminale din direcțiile de rulare și cop. Mecuri, conform utilitatii nu este necesară. Alt caz: conform programului anual de revizii și reparatii în ocazia cadrelor occidentale Căle ruli, de rulare și coborâre în medie între un an. Căle flori a-au cunoscut la substații.	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

OBSERVAȚII:
 Calcularea rezervelor de vizită prezintă informații realiste.
 Într-o ocaz, rubricile se completează cu opțiune, cifre sau afirmativ [X].
 La restabilirea ierarchiei în ceea ce privește perioadele distincte de lucru, se va ține seama de schimbarea profilului fabricației, majorarea sau reducerea solicitărilor sau ale de sloca și a achiziției realului exploatării utilitatii.
 Conținutul pe versu evenimentelor deosebite considerate a fi importante pentru utilaj ca: tamponări, derocări, avarii grave, transferări de la ale noii etc.

Data: **21.03.1995**
 Responsabil: **[Signature]**
 Attestat: **[Signature]**

Fig IV-3

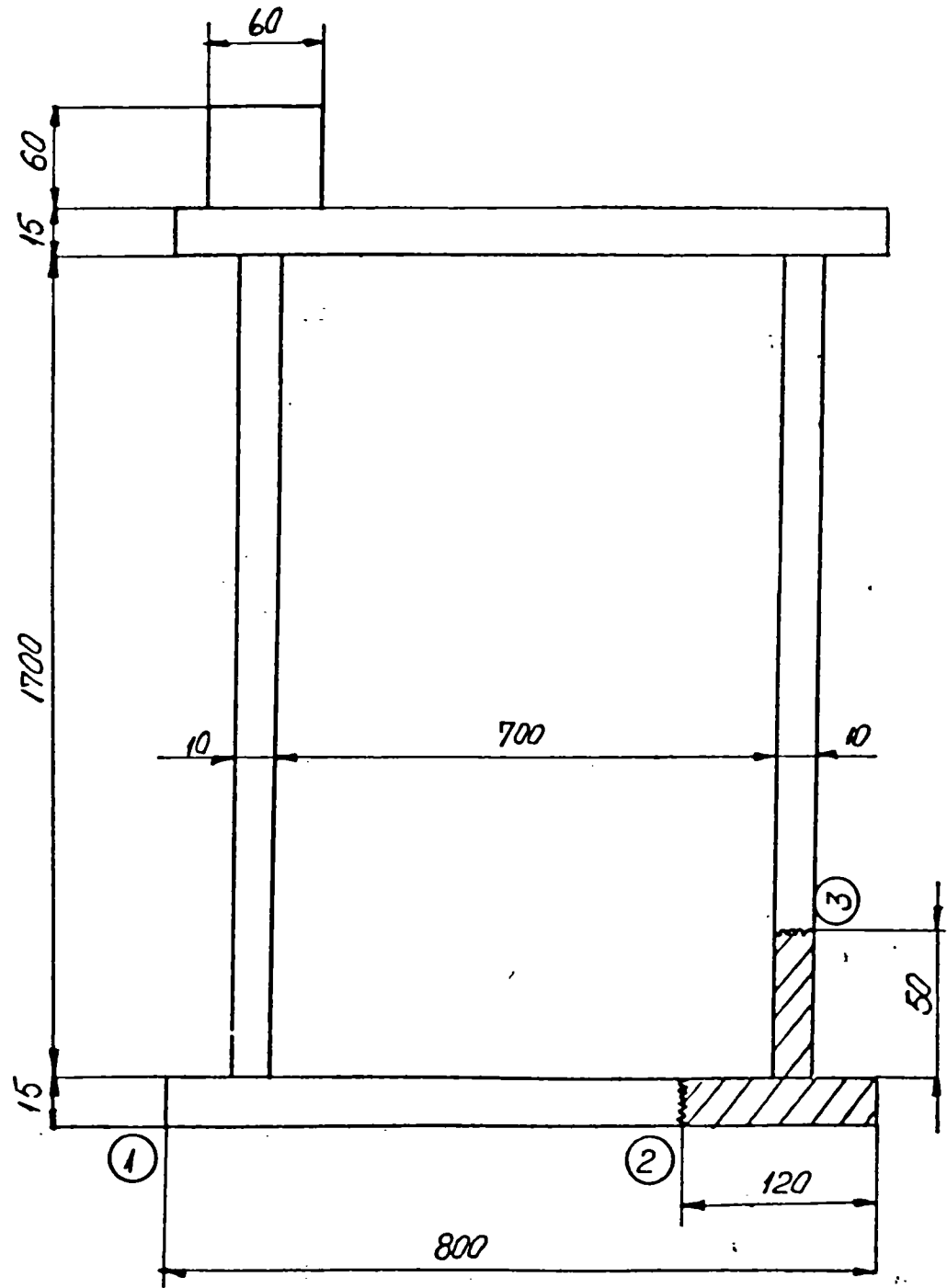


Fig. IV-4

IV.5 CONCLUZII

Așa cum rezultă din prezentarea de la cap. II, standardul [244], în vigoare actualmente în țară pentru verificarea la oboseală a SP nou-proiectate, nu are prevederi suficiente pentru evaluarea degradării rezultate din suportarea de către ER a unor cicluri de solicitare variabile în timp; de asemenea el nu are prevederi pentru calculul temperaturii minime peste care nu poate apărea ruperea fragilă. Ori aspectele semnalate-oboșeala și ruperea fragilă- sunt stări limită, care intervin primordial în calcularea duratei de viață. De aceea în metodologia Prompt SA, s-a apelat la EUROCODE 3 ENV - 1993 - 1 -1 [107], ale cărui prevederi au stat la baza procedurii de evaluare a duratei de viață a unui utilaj cu istoric real de încărcare.

Știut fiind că în [244] este aplicată metoda rezistențelor admisibile, s-a expus mai sus conceptul modern de siguranță pe care-l are [107]; stările limită-oboșeala și ruperea fragilă- sunt abordate în [107] prin metoda semiprobabilistă a stărilor limită (a coeficienților diferențiați), în care efectul încărcărilor și al caracteristicile de material sunt prinse mai bine în calcule, prin afectarea încărcărilor și a caracteristicilor de material de coeficienți aleși judicios, pe baze statistice

S-a subliniat că [107] - tratând problemele proiectării unei structuri noi, dar putând fi utilizat și pentru evaluări asupra utilajelor care au lucrat un anumit timp - este elaborat pornind la un înalt nivel de cunoștințe în domeniu, fiind inclus, în UE, în sistemul de standarde de calculul al SP. Competența elaboratorilor, recunoașterea [107] într-un spațiu economic și geografic extrem de larg, pledează pentru implementarea lui, care constituie o premisă de acces și de integrare pe piața acestui teritoriu.

Lucrările prezentate mai sus au demonstrat aplicabilitatea [107] pentru scopul evaluării duratei de viață a unui utilaj cu istoric de încărcare.

STUDII PRIVIND EXPERTIZAREA UTILAJELOR GRELE DESTINATE EXCAVĂRII SAU MANIPULĂRII CĂRBUNELUI

V.1 CONSIDERAȚII PRIVIND NECESITATEA EXPERTIZĂRII UTILAJELOR GRELE

Conform previziunilor specialiștilor, **rezervele de lignit** din zona exploatărilor miniere ale Olteniei, situate între Dunăre, Jiu și Carpații Meridionali, pot asigura o exploatare de lungă durată, estimările luând în considerare chiar anul 2025 [34]. Pentru exploatarea cărbunelui se practică tehnologii utilizatoare de "utilaje grele" (UG), în rândul cărora, ca utilaj de bază, se află, în număr mare, excavatoarele cu rotor (roată cu cupe). Ele sunt de diferite tipuri și vechimi (Krupp, TAKRAF, UM Timișoara). Vechimea, în foarte multe cazuri de peste 30 de ani, impune preocupare pentru asigurarea **funcționării în siguranță**. La nivel național circa o cincime din utilajele destinate excavării cărbunelui au durata de viață depășită, iar utilajele cu structură constructivă similară – mașinile pentru manipularea cărbunelui din gospodăriile de combustibil solid ale CET – circa o treime [34]. Funcționarea în siguranță și la o productivitate satisfăcătoare a acestor utilaje - complexe din punct de vedere constructiv, impunătoare prin gabarit (O asemenea imagine poate rezulta și din fig. VI.16, în care este schițată o vedere de ansamblu a excavatorului ERC 1400) și cu riscuri de pierdere a **stabilității** în anumite condiții - solicită, înainte de toate, o stare tehnică fără degradări a propriilor **structuri portante (SP)**. În conjunctura economică actuală, achiziționarea unor utilaje noi este de cele mai multe ori imposibilă. De aceea se impune **elaborarea unor principii metodologice de expertizare**, pentru ca prin procedurile aferente să se poată **evalua starea de degradare a elementelor componente ale SP**, în vederea luării unei decizii privind menținerea în funcționare a SP existente, în condiții de siguranță, peste durata de viață normată (A se vedea și cap.I). Studiile, printre care și [34] (Babeu, T.; Dumitru, I.; Babeu, S.; Marșavină, L.; Olariu, M., Analize și încercări de rezistență pentru evaluarea duratei de viață a utilajelor grele - Ed. Mirton, Timișoara, 1999), au demonstrat eficiența economică a unei asemenea întreprinderi.

V.2 METODOLOGII DE ESTIMARE A DURATEI DE VIAȚĂ A ELEMENTELOR DE REZISTENȚĂ

V.2.1 Activități specifice metodologiilor de expertizare

Vizându-se evidențierea siguranței în funcționare a SP, implicit securitatea personalului de exploatare, ținând seama, de asemenea, de complexitatea constructivă a SP și de faptul că, de regulă, ele au un apreciabil istoric de exploatare, în variate condiții de mediu, inclusiv de temperatură, prin lucrările de studii și cercetări s-au întocmit metodologii de lucru, descrise în continuare, după [34]. Se consideră necesar ca expertizarea să înceapă cu **nominalizarea utilajului**. În fig. V-1 sunt indicați factorii de care trebuie să se țină seama la inițierea analizei stării tehnice a unui utilaj cu termenul de exploatare expirat.

Nominalizarea trebuie să continue cu o minuțioasă **verificare experimentală a stării utilajului** (Fig.V-2). Pornind de la degradările care pot să apară după o perioadă lungă de funcționare, cum ar fi: uzura suprafețelor active, deformațiile remanente, jocuri într-o serie de îmbinări, degradări prin oboseală, coroziuni datorită mediului ambiant etc., utilajul trebuie să fie supus unei minuțioase analize experimentale. Se impun măsurări geometrice și analize a spectrelor de solicitare în diferite regimuri de lucru și pentru o serie de echipamente a căror stare a fost analizată odată cu nominalizarea utilajului. Evaluarea stărilor de tensiune are la bază utilizarea unor programe de calcul, iar analiza fiabilistică urmărește în principal stabilirea unei evaluări în vederea selectării elementelor critice care condiționează funcționarea corectă a sistemului.

Analiza complexă a utilajului obținută prin verificări experimentale permite în final stabilirea elementelor critice care, pe lângă controlul vizual sau prin metode nedistructive, impune și **cercetări de laborator ale caracteristicilor materialului** (Fig.V-3). În cadrul acestora un loc aparte revine studiilor de mecanica ruperii care pot furniza o serie de informații extrem de importante privind caracterul evolutiv a unor defecte de tipul fisurilor.

Aplicarea metodei degradărilor tolerate permite urmărirea unei structuri pe baza evoluției în timp a parametrilor de mecanica ruperii și compararea acestora cu valorile tenacității la rupere a materialului (Fig.V-4), [111].

Pe baza datelor obținute în urma nominalizării utilajului, a verificării experimentale și a analizelor de material se poate trece la **evaluarea nivelului de degradare**, aprecierea făcându-se aplicând:

- în ipoteza inexistenței fisurilor - una dintre teoriile de cumulare a degradărilor, iar
- în cazul existenței fisurilor - ecuațiile care corelează variația factorului de intensitate a tensiunii ΔK [$N/mm^{3/2}$], în funcție de viteza de propagare a acesteia da/dN [$mm/ciclu$] (Fig. V-5)

Dacă simularea pe calculator pe baza unor programe de calcul evidențiază propagarea fisurilor, se impune aplicarea unor tehnologii de reabilitare a elementului de rezistență și stabilirea în final a unor recomandări privind regimurile de exploatare ale utilajului.

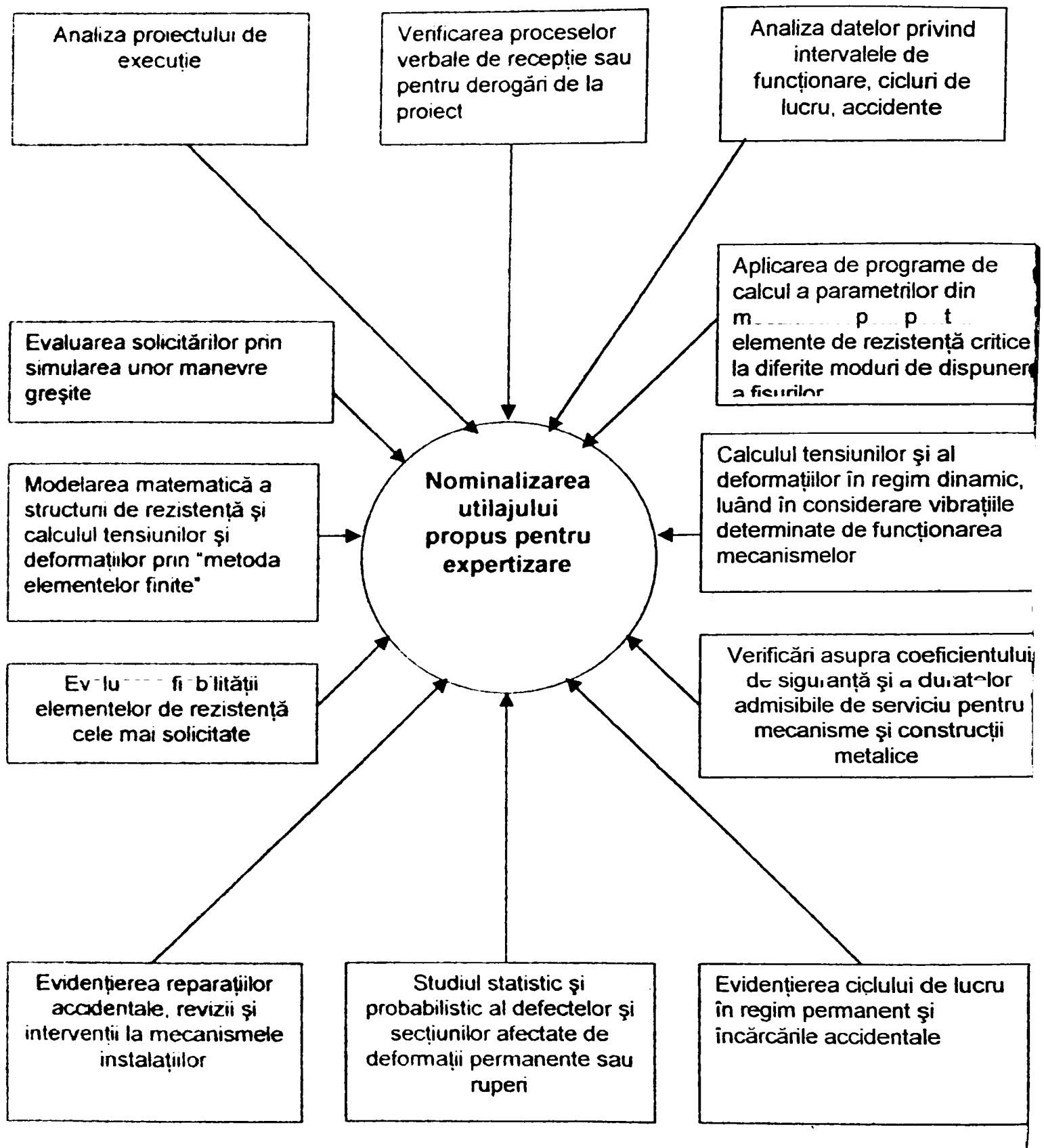


Fig. V - 1 [34]

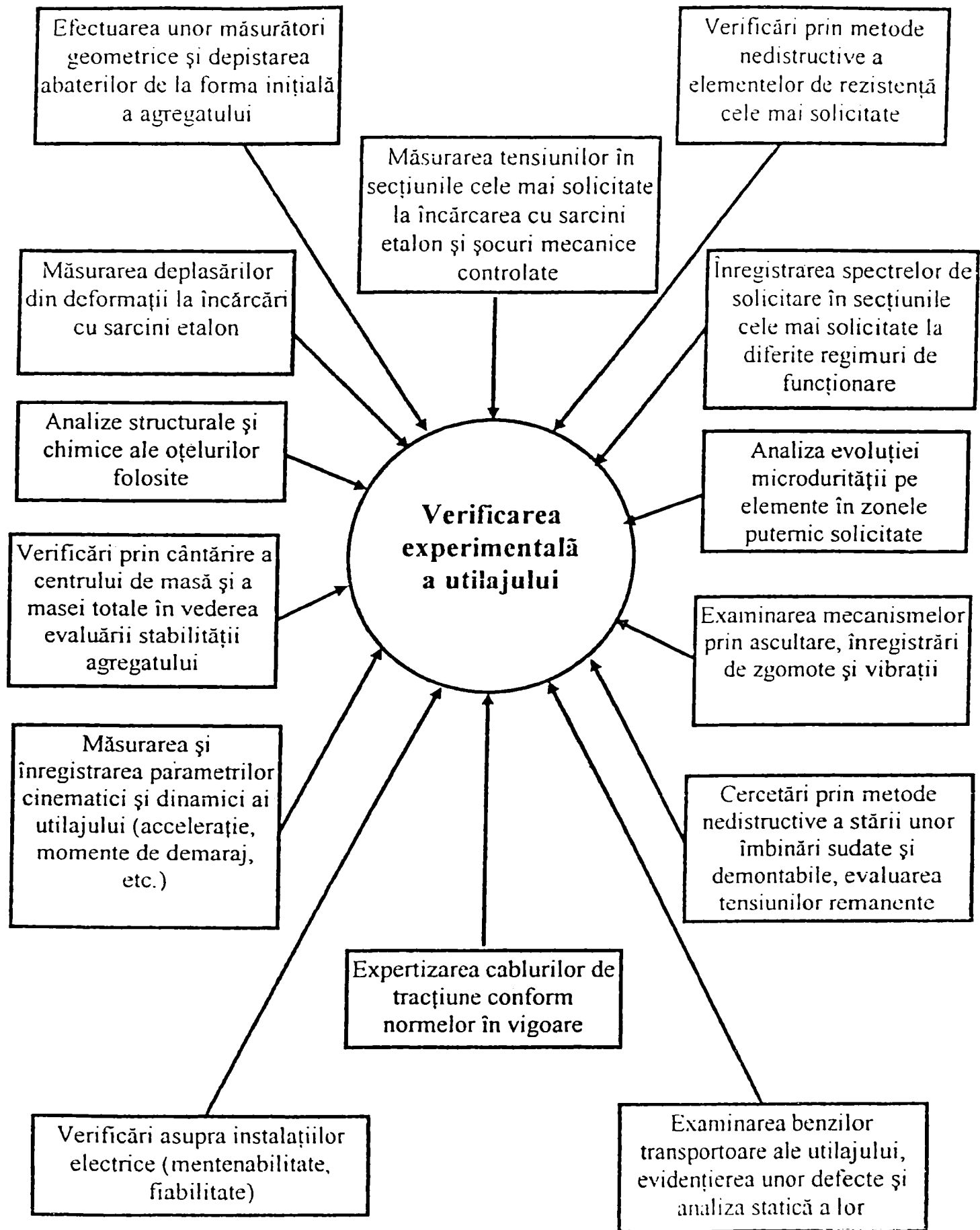


Fig. V- 2 [34]

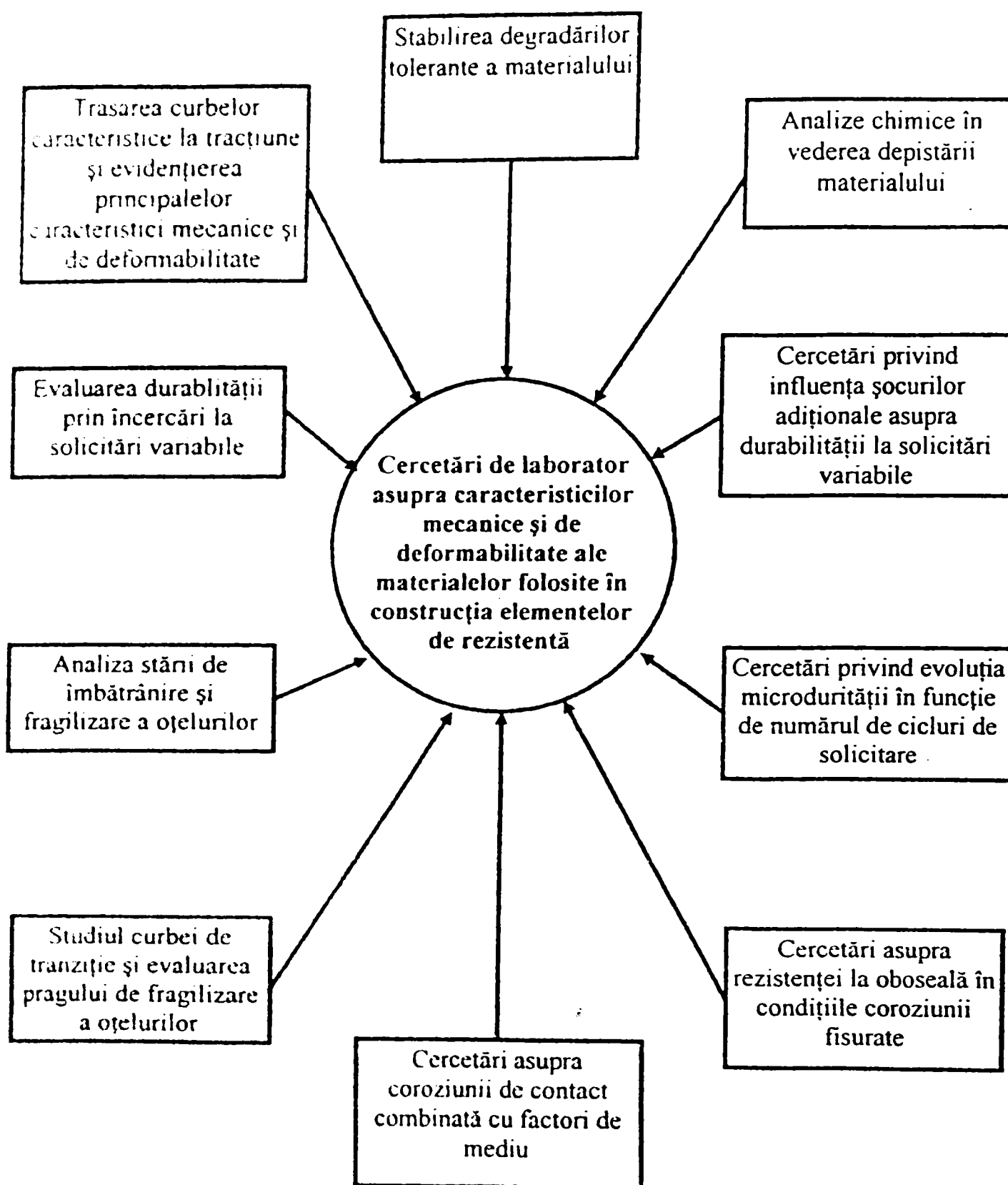


Fig. V- 3 [34]

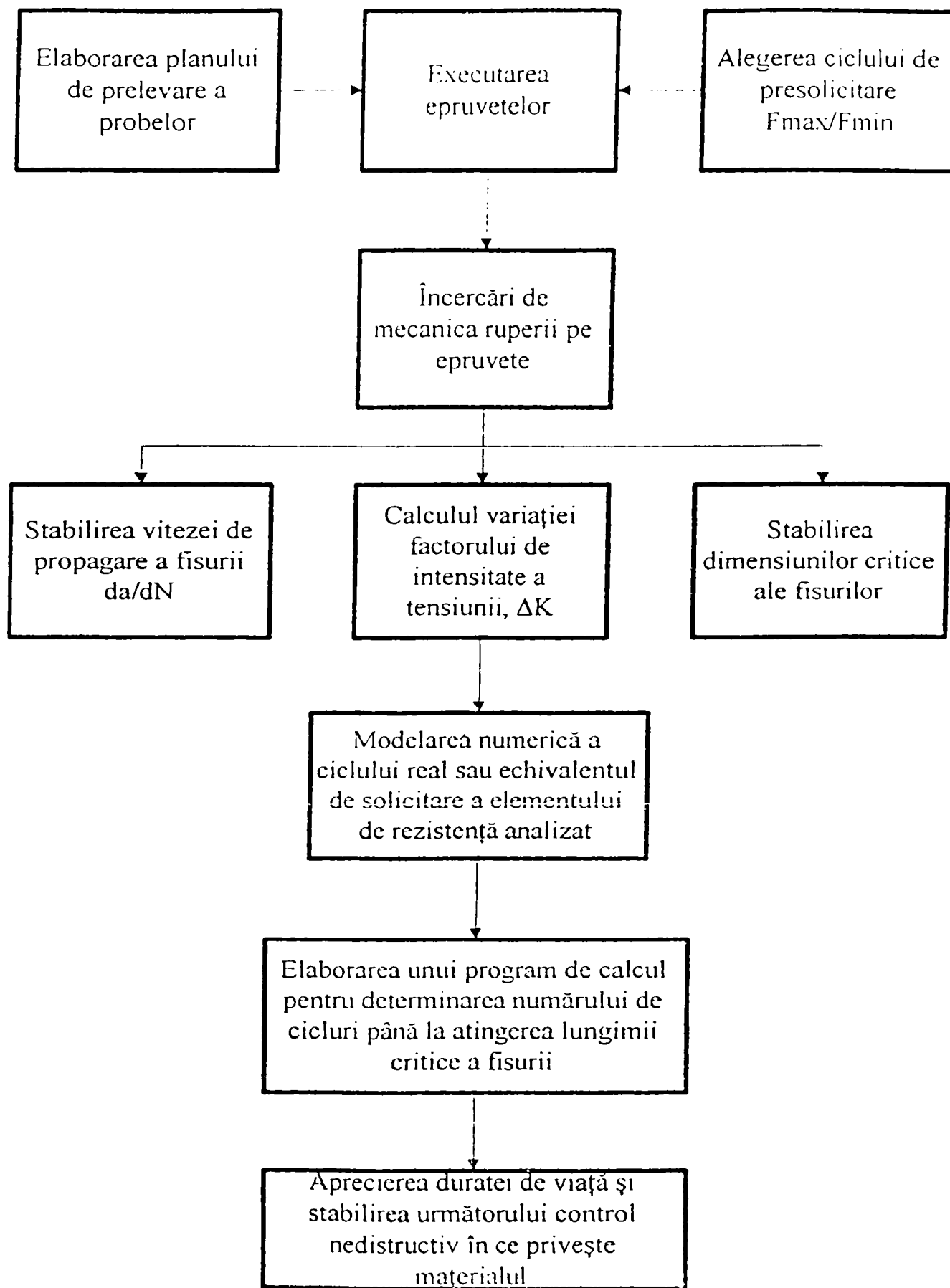


Fig. V- 4 [34]

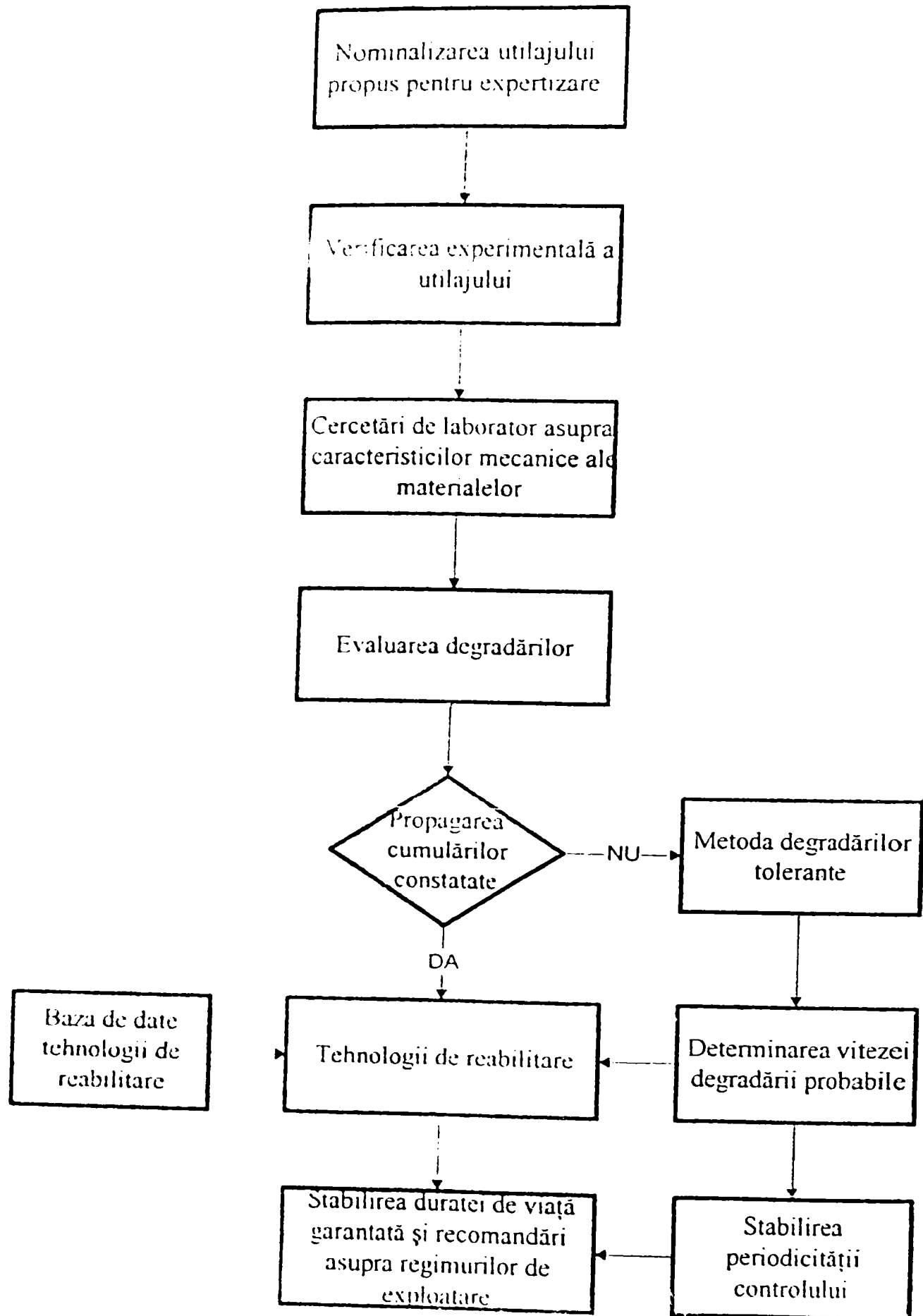


Fig. V- 5 [111]

V.2.2 Factorii care influențează sensibilitatea la fisurare și ruperea fragilă

Factorii care influențează sensibilitatea la fisurare și rupere fragilă a oțelurilor folosite în construcții sudate aflate în exploatare se pot grupa în:

- factori care depind de material, din categoria cărora fac parte caracteristicile fizico-mecanice și cele tehnologice: caracteristicile mecanice statice, rezistența la oboseală, reziliența KV etc.. Aceste mărimi caracterizează în mod convențional comportarea materialelor sub acțiunea sarcinilor și a factorilor de mediu. Trebuie avute în vedere și caracteristicile care apreciază comportarea elastică, elasto-plastică sau plastică, denumite caracteristici elastice și-sau plastice (modul de elasticitate, alungire specifică, contracție specifică, coeficientul lui Poisson etc.). La aceste caracteristici se mai adaugă și mărimile cu care se operează în mecanica ruperii.
- factori care depind de condițiile de lucru, de o importanță aparte fiind coroziunea fisurantă (intercristalină și transcristalină), coroziunea prin contact etc.

V.2.3 Stabilirea elementelor de rezistență (ER) care au solicitări maxime în serviciu; condițiile de debitare și refacere a ER analizat

V.2.3.1 Stabilirea ER cu solicitare maximă

Un prim argument tehnico-științific pentru decizia de a menține sau nu un utilaj în exploatare rezultă din compararea calităților materialului nesolicitat din care este construit ER și materialul solicitat în ansamblul aflat în exploatare. Analiza este acoperitoare dacă se cunosc tensiunile în cele mai solicitate componente ale ansamblului, deci în cele expuse cu prioritate ruperii, iar debitarea probelor se face dintr-un asemenea ER. Pe baza breviarului de calcul (calculului de rezistență), un colectiv (proiectanți, cercetători, cadre didactice) întocmește planul de amplasare a traductorilor tensiometrici rezistivi (TER) și un program de încărcare, conform regimului de lucru al ansamblului. În zonele complexe de solicitare sau la vârful fisurilor depistate se amplasează rozete pentru determinarea tensiunilor principale.

În subsidiar se va compara starea de deformație a ER din construcția calculată, cu aceea măsurată, pentru a urmări eventuale modificări de rigiditate a ER, în urma fisurării sau a slăbirii legăturilor dintre componente.

Încărcarea ansamblului trebuie făcută atent, cu sarcini amovibile, în trepte discrete, spre a se aprecia exact valoarea.

V.2.3.2 Debitarea probelor și refacerea ER din care se extrag probele

comisie tehnică, având obligatoriu ca membru un tehnolog sudor, stabilește programul de debitare a probelor și de refacere a locurilor de unde se scot, cu precauția că asemenea operațiune introduce temporar o discontinuitate geometrică.

Pentru a nu influența termic structura metalului, tăierea probelor se va face prin procedee mecanice

Din probe se fac analizele necesare de identificare a materialului ER.

V.3 ÎNCERCĂRI MECANICE DE MATERIAL PENTRU DETERMINAREA SENSIBILITĂȚII LA FISURARE ȘI LA RUPERE FRAGILĂ

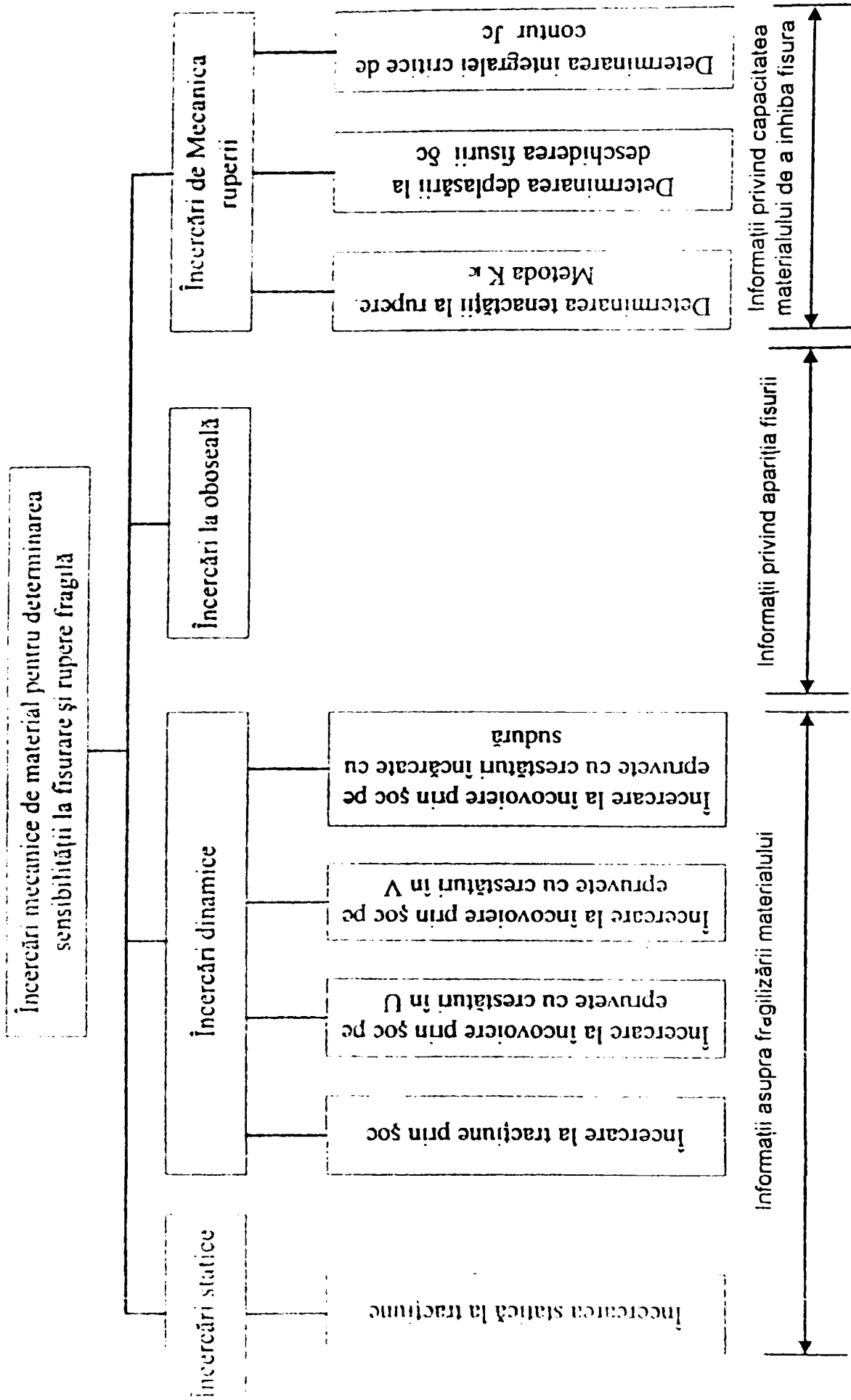
V.3.1 Clasificarea încercărilor mecanice de material

Pentru a evidenția tendința de fragilizare precum și capacitatea de inhibare a unor fisuri formate sunt necesare încercări pe probe de oțeluri debitate din elementele de rezistență cu maximum de solicitare în lucru cât și pe probe de oțel care nu au un istoric de solicitare.

Încercările mecanice de material (Fig.V-6) pot furniza informații asupra:

- -fragilizării materialului, prin:
 - încercări statice;
 - încercări dinamice);
- -capacității materialului de a inhiba o fisură formată, prin încercări de mecanica ruperii;
- stării de oboseală, prin încercări la oboseală.

După tabelul din fig. V-6 urmează descrierea încercărilor mecanice de material utilizabile la determinarea sensibilității la fisurare și la rupere fragilă



Observații

1. Toate încercările de mai sus se vor efectua la temperatura ambiantă cu excepția încercării de reziliență care se poate face și la $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$.
2. Aceste încercări sunt necesare pentru oțelul debitat din elemente de rezistență solicitat la maxim pe durata exploatarei cât și pentru oțelul virgin.

V.3.2 ÎNCERCĂRI STATICE

V.3.2.1 Încercarea la tracțiune

O primă apreciere a gradului de fragilizare poate rezulta din compararea curbelor caracteristice σ - ε pentru o probă debitată din elementul de rezistență analizat și o probă din material fără solicitări anterioare. Utilizând curba σ - ε , se poate calcula "tenacitatea statică", egală cu suprafața de sub curbă; astfel se definește lucrul mecanic necesar ruperii unității de volum.

$$\text{Tenacitatea statică} = K \int_0^{\varepsilon_m} \sigma \cdot d\varepsilon \quad (\text{V.1})$$

Trebuie remarcat că această mărime înglobează atât rezistența cât și ductibilitatea materialului. Având curbe σ - ε pentru materialul solicitat și pentru cel fără solicitări, pot fi observate și alte aspecte (modificarea rezistenței la rupere, a limitei de curgere, alungirea la rupere, gâtuirea la rupere).

În cazul ER care prezintă deformații plastice cu precădere într-o anumită direcție, trebuie să se țină seama de proprietățile preferențiale pe anumite direcții, ca urmare a anizotropiei cauzate de deformații.

V.3.3 ÎNCERCĂRI DINAMICE

V.3.3.1 Încercarea la tracțiune dinamică

Cunoașterea comportării sub solicitări dinamice este importantă atât la alegerea materialelor cât și la aprecierea tendinței de fragilizare. Încercarea nu a căpătat aceeași dezvoltare ca încercarea de încovoiere prin șoc din cauza necesității de instalații speciale. În laboratorul de rezistența materialelor al Universității "Politehnica" Timișoara s-a pus la punct o metodă și o instalație cu patru viteze de deformație. Încercările, cu determinarea energiei de rupere și a forțelor maxime, conduc la concluzii privind fragilizarea în condițiile creșterii vitezei de deformație, specifică condițiilor de lucru ale structurilor analizate.

V.3.3.2 Încercarea la încovoiere prin șoc, pe epruvete cu creștătură în U

Numeroase cercetări experimentale au arătat că tenacitatea statică nu este totdeauna un parametru capabil să caracterizeze siguranța în funcționare a unei SP,

încercări dinamice, la încovoiere pe probe cu creștături. Astfel, dacă tranziția ductil-fragil determinată prin încercări la tracțiune se află la temperaturi relativ scăzute, la încercările de față tranziția ductil-fragil are loc la temperaturi mai ridicate, mai apropiate de cele constatate pe SP care au prezentat ruperi în serviciu.

Deși aceste încercări pierd teren, nemaifiind incluse într-o serie de standarde noi, în condițiile expertizărilor ele sunt necesare.

Trebuie semnalat că:

- creștătura în V evidențiază capacitatea materialului de a opri propagarea unei fisuri amorșate prin vârful ascuțit al creștăturii, iar
- creștătura în U caracterizează capacitatea de evitare a inițierii unei fisuri.

Cele două tipuri de creștături, U și V, se completează în urmărirea și aprecierea tenacității materialelor.

V.3.3.3 Încercarea la încovoiere prin șoc, pe epruvete cu creștătură în V ([34],[242], [224])

A căpătat extindere, întrucât prezența de creștături ascuțite permite punerea în corespondență a energiei consumată pentru rupere cu unele mărimi specifice din mecanica ruperii (K_{Ic} , J_c). (A se vedea figura V-7)

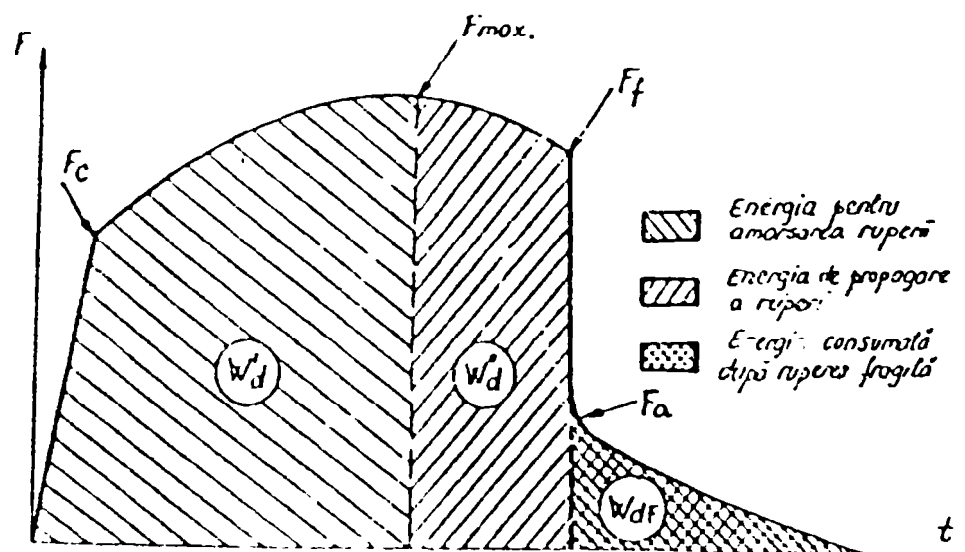


Fig. V - 7 [34] Aspect tipic al unei diagrame forță-timp, înregistrată la rupere printr-un singur șoc

Se observă o creștere cvasi-elastică a forței până la valoarea F_c , care corespunde curgerii generale. Extinderea deformațiilor plastice și amorsarea ductilă a ruperii la baza concentratorului sunt însoțite de o variație lentă a forței, care atinge un maxim, F_{max} . Apoi concentrarea locală a tensiunilor determină o schimbare a modului de rupere, astfel încât la o forță F_f se amorsează ruperea fragilă. La atingerea forței F_a , ruperea capătă din nou caracter ductil. Se vede că energia totală W_d este formată din W'_d - energie de amorsare a ruperii, și W''_d - energie pentru propagarea ruperii.

Interes deosebit prezintă încercările pe epruvete Charpy V executate la temperaturi scăzute.

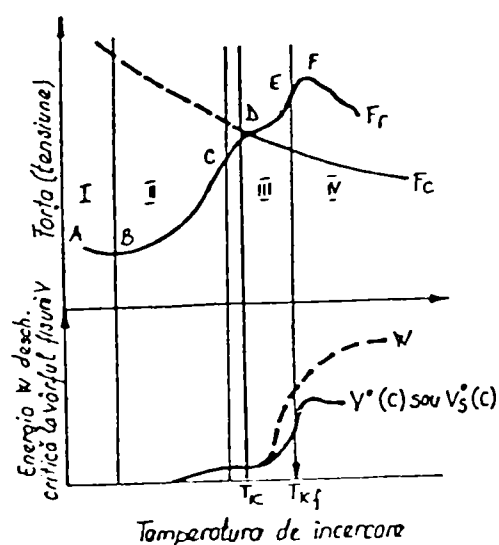


Fig. V- 8 [34] Variația forțelor la rupere, F_r , și la curgere, F_c , a energiei W și a deschiderii creștăturii V , în funcție de temperatură

Pe diagrama figurii 0-8 se remarcă ruperi cu deformații plastice:

- puternic localizate (A-B);
- restrânse (B-C);
- restrânse, cu deformarea zonelor ecruisate (C-D-E);
- în domeniul tenacității ridicate (E-F).

În domeniul (A-B) criteriul de rupere are la bază coeficientul de concentrare a tensiunilor, în ultimul domeniu criteriul de rupere are la bază deschiderea la vârful fisurii. Pe lângă energia consumată pentru rupere, tranziția ductil-fragil mai poate fi urmărită după aspectul ruperii, adică după raportul dintre suprafața cu structură

fibroasă și cea cu structura cristalină, sau după contracția la baza creștăturii. (Fig.V-9)

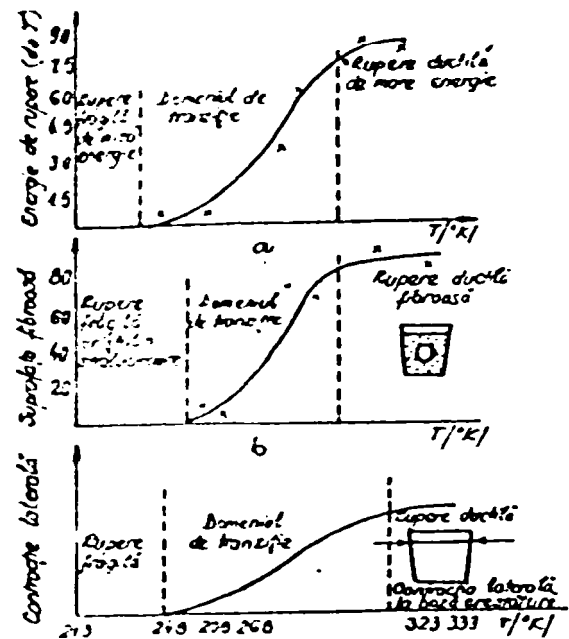


Fig. V- 9 [34] Tranziția ductil-fragil la un oțel moale (0,18%C, 0,56%Mn, 0,07% Si)

Studiul în intervalul de temperatură $+20^{\circ}\text{C}$ și -20°C , pe materialul solicitat și pe cel nesolicitat, evidențiază dacă în interval apare zona de tranziție sau dacă aceasta s-a deplasat.

Rolfe S.T. a obținut o relație empirică între energia la rupere pe epruvete cu creștătura în V, limita de curgere statică și tenacitatea la rupere K_{IC} pentru oțelul A517-F[35].

În ultimul timp au căpătat o largă extindere studiile asupra sensibilității la fisurare, folosind epruvete asemănătoare cu cele Charpy, dar prevăzute cu fisuri de oboseală. Astfel Hartbower a stabilit că viteza de fisurare poate fi evidențiată prin încercări statice și dinamice pe epruvete Charpy V cu fisuri de oboseală [62]. Cercetările experimentale efectuate de Hartbower pe aliajul Ti-5Al-6V au evidențiat că factorul de intensitate al tensiunii K_C poate fi corelat cu energia la rupere W a epruvetei cu fisură de oboseală, prin relația:

$$K_C = 100W + 23,6 \text{ Kg}/\text{mm}^{3/2}$$

Barson și Rolfe, pe baza încercărilor statice și dinamice ale epruvetelor Charpy V cu fisură de oboseală, au studiat tranziția ductil-fragil pentru o serie de oțeluri aliate [35]. În [34] este indicată corelația dintre $(K_{IC}/\sigma_C)^2$ și raportul CVN/σ_C , obținută de Barson și Rolfe, la încercări efectuate în vid și în aer.

σ_C – rezistența la limita de curgere;

CVN –energia la rupere la încovoiere prin șoc a epruvetei Charpy V cu fisură de oboseală.

Tot în [34], tab. 3.1, sunt indicate și alte corelații între aceste mărimi, stabilite de Roberts și Newton [35].

V.3.3.4 Încercarea la încovoiere prin șoc, pe epruvete încărcate cu sudură

Face parte din grupa *încercărilor de propagare a ruperii*, spre deosebire de încercările la încovoiere prin șoc pe epruvete crestate (reziliența), care pot evidenția atât amorsarea cât și propagarea ruperii.

Declanșarea ruperii se realizează cu ajutorul unei depuneri sudate de material fragil, care se fisurează la încovoierea epruvetei. Corespunzător grosimii produsului încercat, se folosește una din cele trei dimensiuni de epruvete indicate în [245], tabel 6, .

Sarcina de încovoiere se aplică în zona mediană, opusă sudurii, prin șocul unei greutăți care cade liber. Încercarea la diferite temperaturi permite determinarea pentru un material dat a celei mai ridicate temperaturi la care se produce ruperea, numită **temperatura de tranziție la capacitatea de deformare nulă - NDT** (Nil Ductility Transmision Temperature.)

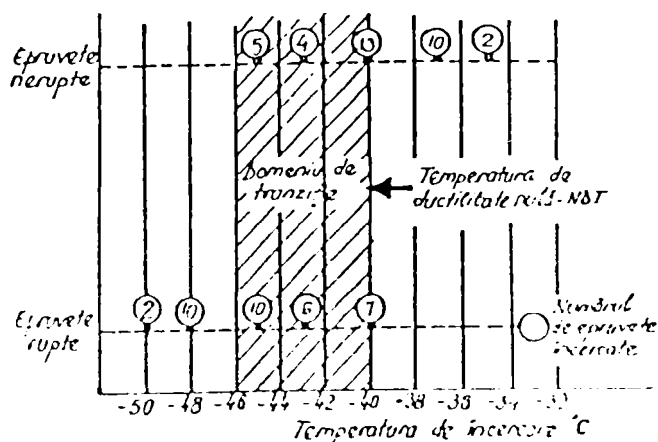


Fig. V-10

Se observă din figura V-10 că NDT este cunoscută cu o precizie mai ridicată decât temperatura de tranziție. Este minată în încercările la șoc pe epruvete crestate în V. Dacă, o asemenea încercare se înregistrează diagrama forță-deplasare, posibilitățile de interpretare a rezultatelor se extind, putând fi calculată și tenacitatea dinamică K_{ID} .

V.3.4 ÎNCERCĂRI DE MECANICA RUPERII

V.3.4.1 Determinarea tenacității la rupere în condițiile stării plane de deformare; metoda K_{IC}

Această încercare este standardizată prin STAS 9760-84[246].

Scopul încercării este determinarea valorii critice a factorului de intensitate a tensiunii, numit aici **tenacitate la rupere** (notată K_{IC}), în condițiile stării plane de deformare și deplasarea flancurilor fisurii după modul I. (Ase vedea cap.II). Ea este aplicabilă metalelor, aliajelor și îmbinărilor sudate, în domeniul de temperatură cuprins între

-196°C și +100°C

Principiul încercării constă în aplicarea lentă, continuă, progresivă și fără șocuri a unei solicitări de tracțiune sau încovoiere, asupra unei epruvete, în care s-a propagat o fisură printr-o solicitare de oboseală.

Tenacitatea la rupere K_{IC} se calculează pe baza înregistrării forță – deplasare, obținută în timpul încercării.

Epruvetele pot fi de tracțiune sau de încovoiere, fig.V-11 și fig. V-12 ; ele au o creștătură, ce are în prelungire o fisură propagată prin oboseală.

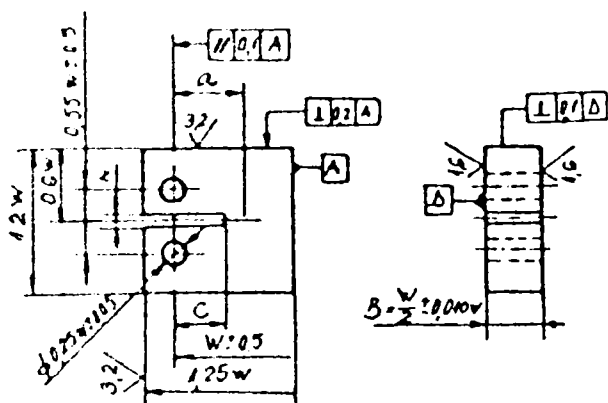


Fig. V- 11 [246] Forma epruvetei pentru încercarea de tracțiune

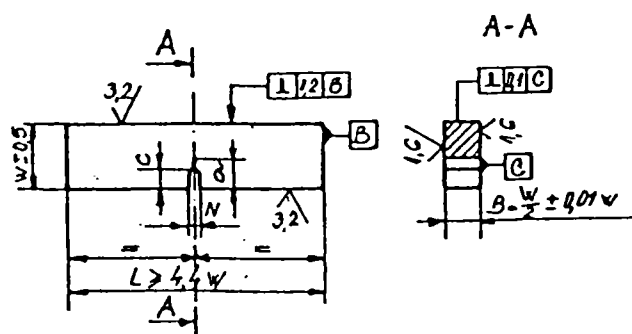


Fig. V- 12 [246] Forma epruvetei pentru încercarea de încovoiere

În [246] se prezintă dimensiunile epruvetelor relația între grosimea lor și lungimea fisurii, "a".

Tratamentele termice se aplică înainte de prelucrările de fisurare a epruvetelor.

Fisura în prelungirea creștăturii epruvetelor se propagă pe mașini de încercat la solicitări variabile sinusoidale axiale sau de încovoiere, [243]. În [246] se impun condiții pentru forța de solicitare, amplitudine, lungimea fisurii, corecții de temperatură.

Aparatură

Mașina de încercat trebuie să îndeplinească condițiile din [233].

Măsurarea forței și a deplasării la deschidere a fisurii se face printr-o înregistrare continuă, înregistrându-se semnalul de la traductorul de forță, în funcție de semnalul traductorului de deplasare.

În [246] STAS 9760-84 sunt prevăzute condiții tehnice privind montarea traductoarelor.

Executarea încercării

Pentru solicitare la tracțiune, amplasarea epruvetelor se face conform fig. V-13, iar pentru încovoiere - ca în fig. V-14.

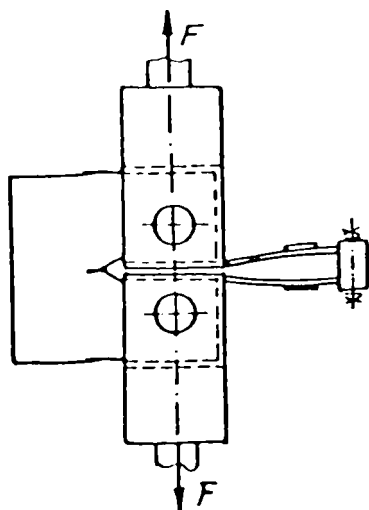


Fig. V- 13 [34]

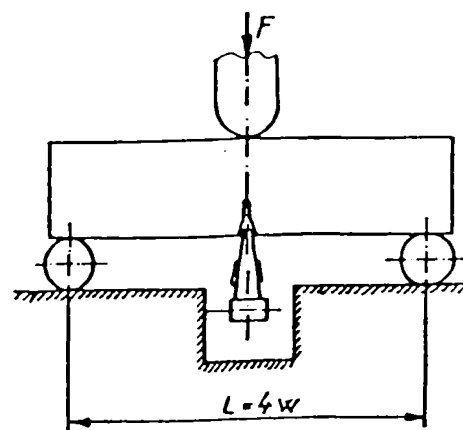


Fig. V- 14 [34]

Aplicarea sarcinii se face lent, continuu, progresiv și fără șocuri, astfel încât viteza de variație a factorului de intensitate a tensiunii $dK_I/dt = [0,55 - 2,75] \text{ N}/(\text{mm}^{3/2} \cdot \text{s})$.

Se recomandă ca la fiecare nivel de temperatură de încercare să se execute trei determinări ale factorului critic de intensitate a tensiunii.

Înregistrarea semnalelor electrice provenite de la traductoare de forță și de deplasare, se face prin intermediul unui înregistrator după două axe rectangulare sau prin achiziție de date pe calculator.

Înregistrarea rezultatelor

Înregistrarea forță – deplasare, obținută în timpul încercării, poate avea una din formele din figura V-15. Aprecierea rezultatelor încercării pentru determinarea tenacității la rupere K_{IC} , constă în determinarea valorii tenacității la rupere calculată K_Q , pe baza înregistrării forță – deplasare. Valoarea lui K_Q se determină pe baza forței critice F_Q , care se obține astfel: se trasează o secantă OP având panta cu 5% mai mică decât panta porțiunii inițiale a înregistrării forță-deplasare (OA). Forța ce corespunde intersecției secantei OP cu curba înregistrată se notează F_5 . Dacă înregistrarea forță – deplasare este de tipul I (Fig. V-15), adică toate valorile forței ce preced pe F_5 sunt mai mici, atunci se consideră $F_Q = F_5$. Dacă se înregistrează un maxim al forței ce precede forța F_5 (înregistrări de tipul II și III în fig. V-15), atunci valoarea forței de calcul F_Q se adoptă egală cu valoarea forței maxime, din înregistrare, ce precede pe F_5 .

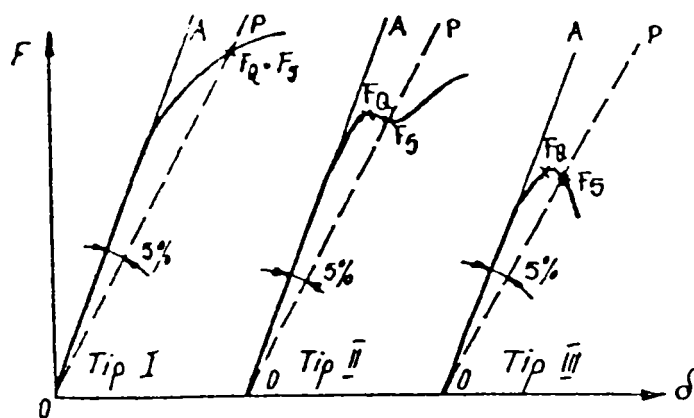


Fig. V- 15 [34]

Nelinaritățile ce apar pe porțiunea inițială a înregistrării, datorită așezării traductorului de deplasare, se neglijează.

K_Q se determină cu următoarele relații:

- pentru epruveta sollicitată la tracțiune:

$$K_Q = F_Q \frac{f\left(\frac{a}{W}\right)}{B \times W^{\frac{1}{2}}} \quad (\text{V.2})$$

unde $f\left(\frac{a}{W}\right)$, conform [246];

- pentru epruveta sollicitată la încovoiere:

$$K_Q = \frac{1}{10} \sqrt{10 F_Q \frac{L}{B W^{\frac{3}{2}}}} f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (\text{V.3})$$

unde $f\left(\frac{a}{W}\right)$, conform [246].

După calculul valorii K_Q , se verifică dacă:

$$a, B \geq 2,5 \left(\frac{K_Q}{R_{p0,2}} \right)^2 \quad (\text{V.4})$$

În cazul respectării condiției (V.4), valoarea K_{IC} se consideră ca fiind egală cu cea a K_Q , deci:

$$K_{IC} = K_Q \quad (\text{V.5})$$

Dacă nu se respectă condiția (V.4), încercarea trebuie reluată pe epruvete de dimensiuni mai mari, care să respecte condițiile stării plane de deformație.

În final se poate stabili și caracterul ruperii, după aspectul suprafeței de rupere a epruvetelor; în fig. V-16.c ruperea se realizează prinalunecare 100%, iar în fig.V-16.d nu apare deloc alunecare.

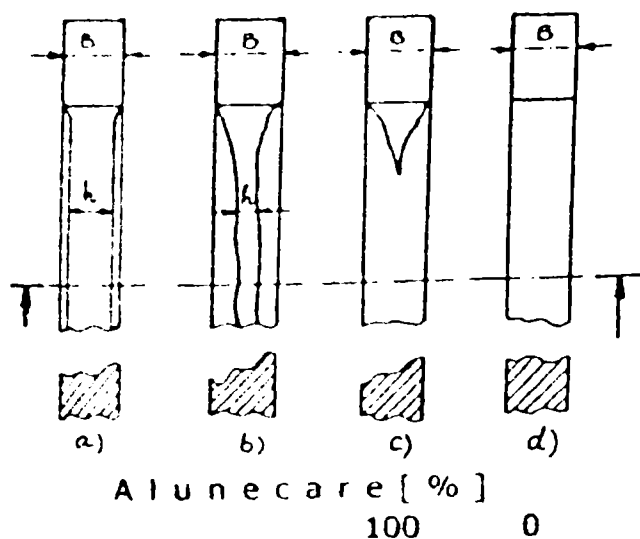


Fig. V- 16 [34] Aspecte tipice ale ruperii

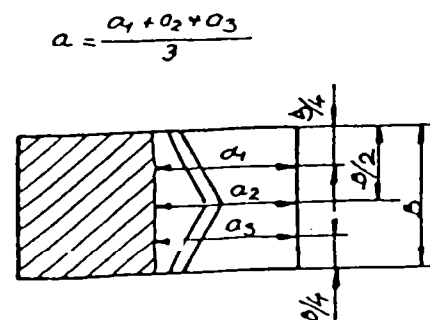


Fig. V- 17 [34] Măsurarea lungimii "a" a fisurii

În cazurile intermediare, adică fig. V-16.a și V-16.b, procentajul de rupere prin alunecare se calculează cu relația: $100(B-h)/E$,

unde "h"- înălțimea măsurată la jumătatea distanței dintre vârful fisurii și muchia opusă a epruvetei.

Măsurarea lungimii "a" a fisurii se face conform figurii V-17.

Validarea rezultatelor încercării

Numai respectându-se toate condițiile impuse se poate aprecia valoarea tenacității la rupere K_{IC} ca o caracteristică a materialului. Dacă în orice fază a încercării una din condițiile de validare nu este satisfăcută, încercarea se întrerupe.

Condițiile de validare trebuie să respecte următoarea ordine:

- Înainte de propagarea prin oboseală a fisurii se verifică dimensiunile și toleranțele epruvetei.
- După propagarea prin oboseală a fisurii se verifică condițiile de lungime a fisurii propagate:

$$a = [0,45 - 0,55] W \text{ și } a \geq 1,25 \text{ mm}$$

- După efectuarea încercării se verifică dacă:

a) epruvetele îndeplinesc următoarele condiții:

- diferența dintre două măsurători ale lungimii fisurii, independente de locul de măsurare este mai mică de 2,5 W%;
- frontul fisurii este mai îndepărtat cu maximum 2,5 W% sau cu 1,25 mm față de muchia creștăturii prelucrate, în orice punct de măsurare;
- orice porțiune a suprafeței fisurii are o înclinație mai mică de 10° față de planul creștăturii prelucrate;
- fisura nu este ramificată.

b) înclinarea porțiunii inițiale a înregistrării forță –deplasare este cuprinsă între 40° - 60°;

c) este îndeplinită condiția de liniaritate a diagramei în punctul de evaluare a forței F_Q , calculând raportul $F_M/F_Q \leq 1,10$, unde F_M este forța maximă a înregistrării din timpul încercării statice a epruvetei până la rupere;

d) factorul de intensitate maximă a tensiunii la propagarea fisurii prin oboseala K_f verifică relațiile impuse în [246];

e) se respectă condiția (V.4).

După unii autori, în cazul în care nu se îndeplinește condiția (V.4), tenacitatea la rupere se notează K_C și se numește tenacitatea la rupere în cazul nerespectării condițiilor plane de deformație.

În [246] sunt înscrise prevederi și pentru alte tipuri de epruvete (C și D)

Limitări, dezavantaje, ale metodei K_{IC} :

- nu se poate aplica materialelor cu comportare elasto-plastică;
- are un cost ridicat, deoarece condițiile stării plane de deformație impun epruvete de dimensiuni mari, iar realizarea prefisurării prin oboseală ridică suplimentar costul încercării.

Aceste dezavantaje pot fi înlăturate prin folosirea epruvetelor cu creștătură Chevron.

După efectuarea încercării se poate întâmpla ca valoarea obținută să nu poată fi validată, necesitându-se reluarea încercării cu epruvete de dimensiuni mai mari, fapt care în unele cazuri nu este realizabil. În aceste cazuri standardul american ASTM E 922-84 [18] recomandă folosirea înregistrării forță – deplasare obținută la metoda K_{Ic} și aprecierea tenacității la rupere pe baza energiei echivalente, notând factorul critic de intensitate a tensiunii astfel determinat K_{EE} .

V.3.4.2 Determinarea deplasării la deschiderea fisurii, pe baza înregistrării forță-deplasare

Reglementare: [248], care se ocupă de determinarea deplasării critice la deschiderea fisurii, δ_c .

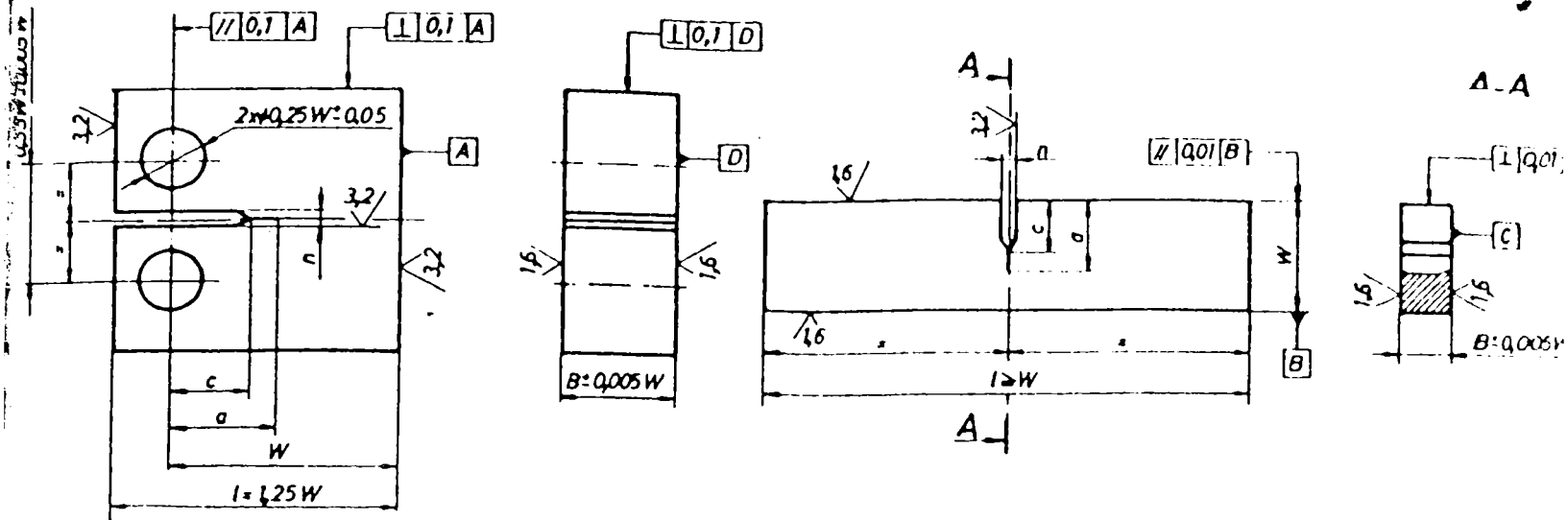
Scopul încercării: determinarea caracteristicii de deplasare la deschiderea fisurii (COD - crack opening displacement), pe epruvete conținând creștături care au în prelungire fisuri propagate prin oboseală.

Domeniu de aplicare: încercarea se execută în intervalul de temperaturi de la - 196°C la +100°C, produselor cu grosimi mai mari sau egale cu 10 mm, la care nu se îndeplinesc condițiile de determinare a tenacității la rupere K_{Ic} în condițiile stării plane de deformare, conform [246].

Principiul încercării: aplicarea lentă, continuă, progresivă, până la rupere, a unei solicitări de întindere sau încovoiere asupra unei epruvete cu concentrator de tensiune de forma unei creștături de la care s-a propagat, prin solicitări de oboseală, o fisură de o anumită lungime. În timpul încercării se înregistrează continuu diagrama de variație a sarcinii aplicate, în funcție de deschiderea muchiilor creștăturii. Apoi se calculează deplasarea critică la deschiderea fisurii, pe baza valorilor înregistrate ale deschiderii muchiilor creștăturii.

Epruvete

În STAS [248] sunt stabilite 2 tipuri de epruvete: solicitate la tracțiune excentrică (Fig. V-18) sau la încovoiere în 3 puncte (Fig.V-19). Grosimea epruvetelor trebuie să fie cât mai apropiată de grosimea produsului.



V- 18 [34] Epruvetă pentru încercarea de tracțiune

Fig. V- 19 [34] [248] Epruvetă pentru încercarea de încovoiere

Modurile recomandate de prelevare și prelucrare a epruvetelor sunt prezentate în [248].

Se recomandă folosirea epruvetelor de secțiune pătrată solicitate la încovoiere. Forma și dimensiunile acestora precum și profilul creștăturii sunt arătate în Figura V-20. Pentru epruvete cu latura secțiunii $W < 10$ mm, se recomandă creștătură ca în fig. V-20a, la cele cu $10 \leq W < 25$ - creștătura din fig. V-20b, iar dacă $W \geq 25$ mm - forma din fig. V-20c.

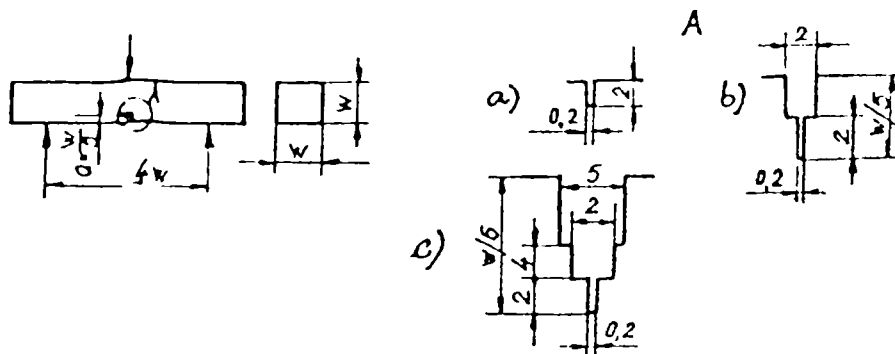


Fig. V- 20 [34]

Aparatură

Încercarea se face pe o mașină de încercat, clasa de precizie 1, [233].

Fisura din prelungirea creștăturii se propagă pe mașini de încercat la solicitări ciclice axiale sau la încovoiere, conform [243].

În STAS [248] se impun condiții pentru forța de solicitare, amplitudine, lungimea fisurii.

Măsurarea, înregistrarea forței și a deschiderii muchiilor creștăturii se realizează cu traductori de forță, respectiv de deplasare și cu un înregistrator X – Y, similar ca la încercarea K_{Ic} . Pentru încercarea de încovoiere se recomandă traductorul de deplasare din fig. V-21.

Traductorul de deplasare trebuie să înregistreze integral deschiderea muchiilor creștăturii epruvetei.

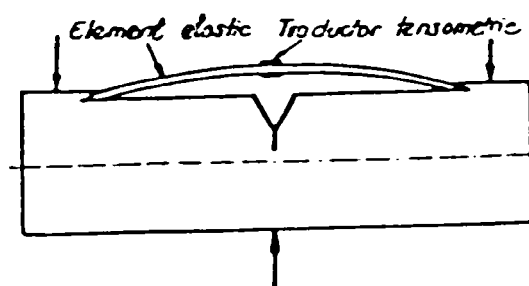


Fig. V- 21 [34]

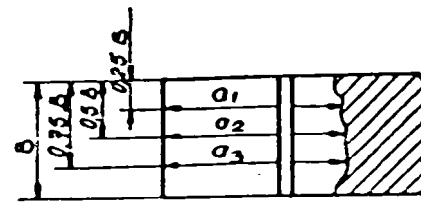


Fig. V- 22 [34]

Aplicarea sarcinii se face ca la încercarea K_{Ic} , pentru solicitarea la tracțiune - cu ajutorul a două piese intermediare și bolțuri, conf. fig. V-13, iar la solicitarea la încovoiere - conform fig. V-14.

Executarea încercării

Încercare se execută la temperatura de lucru a produsului.

Aplicarea forței se face lent, continuu și progresiv, până la ruperea epruvetei, astfel încât viteza de variație a factorului de intensitate a tensiunii în cursul încercării să fie de:

$$dK / dt = 16 \dots 37 \text{ [N/mm}^{3/2} \text{ s]} \text{ ([0.50 \dots 2,75 Mpa mm}^{1/2} \text{ s])}$$

Se înregistrează grafic semnalele electrice ale traductorilor de forță și de deplasare, obținându-se diagramele forță aplicată – deschiderea muchiilor creștăturii (F-Δ) .

Panta porțiunii principale a acestor diagrame, în raport cu axa A, trebuie să fie de 45...35°

După ruperea epruvetei, se măsoară lungimea fisurii de oboseală, măsurând valorile a_1, a_2, a_3 ale lungimii fisurii, în trei poziții dispuse echidistant pe suprafața de rupere, conform fig.V-22 . În calculul deplasării la deschidere a fisurii se utilizează media aritmetică

$$a = (a_1+a_2+a_3)/3$$

Aprecierea rezultatelor încercării

Cele mai întâlnite forme ale înregistrării forță – deschiderea muchiilor crestăturii (F- Δ) sunt ilustrate în fig. V-23 .

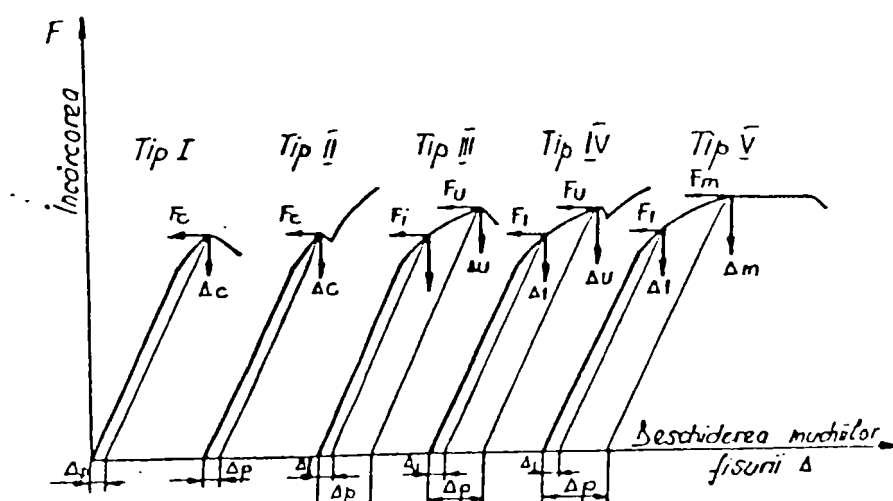


Fig. V- 23 [34]

Înregistrările de **tipul I** corespund unei propagări instabile a fisurii, fără apariția unei creșteri lente, stabile, a fisurii. Se determină grafic valoarea Δ_p , corespunzătoare valorii critice a deschiderii și Δ_c - valoarea corespunzătoare forței critice F_c .

Tipul II de înregistrare corespunde amorsării unei fisuri a cărei propagare ulterioară a fost blocată. Amorsarea este însoțită de un proces de eliberare de energie în epruvetă, fără a se evidenția o creștere lentă, stabilă a fisurii inițiale. Valoarea deschiderii fisurii corespunzătoare primei scăderi a forței se consideră valoarea critică și se notează Δ_c .

Pentru înregistrările de tip III, IV, și V, propagarea instabilă a fisurii sau amorsarea propagării fisurii sunt precedate de o creștere lentă, stabilă, a fisurii. Drept valoare a deschiderii muchiilor crestăturii corespunzătoare amorsării propagării instabile (rapide) din diagrama de tip III se adoptă valoarea deschiderii ultime Δ_u , pentru

diagrama de tip IV se adoptă valoarea primei scăderi a valorii forței după creșterea lentă. Cu valorile Δ_u se determină grafic valoarea deschiderii Δ_p , respectiv forța F_1 . Din înregistrarea de tip V, valoarea deschiderii Δ_m corespunde atingerii forței maxime F_m la palier.

Pentru aprecierea rezultatelor, și în acest caz trebuie făcută convertirea deplasării critice Δ_c în deplasare critică la deschidere a fisurii δ_c ; aceasta se poate determina conform [248] sau standardelor engleze BS 5762-1979 [67], BS 7488-1991[68], ținând cont că deplasarea la deschidere a fisurii are două componente: una elastică δ_e și una plastică δ_p , conform fig.V-24

$$\delta = \delta_e + \delta_p$$

Aceasta deoarece considerând un punct pe înregistrarea F- Δ căruia îi corespunde o deplasare totală Δ_c , la descărcare, care se face paralel cu porțiunea inițială, vârful fisurii rămâne deschis datorită componentei plastice Δ_p , fig.V-25 .

Așa cum se cunoaște, pentru deformații în domeniul liniar – elastic, deplasarea critică la deschiderea fisurii se poate exprima cu ajutorul factorului de intensitate a tensiunii K, corespunzător forței maxime F_m (el se calculează cu relațiile (V.2), (V.3), în funcție de tipul epruvetei), limitei de curgere $R_{p0,2}$ și a modului de elasticitate E:

$$\delta_c = \frac{K^2(1-\nu^2)}{2R_{p0,2}E} \quad (V.6)$$

Componenta plastică se calculează cu deplasarea plastică Δ_p , cu relația dată pentru epruveta de încovoiere:

$$\delta_p = \frac{0,4(W-a)}{0,4W + 0,6a + z} \Delta_p \quad (V.7)$$

iar pentru epruveta de tracțiune:

$$\delta_p = \frac{W-a}{1,7W + 2a + 3z} \Delta_p \quad (V.8)$$

unde z - distanța de la muchia epruvetei până la locul unde se montează traductorul de deplasare. Deci valoarea deplasării critice la deschidere a fisurii va fi:

-pentru epruvete la tracțiune

$$\delta_c, \delta_y, \delta_m = \frac{K^2(1-\nu^2)}{2R_{p0,2}E} + \frac{W-a}{1,75W+2a+3z} \Delta_p \quad (V.9)$$

pentru epruveta de încovoiere

$$\delta_c, \delta_y, \delta_m = \frac{K^2(1-\nu^2)}{2R_{p0,2}E} + \frac{0,4(W-a)}{0,4W+0,6a+z} \Delta_p \quad (V.10)$$

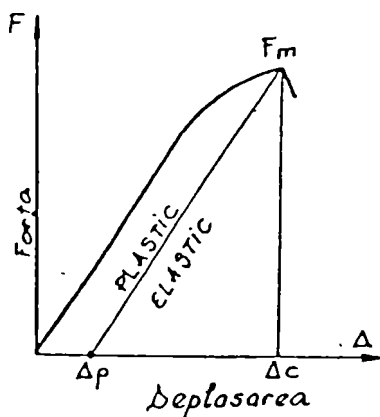


Fig. V- 24 [34]

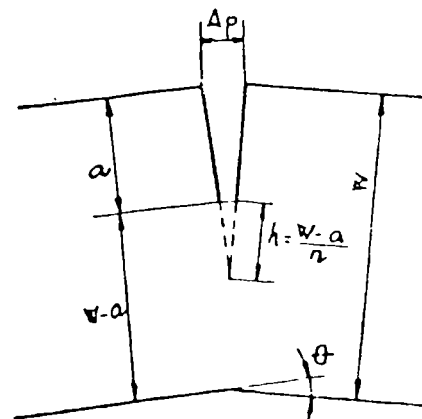


Fig. V- 25 [34]

Experiența a arătat că la descărcare zona elastică din jurul enclavei plastice induce în aceasta o tensiune de compresiune care tinde să micșoreze deformația plastică. S-a observat, de asemenea, că la materiale cu capacitate mare de deformație componenta elastică este neglijabilă.

Validarea rezultatelor încercării

Se examinează aspectul suprafeței de rupere a epruvetelor, urmărind-se existența creșterii subcritice Δ_a a fisurii de oboseală înainte de amorsarea propagării instabile.

Dacă se constată una din situațiile:

- diferențe mai mari de 0,05 între două valori măsurate ale lungimii fisurii;

- diferența între valorile maxime și minime ale lungimii fisurii - mai mare de 0,1 W;
- planul fisurii are o înclinație mai mare de 10° în raport cu planul creștăturii,

rezultatele încercării nu sunt valabile.

V.3.4.3 Determinarea experimentală a valorii critice a integralei de contur J_{IC}

V.3.4.3.1 Conceptul de integrală de contur J

Factorul de intensitate a tensiunii K, [246], caracterizează starea de tensiune și deformație din vecinătatea vârfului fisurii pentru un material cu comportare liniar-elastică, iar deplasarea la deschidere a fisurii δ , [248], se aplică materialelor care înainte de rupere suferă deformații elasto-plastice în vecinătatea vârfului fisurii. În practică delimitarea celor două domenii se face dificil. De aceea s-a căutat introducerea unui parametru de mecanica ruperii care să permită o abordare unică. Acest parametru a fost propus de Rice și numit integrală de contur, J.

Pentru definirea integralei J, se consideră un corp plan, omogen și izotrop, cu o caracteristică liniară sau neliniară, sollicitat de un sistem de sarcini exterioare care produc tensiunile σ_x, σ_y și τ_{xy} . Dacă acest corp are o fisură orientată pe direcția axei Ox a sistemului din fig. V-26, se definește integrala de contur J pentru un contur oarecare Γ situat în interiorul corpului mărimea:

$$J = \int_{\Gamma} \left(U dy - p \frac{\partial D}{\partial x} ds \right) \quad (V.11)$$

unde U - energia specifică de deformație, care are expresia:

$$U = \int_0^{\epsilon} (\sigma_x d\epsilon_x + \sigma_y d\epsilon_y + \tau_{xy} dy_{xy}) \quad (V.12)$$

$p = p_{nx} i + p_{ny} j$ - vectorul tensiune totală, raportat la normala într-un punct de pe conturul Γ .

$D = u_i + v_j$ este vectorul deplasare raportat la normala într-un punct de pe conturul Γ .

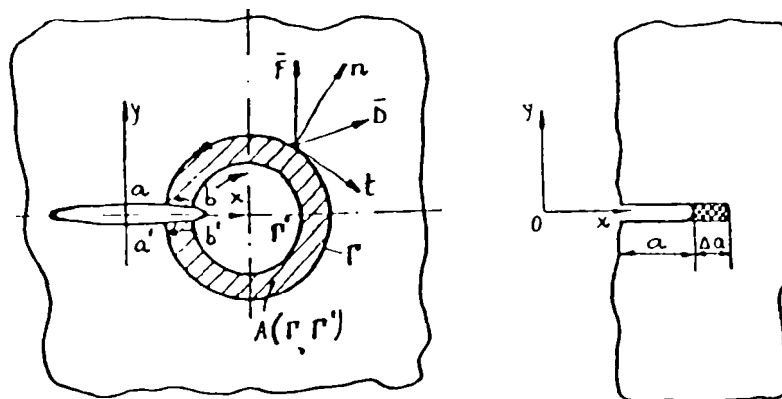


Fig. V- 26 [34]

Se evidențiază faptul că având o fisură de lungime "a", care sub acțiunea încărcărilor exterioare se extinde pe distanța Δa , fig. V-26 , integrala de contur J este egală cu rata de descreștere a energiei de deformație eliberată pe unitatea de grosime a corpului:

$$J = -\lim_{\Delta a \rightarrow 0} \frac{U_e(a + \Delta a) - U_e(a)}{\Delta a} = \frac{\partial U_e}{\partial a} \quad (\text{V.13})$$

unde U_e - energia de deformație eliberată pe unitatea de grosime de corp, prin extensia fisurii cu Δa .

Integrala J are proprietatea că este independentă de conturul de integrare, așa cum se arată în [205] .

Independența de contur a integralei J este un avantaj foarte util la analiza stării de tensiune elasto-plastică în zona adiacentă vârfului fisurii, valoarea integralei J putând fi determinată relativ ușor pentru diverse tipuri de încărcări, configurații geometrice și materiale cu diferite caracteristici σ - ϵ .

Se demonstrează că relația de legătură între integrala J și factorii de intensitate a tensiunii K_I , K_{II} , K_{III} , pentru un corp liniar-elastic sunt:

- pentru starea plană de deformație:

$$J = \frac{1-\nu^2}{E} (K_I^2 + K_{II}^2) + \frac{1+\nu}{E} K_{III}^2 \quad (\text{V.14})$$

- pentru starea plană de tensiune:

$$J = \frac{K_I^2}{E} + \frac{K_{II}^2}{E} + \frac{1+\nu}{E} K_{III}^2 \quad (\text{V.15})$$

În cazul apariției deformațiilor plastice, valoarea integralei J poate fi calculată cu aproximație, întrucât independența ei de conturul de integrare se păstrează, astfel:

$$J = A(\lambda) K_{\sigma}^{2(\lambda+1)} \quad (\text{V.16})$$

$$\text{unde } K_{\sigma} = C(\lambda) K_{el}^{2/(\lambda+1)} \quad (\text{V.17})$$

$A(\lambda)$, $C(\lambda)$ - constante dependente de exponentul de ecrisare al caracteristicii σ - ε , deoarece $\sigma_p = \sigma C(\varepsilon_p/\varepsilon_c)^\lambda$;

K_{el} - factorul de intensitate a tensiunii, pertinent soluției elastice și corespunzător domeniului din exteriorul enclavei plastice;

K_{σ} - factorul plastic de intensitate a tensiunii.

Se poate aprecia că inițierea propagării unei fisuri se produce atunci când integrala J atinge o valoare critică J_c , adică $J = J_c$. Valoarea minimă a parametrului J_c (denumit și tenacitate la rupere), se obține pentru starea plană de deformare, chiar dacă în vecinătatea vârfului fisurii apar deformații plastice limitate, această valoare se notează cu J_{IC} . Adică pentru astfel de materiale valoarea critică a integralei J_{IC} este egală cu forța critică de extensie a fisurii G_{IC} :

$$J_{IC} = G_{IC} = \frac{1-\nu^2}{E} K_{IC} = \delta_c \sigma_c \quad (\text{V.18})$$

V.3.4.3.2 Determinarea experimentală a integralei critice de contur, J_{IC}

Determinarea experimentală a parametrului de rupere J_{IC} este reglementată în SUA de standardul ASTM E 813 [80]. J_{IC} mai este denumit tenacitate la rupere, deoarece caracterizează rezistența materialelor metalice la inițierea extinderii stabile a unei fisuri.

Scopul și principiul încercării

Scopul acestei încercări este determinarea integralei critice J_{IC} , în momentul inițierii extinderii stabile a unei fisuri .

Metoda de determinare a integralei critice J_{IC} , se aplică epruvetelor cu creștături, care nu au în prelungire fisuri propagate prin oboseală.

Pentru determinarea integralei critice J_{IC} se reprezintă, cu ajutorul datelor experimentale, curba J în funcție de extensia (creșterea) fisurii, Δa . Pentru a obține variația integralei J_{IC} în funcție de creșterea fisurii, se pot utiliza două procedee:

- procedeul de încercare a unei singure epruvete, care utilizează complianța elastică sau un procedeu echivalent de evaluare a lungimii fisurii, sau
- procedeul de încercare a mai multor epruvete identice, care se încarcă până la diferite valori ale deplasării punctului de aplicare a forței.

Încercarea se aplică materialelor, care au o comportare ductilă la temperatura de încercare. Ea caracterizează inițierea creșterii stabile a fisurii și nu propagarea stabilă a fisurii și se aplică în condițiile unei încărcări cvasi-stactice. Se recomandă utilizarea epruvetelor de tracțiune (Fig. V-27b) sau de încovoiere (Fig. V-27a), având forma și dimensiunile din Fig. V-27.

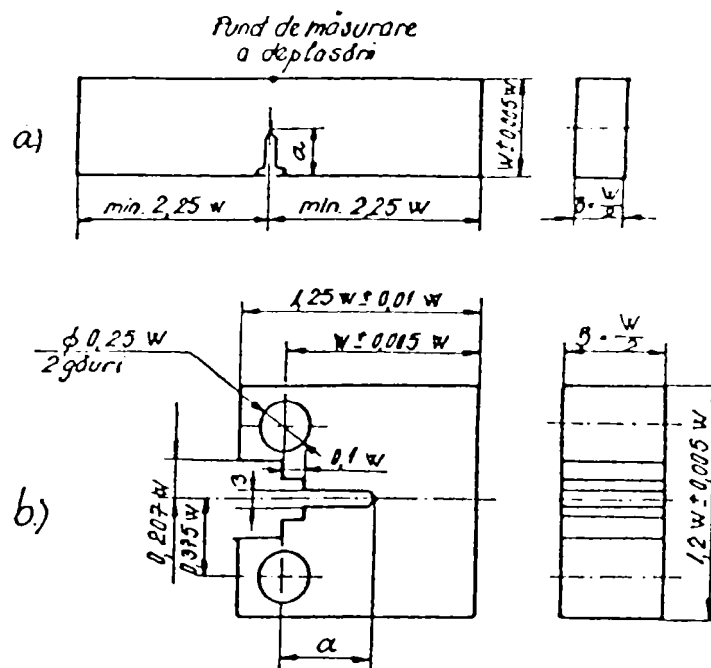


Fig. V- 27 [34]

Epruvetele se prelevează și se prelucrează mecanic la fel ca la metodele K_{IC} și δ_c . Lungimea fisurii inițiale a_0 , care include lungimea creștăturii și a fisurii propagate prin oboseală, trebuie să fie cuprinsă între $[0,50 \dots 0,75] W$, iar raportul $W/B \cong 2$.

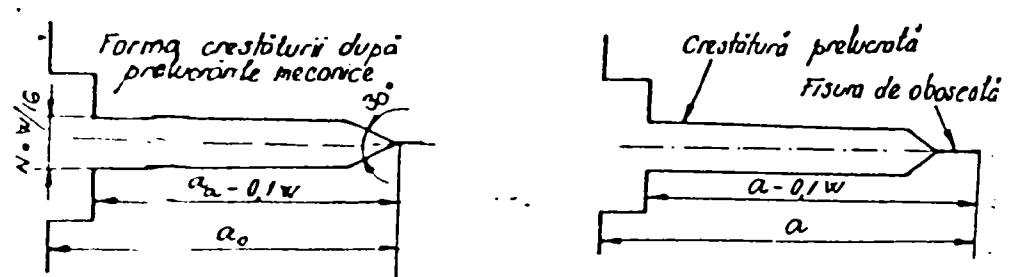


Fig. V- 28 [34]

Aparatură

Prefisurarea prin oboseală se realizează cu un ciclu cuprins între F_{\max} și F_{\min} , unde:

$$F_{\max} = 0,4 FL \text{ și } F_{\min} = F_{\max}/4 - \text{pentru epruveta de tracțiune;}$$

$$F_{\max} = 0,2 FL \text{ și } F_{\min} = F_{\max}/4 - \text{pentru epruveta de încovoiere,}$$

iar $FL = 4B (W-a)^2 R_{po,2}/(3S)$, unde $S = 4W$ deschiderea între reazeme pentru epruveta de încovoiere;

$$FL = B (W-a)^2 R_{po,2}/(2W+a), - \text{pentru epruveta de tracțiune.}$$

Epruveta de încovoiere se recomandă a fi prefisurată printr-o solicitare variabilă la încovoiere.

Lungimea fisurii propagată prin oboseală trebuie să fie mai mare de 1, 3 mm, respectiv mai mare de 0,05 a_0 .

Prefisurarea se realizează după tratamentul termic final al epruvetei, astfel încât după prefisurare să urmeze direct încercarea.

Se înregistrează curba forță-deplasare a punctului de aplicare al forței ($F-\Delta$) cu ajutorul unui înregistrator X-Y sau digital, prin procesare pe un calculator.

La epruveta solicitată la tracțiune se înregistrează semnalul provenit de la un traductor de forță, în funcție de semnalul provenit de la un traductor de deplasare, care, pentru deplasări $\Delta < 3,75$ mm, se poate lua identic cu cel de la încercarea K_{Ic} . Pentru deplasări mai mari se necesită traductori speciali mai mari [80].

Pentru epruvetele solicitate la încovoiere se necesită doi traductori de deplasare, unul care să măsoare deplasarea punctului de aplicare a forței (pentru calculul

integralei J) și unul care să măsoare deplasarea la deschidere a muchiilor fisurii (pentru calculul lungimii efective a fisurii prin tehnica complianței).

Precizia traductorilor de forță și de deplasare trebuie să fie de $\pm 1\%$, iar abaterea de la paralelism a muchiilor traductorilor de deplasare trebuie să fie mai mică de $\pm 1^\circ$.

Solicitarea la tracțiune a epruvetei de tracțiune se poate realiza ca la încercarea K_{IC} , pe o mașină de încercat la tracțiune, iar solicitarea epruvetelor la încovoiere se realizează în trei puncte, conform fig.V-29 .

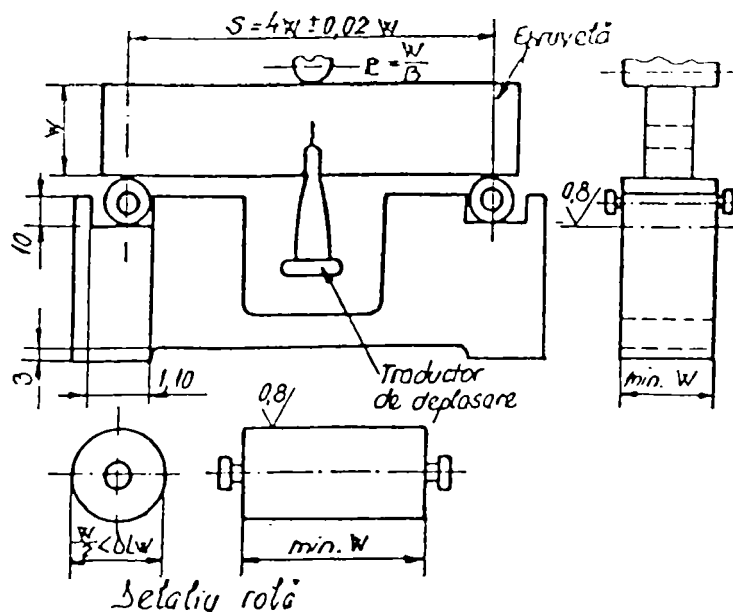


Fig. V- 29 [34]

Montarea epruvetei de încovoiere pe role se adoptă pentru minimalizarea efectelor de frecare.

Executarea încercării

Înainte de efectuarea încercării se măsoară dimensiunile epruvetei: grosimea B și lățimea W.

Prin încercare se urmărește trasarea porțiunii inițiale a curbei J-R, care reprezintă variația integralei J în funcție de extensia fisurii, și evaluarea valorii integralei J corespunzătoare inițierii creșterii stabile a fisurii cu 0,2 mm.

Efectuarea încercării se poate realiza prin două procedee distincte: prin încercarea mai multor epruvete identice sau prin încercarea unei singure epruvete.

Procedeul încercării mai multor epruvete identice constă în încărcarea epruvetelor la diferite valori, alese, ale deplasării punctului de aplicare al forței Δ_i și determinarea extensiei fisurii produsă în timpul încercării (Fig. V-30b).

Încercarea se face cvasi-static, adică lent, continuu, progresiv și fără șocuri.

Se încercă cinci epruvete identice, la care lungimea inițială a fisurii a_0 , să nu difere cu mai mult de 0,1 mm.

Pentru fiecare epruvetă porțiunea inițială a înregistrării $F-\Delta$ trebuie să fie identică.

Pentru fiecare epruvetă se înregistrează diagrama forță-deplasare a punctului de aplicare al forței, $F = f(\Delta)$, parcurgând următoarele etape:

- încărcare până la o valoare prestabilită a deplasării punctului de aplicare al forței;
- descărcare, apoi aplicare a procedurii de colorare termică, pentru determinarea extensiei fisurii. În cazul materialelor având tenacitate ridicată, pentru evitarea deformațiilor plastice care să influențeze aprecierea corectă a extensiei fisurii, se recomandă ca ruperea completă a epruvetei să se realizeze prin aplicarea unui ciclu de oboseală cu F_{max} aproximativ 90% din forța de încărcare. La oțelurile feritice se recomandă ca după colorarea termică ruperea epruvetelor să se realizeze în urma răcirii lor (cu gheață sau azot lichid), astfel încât să se producă o rupere fragilă, fără deformații plastice suplimentare;
- extensia fisurii este marcată de oxidarea suprafețelor în timpul încălzirii și de începutul noii suprafețe de rupere realizată prin oboseală sau încărcare statică (Fig. V-30a .);
- măsurarea lungimii efective a fisurii în nouă puncte egal distanțate pe grosimea epruvetei;
- aprecierea valorii deplasării punctului de aplicare al forței, până la care se va încărca epruveta următoare.

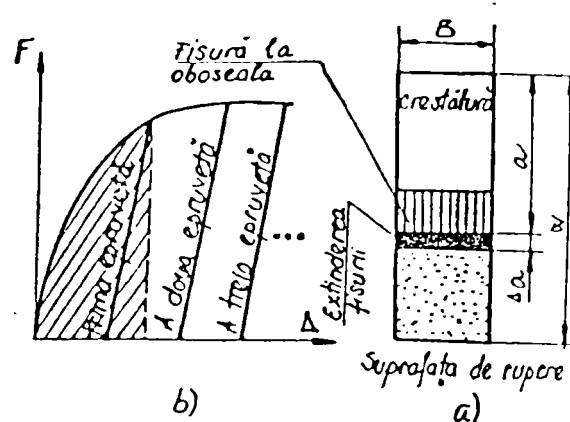


Fig. V- 30 [34]

Procedeul încercării unei singure epruvete, implică, pentru obținerea curbei J-R, utilizarea tehnicii complianței elastice sau a unei metode echivalente ei. Încărcarea, respectiv descărcarea, se fac lent, continuu și progresiv, pentru a putea aprecia lungimea fisurii. Estimarea lungimii fisurii se face pe baza complianței elastice, care se realizează cu o încărcare maximă cuprinsă între $[0,1] \dots [0,4] F_i$.

Determinarea lungimii inițiale a fisurii a_0 , se face tot pe baza complianței, repetând măsurarea de cel puțin trei ori. Valorile individuale nu trebuie să difere cu mai mult de 10,002 W.

După determinarea lungimii inițiale a fisurii a_0 , se încarcă epruveta până la o valoare a sarcinii care să compenseze jocurile de montaj.

Apoi se încarcă și se descarcă succesiv epruveta până la diferite valori ale deplasării punctului de aplicare a forței Δ_i , înregistrându-se diagrama forță-deplasare a punctului de aplicare a forței ($F = f(\Delta)$). Apoi prin calculul integralei J_i , pentru deplasările respective, și a extensiei fisurii Da_i , se obțin perechi de valori $(J, Da)_i$. Se recomandă ca pe porțiunea inițială de $\Delta_a = 2,5$ mm să se determine opt puncte, la distanțe egale pe axa Δ_a .

La multe oțeluri se produce fenomenul de relaxare a tensiunilor (histerēzis), datorită neliniarității pantei la descărcare. Acest efect, care influențează negativ rezultatele încercării, poate fi diminuat prin menținerea un anumit timp a epruvetei la o deplasare constantă înaintea realizării încărcării, respectiv descărcării. După ultima descărcare, la valoarea maximă a extensiei fisurii se aplică procedeul de colorare termică, pentru determinarea extensiei totale a fisurii.

Procedeul încercării unei singure epruvete se recomandă a fi utilizat la determinarea J_{IC} a materialelor scumpe, unde este nerentabilă încercarea mai multor epruvete. Pe de altă parte, prin procedeul încercării mai multor epruvete determinarea extensiei fisurii, implicit a curbei $J = f(\Delta_a)$, este mai ușoară.

Aprecierea rezultatelor încercării. Se face pentru procedeul încercării mai multor epruvete identice.

Se calculează valorile integralei J , din diagrama forță-deplasare a punctului de aplicare a forței ($F = f(\Delta_a)$), cu relația:

$$J_i = \frac{A_i}{B(W - a_i)} f(a_i/W) \text{ [N /mm]} \quad (\text{V.19}),$$

unde A_i - aria de sub înregistrarea $F-\Delta$ (Fig. V-31.a);

B, W - dimensiunile epruvetei; a_i - lungimea efectivă a fisurii;

$f(a_i/W)$ - o funcție determinată prin complianță.

Conform standardului american ASTM E 813-87 [17], considerând că energia consumată în procesul de rupere are două componente: una elastică, care se determină cu relația din mecanica ruperii liniar-elastică, și una plastică, care se determină din aria zonei plastice (Fig. V-31), integrala J_i într-un anumit punct "i" are expresia:

$$J_i = J_{el,i} + J_{pl,i} \quad (\text{V.20}),$$

unde $J_{el,i}$ - componenta elastică a integralei J , în i ;

$J_{pl,i}$ - componenta plastică a integralei J , în i .

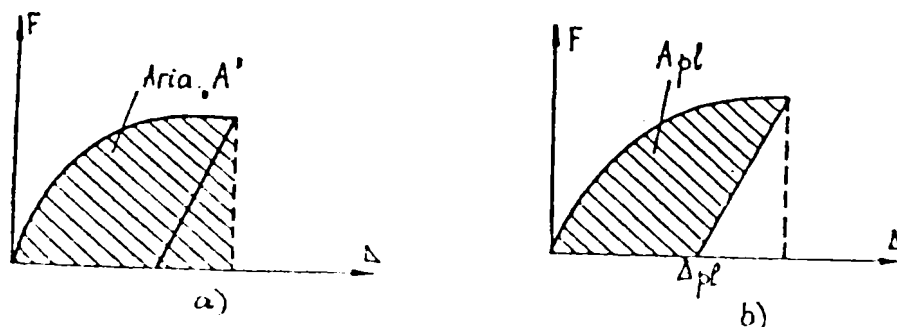


Fig. V- 31[34]

Componenta elastică se calculează pe baza factorului de intensitate a tensiunii K_i cu relația:

$$J_{el,i} = \frac{K_i^2(1-\nu^2)}{E} \quad (\text{N/mm}) \quad (\text{V.21}), \text{ unde}$$

E - modulul de elasticitate longitudinal, ν - coeficientul lui Poisson, K_i - factorul de intensitate a tensiunii, care se calculează cu relația, dată la încercarea K_{IC} :

- pentru epruveta de tracțiune:

$$K_i = \frac{F_i}{BW^{3/2}} f(a_0/W) \quad [\text{N/mm}^{3/2}] \quad (\text{V.22})$$

unde: F_i - forța corespunzătoare punctului i ;

B, W - dimensiunile epruvetei;

$f(a_0/W)$ - o funcție determinată prin complianță, dependentă de lungimea inițială a fisurii a_0 și de lățimea epruvetei W , care are expresia:

$$f(a_0/W) = \frac{2(a_0/W) \left[0,886 + 4,64(a_0/W) - 13,32(a_0/W)^2 + 14,72(a_0/W)^3 - 5,6(a_0/W)^4 \right]}{(1-a_0/W)^{3/2}}$$

- pentru epruveta de încovoiere:

$$K_i = \frac{F_i S}{BW^{3/2}} f(a_0/W) \quad [\text{N/mm}^{3/2}] \quad (\text{V.23})$$

unde: S - deschiderea între reazeme ($S=4W$ pentru epruvetele standard), celelalte mărimi având aceeași semnificație ca la epruveta de tracțiune, iar funcția $f(a_0/W)$ are expresia:

$$f(a_0/W) = \frac{3(a_0/W) \left[1,99 - (a_0/W)(1-a_0/W) \left(2,15 - 3,93(a_0/W)^2 + 2,7(a_0/W)^3 \right) \right]}{2(1+2a_0/W)(1-a_0/W)}$$

Componenta plastică a integralei J, într-un punct i, se calculează, pentru ambele tipuri de epruvete, pe baza ariei plastice $A_{pl,i}$ din diagrama F- Δ (Fig. V-31b), corespunzătoare punctului "i", cu relația:

$$J_{pl,i} = \frac{\eta F_i^2}{B(W - a_i)} \quad [\text{N /mm}] \quad (\text{V.24})$$

unde: $\eta = 2 + 0,522(W - a_i)/W$, parametru dependent de lungimea efectivă a fisurii a_i , în punctul i.

Aria A_i , în relația (V.19), sau aria plastică $A_{pl,i}$, în relația (V.24), se poate determina prin planimetrie sau cu ajutorul unui computer, prin integrare numerică.

Extensia fisurii Δa de determină prin complianță elastică - procedeul de încercare a unei singure epruvete - sau prin colorare termică - la procedeul de încercare a mai multor epruvete identice.

În sistemul de coordonate (J, Δa), se reprezintă perechile de valori (J_i , Δa_i), obținute prin calcul, și se reprezintă funcția $J = f(\Delta a)$ (Fig. V-32).

În același sistem de coordonate (J, Δa) se reprezintă dreapta:

$$J = 2R_{p0,2}\Delta a \quad (\text{V.25})$$

unde $R_{p0,2}$ reprezintă limita de curgere a materialului, sau în cazul materialelor ce prezintă fenomenul de întărire în timpul deformării plastice, se folosește o tensiune medie calculată pe baza limitei de curgere $R_{p0,2}$ și a rezistenței la rupere R_m :

$$R_p = (R_{p0,2} + R_m)/2 \quad (\text{V.26})$$

Apoi se tratează limitele de excludere a valorilor, care reprezintă paralele la dreapta de ecuație (V.25), duse prin $\Delta a = 0,15$ mm, respectiv $\Delta a = 1,5$ mm. Punctele de intersecția a acestor linii de excludere cu curba $J = f(\Delta a)$ reprezintă valorile minimă, Δa_{min} , respectiv maximă, Δa_{max} , admise pentru extensia fisurii.

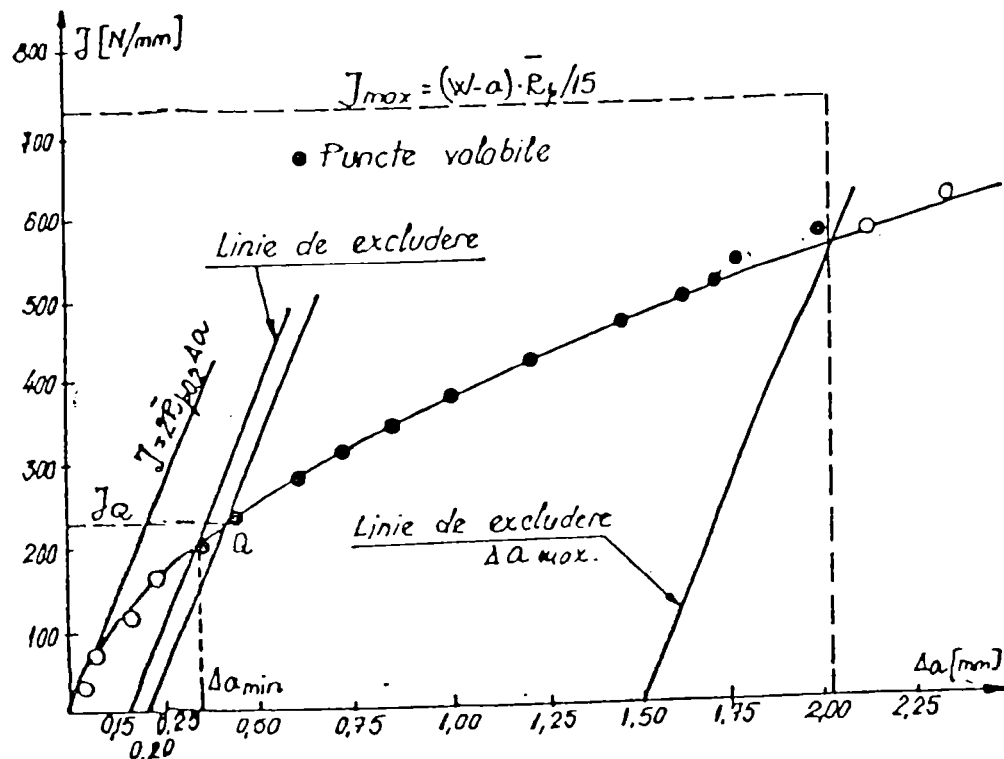


Fig. V- 32[34]

Se trasează alte două paralele cu dreapta de ecuație (V.25), distanțate de ea la 0,5 mm, respectiv 1,0 mm. Aceste paralele împreună cu liniile de excludere creează două regiuni notate, în fig. V-33, A, B.

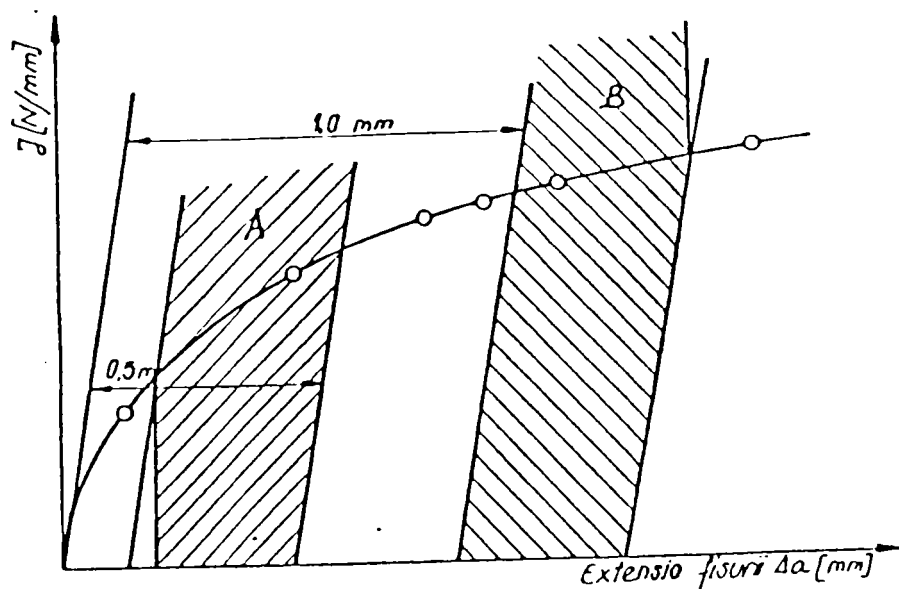


Fig. V- 33 [34]

Se consideră că rezultatele încercării sunt valide dacă în fiecare din regiunile A și B apare un punct $(J_i, \Delta a_i)$, celelalte puncte putând fi poziționate oriunde în regiunea

punctelor valide. Regiunea punctelor valide este limitată superior de valoarea $J_{\max} = R_{p0.2}(W-a_0)15$, reprezentată în fig V-34.

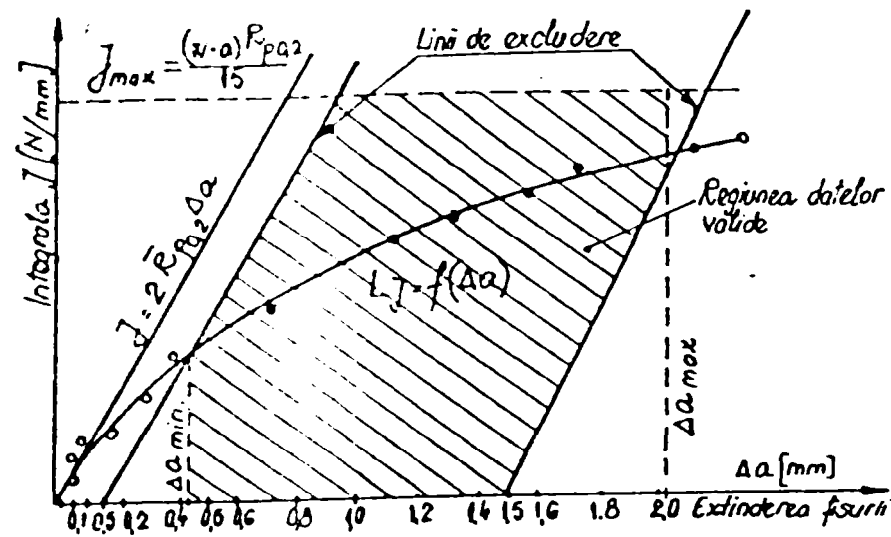


Fig. V-34 [34]

Dacă în regiunea rezultatelor valide se găsesc minim patru puncte, se poate trece la determinarea relației dintre integrala J și extensia fisurii Δa , prin regresie, aplicând metoda celor mai mici pătrate, adoptând legătura dintre J și Δa sub forma:

$$J = c(Da)^d \quad (V.27)$$

sau logaritmând relația (V.27) se obține:

$$\ln J = \ln c + d \ln \Delta a \quad (V.28)$$

După determinarea parametrilor curbei de regresie pe baza punctelor din regiunea de valabilitate, se trasează curba de regresie $J = f(\Delta a)$ (Fig.V-32). Punctul de intersecție a curbei $J = f(\Delta a)$ cu paralela la dreapta de ecuație (V.25) ce trece prin punctul corespunzător unei extensii a fisurii de 0,2 mm ($\Delta a = 0,2$ mm) se notează cu Q și are coordonatele $(J_0, \Delta a_0)$.

Pentru determinarea valorii integralei J_0 corespunzătoare acestui punct se recomandă parcurgerea următoarelor etape:

- se determină valoarea J_{01} , cu datele din fig. V-32, ca fiind punctul de intersecție dintre curba $J = f(\Delta a)$ și paralela la dreapta de ecuație (V.25) ce trece prin $\Delta a = 0,2$ mm;

- se calculează valoarea extensiei fisurii corespunzătoare punctului Q:

$$\Delta a_{Q1} = 0,2 + J_{Q1}/2R_{p0,2};$$

- se calculează valoarea $J_{Q2} = c(Da_{Q1})^d$, dată de relația (V.27);
- se compară valorile J_{Q1} cu J_{Q2} ; dacă diferența dintre ele este mai mică de 2%, atunci valoarea J_{Q2} se consideră valoarea integralei J în punctul Q: $J_Q = J_{Q2}$; dacă condiția de mai sus nu se respectă, se fac atâtea iterații până când condiția este respectată, valoarea J_Q , luându-se valoarea ultimei iterații.

Valoarea integralei critice J_{IC} se consideră egală cu valoarea integralei în punctul Q: $J_{IC} = J_Q$, dacă se respectă următoarele condiții:

- în regiunea de valabilitate se găsesc minimum 4 puncte;
- grosimea epruvetei B respectă condiția $B > 25 J_Q/R_{p0,2}$;
- lățimea epruvetei B respectă condiția: $W-a > 25 J_Q/R_{p0,2}$;
- panta funcției $J = f(\Delta a)$ în punctul Q este mai mică decât limita de curgere a materialului: $[dJ/d(\Delta a)]_Q < R_{p0,2}$;
- nici o epruvetă nu a suferit o rupere fragilă la temperatura și viteza de încărcare din timpul încercării;
- între panta de încărcare și cea de descărcare pe înregistrările F- Δ să nu existe diferențe mai mari de 10%;
- diferența dintre extensia fisurii lângă suprafețele laterale ale epruvetei și extensia fisurii în centrul epruvetei nu trebuie să depășească $\pm 0,02 W$.

Determinarea integralei critice J_{IC} utilizând mai multe epruvete cu lungimi diferite ale fisurii

Această metodă dezvoltată de Bucci și colaboratorii [26] propune ridicarea diagramei $J - f(\Delta a)$ utilizând mai multe epruvete de aceeași mărime și configurație, având însă diferită lungimea fisurii a_i (cu "i" = 1...4).

Se folosesc epruvete de tracțiune identice cu cele de la metoda precedentă (Fig. V-27), care se încarcă static, înregistrându-se curbele forță-deplasare a punctului de aplicare al forței ($F-\Delta$), fig. V-35. Se obține astfel o curbă $F-\Delta$ pentru fiecare lungime inițială ale fisurii (Fig. V-35b).

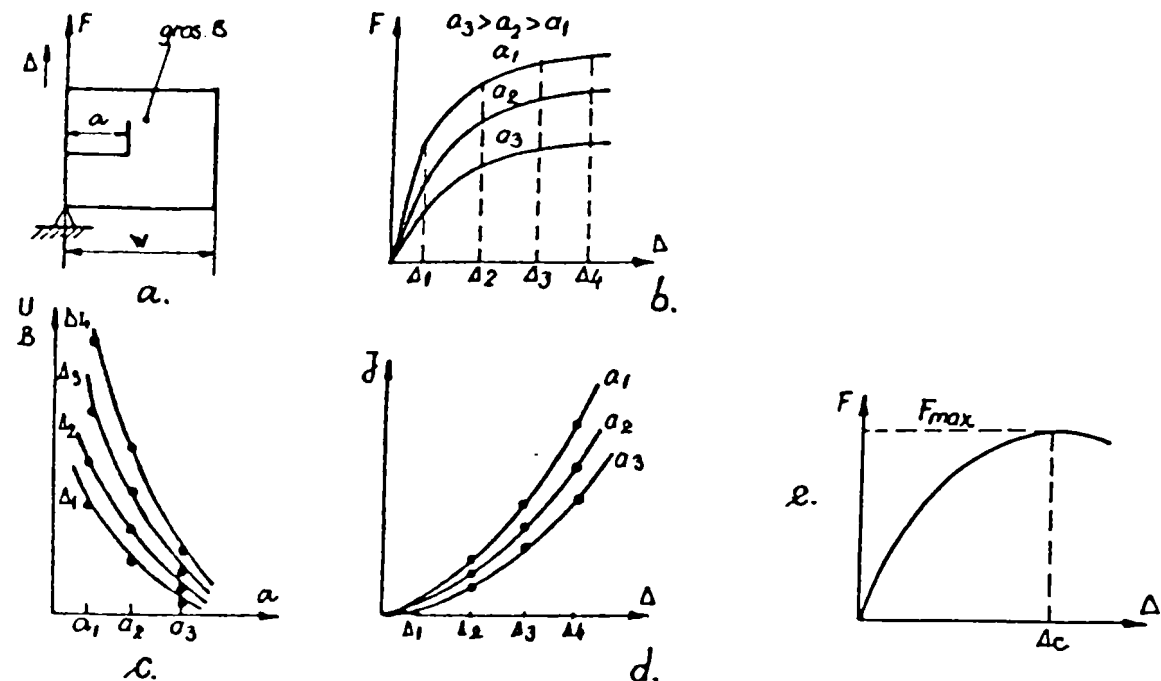


Fig. V- 35 [34]

Aria de sub curba $F-\Delta$, core spunzătoare unei anumite deplasări Δ_i , reprezintă energia absorbită de epruvetă în timpul deformării U , până la deplasarea punctului de aplicare al forței Δ_i .

Se poate reprezenta variația energiei de deformare U în funcție de lungimea fisurii "a", la diverse deplasări Δ_i (Fig. V-35, $U = f(a)$).

Conform relației (V.13), considerând epruvete de grosime constantă B , valoarea integralei J se poate calcula astfel:

$$J = -\frac{1}{B} \frac{\partial U}{\partial a} \quad (V.29)$$

Adică integrala J se obține raportând negativul pantei curbelor $U = f(a)$ la grosimea epruvetei B .

Apoi valorile calculate ale integralei J se pot reprezenta în funcție de deplasarea punctului de aplicare al forței Δ pentru diferite valori ale lungimii fisurii a_i (Fig. V-35d , $J = f(\Delta)$).

Conform acestei metode valoarea integralei critice J_{IC} , se determină ca fiind valoarea integralei J corespunzătoare deplasării critice Δ_c , atunci când forța atinge valoarea maximă F_{max} (Fig. V-35e).

Dezavantajele metodei:

- nu determină starea critică corespunzătoare inițierii creșterii stabile a fisurii;
- volumul mare de calcule pentru ridicarea diagramelor $U = f(a)$, respectiv $J = f(\Delta)$.

V.3.5 METODOLOGII DE DETERMINARE A REZISTENȚEI LA OBOSEALĂ A ELEMENTELOR DE REZISTENȚĂ ALE STRUCTURILOR PORTANTE

V.3.5.1 Solicitări caracteristice pentru UG

Utilajele miniere sunt supuse în lucru acțiunii unor sarcini variabile, care uneori includ și șocuri. Variația în timp a sarcinilor provoacă în ER tensiuni variabile. Oboseala modifică, (cel mai adesea înrăutățește) proprietățile materialului. Numeroase studii prezintă variația proprietăților fizice ale metalelor sub acțiunea sarcinilor variabile (Fig. V-36).

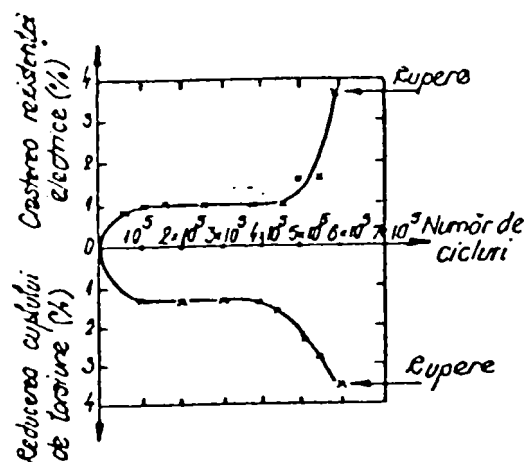


Fig. V- 36 [39]. Variația rezistenței electrice și a momentului de torsiune, la încercări de oboseală, la răsucire simetrică, cu epruvete cu creștătur

După cum se știe, energia disipată pe fiecare ciclu de solicitare este dată de suprafața buclei de histerezis în coordonatele σ - ϵ . Înregistrările unor asemenea bucle, în cursul încercărilor, indică o modificare a suprafeței acestora, deci și a energiei specifice înmagazinate pentru fiecare ciclu de solicitare (Fig. V-37).

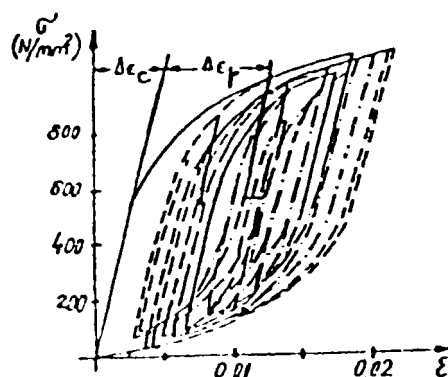


Fig. V-37 [34r]

Elementele structurilor de rezistență, obosec, se degradează cu fiecare ciclu de lucru; în funcție de condițiile de solicitare; în unele cazuri se ajunge la fisurare.

V.3.5.2 Etapele caracteristice ale degradării

În general, mecanismului de degradare prin oboseală în care se ajunge la fisurare și rupere, îi sunt caracteristice 3 etape:

- amorsarea fisurii (indicate prin stadiile I și II);
- propagarea lentă și stabilă a fisurii;
- propagarea brutală, conducând la rupere.

În ipoteza apariției fisurilor, durata de viață a unui element de rezistență poate fi considerată ca având 2 părți: prima, pe perioada inițierii fisurii - N_{init} , iar cea de-a doua pe perioada propagării fisurii, până la ruperea finală, N_{prop} .

$$N_c = N_{init} + N_{prop} \quad (V.30)$$

Raportul dintre aceste componente nu este constant, astfel la solicitările de mare durabilitate, în apropierea limitei de oboseală, durata propagării este mică în raport cu cea a inițierii, la solicitările de durabilitate mică, durata propagării constituie o parte importantă a duratei de viață, putând-o depăși uneori pe cea destinată inițierii fisurii. Trebuie luate în considerare și structurile cu fisuri preexistente, la care durata de viață este exclusiv destinată propagării fisurii (exemplu structurile sudate).

Stadiile ruperii prin oboseală sunt prezentate în fig. V-38

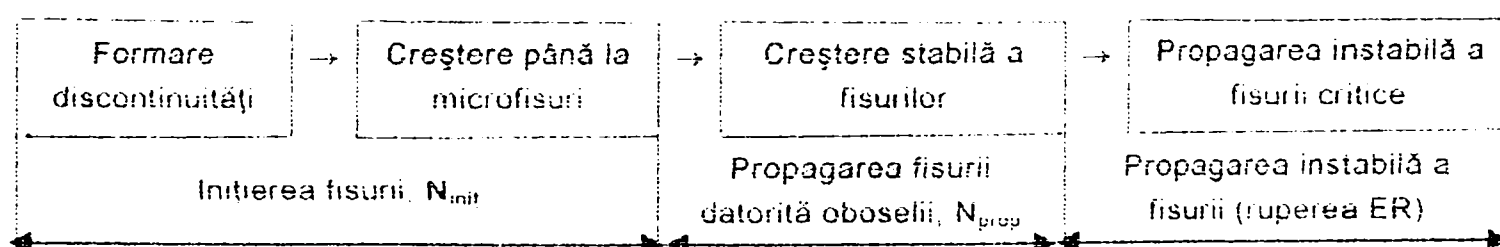


Fig. V- 38 [31]

V.3.5.2.1 Etapa I- Amorsarea fisurii, stadiile I și II În fapt,, variația în timp a tensiunilor, conduce la modificări structurale. Cu microscopul electronic s-au identificat unele fenomene legate de incipiența fenomenului de oboseală. Astfel, suprafețele epruvetelor supuse la încercări variabile indică după primele cicluri apariția benzilor de alunecare (Fig. V-39). În fig. V- 39 este indicată suprațata unei epruvete din oțel moale, după 525000 cicluri, în condițiile unei solicitări de încovoiere rotativă cu $\sigma_{max} = 0,130$ MPa [39]. Aceste benzi persistente sunt caracteristice

După un timp foarte scurt se observă prezența în interiorul unor benzi de alunecare a liniilor de alunecare corespunzătoare planelor de alunecare din cristalul considerat (Fig. V-40) [39]

În fig. V-40 este indicată o microfractografie electronică a suprafeței unei epruvete după 125000 de cicluri, la o solicitare de încovoiere rotativă, indicând prezența a numeroase ramificații în cadrul unei benzi de deformare.

Apariția a numeroase lunecări ramificate, în condițiile unor sarcini variabile, determină o localizare preferențială a deformațiilor în aceste benzi, favorizând astfel traversarea de către benzi a unor grăunți. În benzile în care se cumulează deformațiile se formează microfisurile, în lungul liniilor de alunecare (Fig. V-40)

Din fig. V-41 se observă, de asemenea, formarea microfisurilor în lungul liniilor de alunecare, în cazul unei epruvete din oțel inoxidabil austenitic ($17\text{Cr}14\text{Ni}4\text{Si}$), după 200000 de cicluri, în condițiile unei solicitări de torsiune alternant simetrică. Se evidențiază prezența a numeroase linii de alunecare cristalografice în benzile de deformare [39].

Corespunzător stadiului I, microfisurile se formează, fie în prelungirea unei intruziuni, fie în lungul unei linii de alunecare. În stadiul I, fisura progresează în lungul planului cristalografic, pe când în stadiul II, fisura se propagă după o direcție normală la tensiunea normală maximă.

În fig. V-42 sunt indicate cele două stadii de propagare a fisurilor de oboseală inițiate pe suprafața unei epruvete din Al, în condițiile unei solicitări de tracțiune alternant simetrică. Pe lângă modificările remarcate pe suprafețele epruvetelor, se pot evidenția și modificări structurale interne.

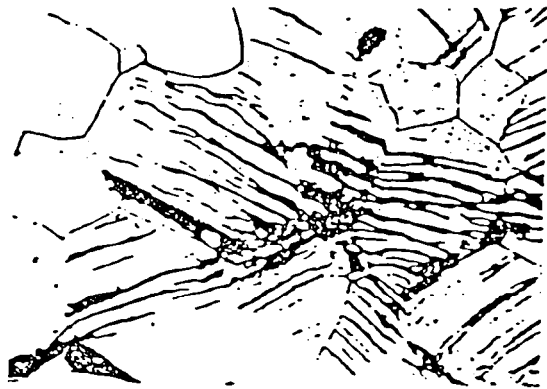


Fig. V- 39 [34]



Fig. V- 40[34]

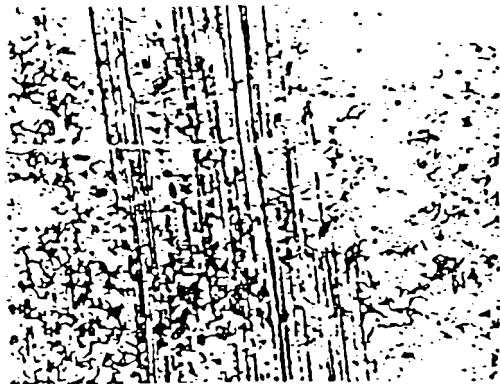


Fig. V- 41 [34]

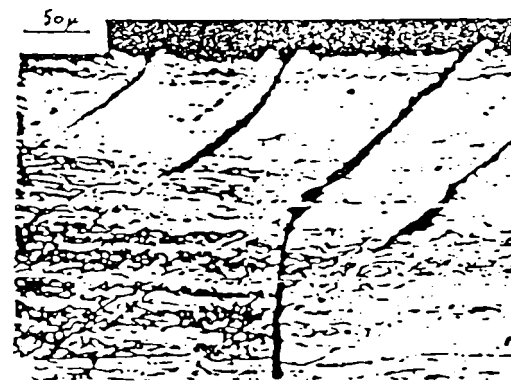


Fig. V- 42 [34]

Amorsarea fisurii prezentată sumar prin explicarea celor 2 stadii, I și II, este determinată de numărul de cicluri pentru care fisura atinge lungimea a_0 mm. O asemenea lungime de fisură este în general ușor detectată și ea reprezintă aproximativ dimensiunea unui grăunte. [113], [144].

V.3.5.2.2 Etapa II - Propagarea lentă, stabilă, a fisurii

Cele mai multe studii au fost efectuate asupra celei de a doua etape, stabilindu-se o serie de expresii ale vitezei de fisurare la sarcini variabile [79].

Dintre acestea putem aminti:

- relația lui Frost și Dugdale:

$$\frac{da}{dN} = A \sigma_a^3 \quad (V.31)$$

unde: A- constanta care depinde de material și de tensiunea medie;

a – lungimea fisurii; N – Numărul de cicluri; σ_a – amplitudinea tensiunii

- relațiile lui Mc Evily și Illg:

$$\frac{da}{dN} = f(K_t \sigma_n) \quad (\text{V.32})$$

unde K_t -coeficient teoretic de concentrare a tensiunilor;
 σ_n -tensiunea nominală în secțiunea fisurată.

- relațiile li Mc Evily și Laird:

$$\frac{da}{dN} = A(\epsilon_t \sqrt{a})^n \quad (\text{V.33})$$

unde: A –este o constantă de material;

ϵ_t - deformața plastică totală pe un ciclu de solicitare

- relația lui Paris:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (\text{V.34})$$

unde: ΔK - variația factorului de intensitate a tensiunii K;

C, m – constante de material.

Reprezentând diagrama de variație a vitezei de propagare a fisurii da/dN în funcție de variația factorului de intensitate a tensiunii ΔK (A se vedea Fig. V-43) se disting trei domenii de propagare a fisurii.

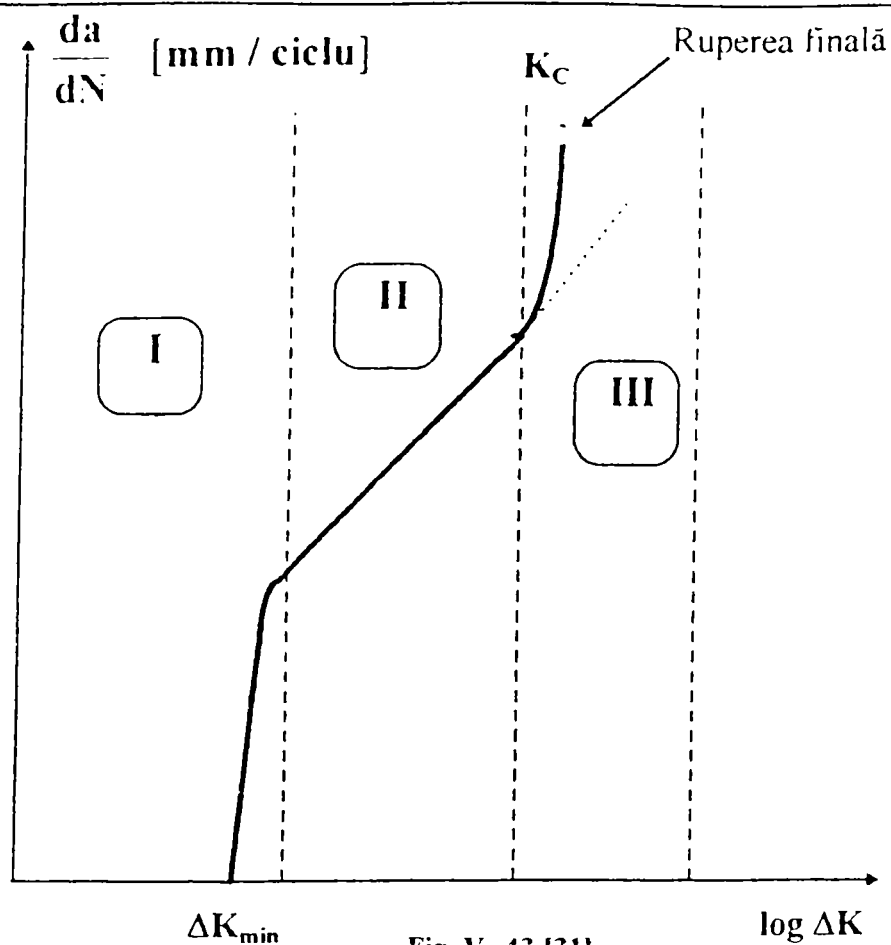


Fig. V- 43 [31]

Domeniul I corespunzător unei propagări sub-critice a fisurii, la care forța de extensie a fisurii este mai mică decât tenacitatea la rupere a materialului. Fisurile se dezvoltă datorită degradării materialului, cauzată de coroziune și de solicitările variabile. Acest domeniu este caracterizat de valoarea minimă a variației factorului de intensitate a tensiunii ΔK_{\min} până la care fisurile nu se propagă. Odată cu creșterea amplitudinii solicitării peste valoarea ΔK_{\min} , viteza de propagare a fisurii crește lent. Propagarea sub-critică a fisurii durează în general perioade lungi de timp.

Relația dintre viteza de propagare a fisurii și variația factorului de intensitate a tensiunii corespunzătoare acestui domeniu este dată de Klesnil, [267] sub forma:

$$\frac{da}{dN} = C_1 (\Delta K - \Delta K_{\min})^{n_1} \quad [\text{mm/ ciclu}], \quad (\text{V.35})$$

unde C_1 și n_1 sunt constante de material.

Domeniul II se caracterizează printr-o propagare stabilă a fisurii. Creșterea stabilă a fisurii se produce dacă sunt îndeplinite următoarele trei condiții:

- forța de extensie a fisurii trebuie să fie egală cu rezistența materialului la propagarea fisurii;
- variația forței de extensie a fisurii în raport cu lungimea fisurii trebuie să fie negativă;
- viteza de creștere a fisurii trebuie să fie suficient de mică astfel încât să poată fi neglijate forțele de inerție.

Corelația dintre variația factorul de intensitate a tensiunii $\Delta K_1 = K_{I_{max}} - K_{I_{min}}$ și viteza de propagare a fisurii de oboseală da/dN , pentru acest domeniu este dată de legea lui Paris, [35].

$$\frac{da}{dN} = C \cdot \Delta K_1^n \quad [\text{mm/ ciclu}] \quad (\text{V.36})$$

unde: C - coeficient, iar n - exponent specifici fiecărui material, care se determină experimental prin încercări de oboseală.

În acest domeniu se fac de obicei predicții asupra durabilității la sollicitări variabile.

Domeniul III este caracterizat de viteze de propagare a fisurii foarte mari, considerându-se o propagare instabilă a fisurii. Fisura crește rapid de la un ciclu la altul până la atingerea lungimii critice a fisurii la care se produce ruperea finală. Forța de extensie a fisurii devine mai mare decât tenacitatea materialului K_C .

În acest domeniu viteza de propagare a fisurii este corelată cu variația factorului de intensitate a tensiunii prin ecuația propusă de Forman, [11]:

$$\frac{da}{dN} = \frac{A(\Delta K)^p}{(1-R)K_C - \Delta K} \quad [\text{mm/ ciclu}] \quad (\text{V.37})$$

unde: A și p - constante de material;

$\Delta K = K_{max} - K_{min}$ - variația factorului de intensitate a tensiunii;

K_C - factor critic de intensitate a tensiunii (tenacitatea la rupere);

$$R = \frac{K_{\min}}{K_{\max}} = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} - \text{coeficientul de asimetrie al ciclului de solicitare};$$

K_{\min} - valoarea factorului de intensitate al tensiunii, calculat pentru sarcina minimă din ciclul de solicitare;

K_{\max} - valoarea factorului de intensitate al tensiunii calculat pentru sarcina maximă din ciclul de solicitare.

În literatura tehnică sunt prezentate numeroase diagrame care corelează viteza de propagare a fisurii în funcție de Δ_K , în care se evidențiază cele trei domenii analizate.

V.3.5.3 Modelarea propagării fisurii [31] În general direcțiile de propagare a fisurilor sunt traiectorii curbilinii, care indică prezența modului mixt de deplasare a flancurilor fisurii (modurile I și II, conf. cap. II sau [3]).

Pentru modelarea propagării fisurii într-un element de rezistență plan sunt necesare trei tipuri de informații și anume:

- a) factorii de intensitate a tensiunii pertinenti cele două moduri de deplasare a flancurilor fisurii K_I respectiv K_{II} , pe baza cărora se calculează un factor efectiv de intensitate a tensiunii K_{ef} ;
- b) tenacitatea la rupere a materialului;
- c) direcția de propagare a fisurii, care trebuie determinată la fiecare creștere incrementală a fisurii.

a) Factorul de intensitate a tensiunii efectiv, K_{ef}

Factorul de intensitate a tensiunii efectiv s-a definit cu scopul de a lua în considerare prezența ambelor moduri I și II de deplasare a flancurilor fisurii.

Pornind de la expresia forței totale de extensie a fisurii:

$$\zeta_t = \zeta_I + \zeta_{II} \quad (V.38)$$

și ținând cont de relația de legătură dintre forța de extensie a tensiunii și factorul de intensitate a tensiunii rezultă:

$$\zeta_I = \frac{K_{ef}^2}{E(1-\nu^2)} = \frac{K_I^2}{E(1-\nu^2)} + \frac{K_{II}^2}{E(1-\nu^2)} \quad (V.39)$$

$$\text{sau } K_{ef} = \sqrt{K_I^2 + K_{II}^2} \quad (V.40)$$

Alte două relații ale factorului de intensitate efectiv au fost propuse de TanaKa, pornind de la diferite legi de propagare a fisurii de oboseală:

$$K_{ef} = \sqrt{K_I^2 + 2K_{II}^2} \text{ și } K_{ef} = \sqrt[4]{K_I^4 + 8K_{II}^4} \quad (V.41)$$

Pentru cazurile practice când $K_{II} < K_I$ toate expresiile lui K_{ef} dau rezultate apropiate.

Factorul de intensitate a tensiunii efectiv poate fi interpretat ca un parametru ce înglobează efectele ambelor moduri I și II de deplasare a flancurilor fisurii.

b) Tenacitatea la rupere a materialului

Tenacitatea la rupere a materialului este o caracteristică de material și reprezintă valoarea parametrului de rupere căreia îi corespunde prima extindere sesizabilă a fisurii. Pentru cazul materialelor cu comportare liniar – elastică tenacitatea la rupere se consideră valoarea factorului critic de intensitate a tensiunii K_{IC} determinat în condițiile stării plane de deformație. Dacă nu sunt respectate condițiile stării plane de deformație tenacitatea la rupere se notează cu K_C . Pentru materiale cu comportare elasto- – plastică tenacitatea la rupere se consideră valoarea deplasării critice de deschidere la vârful fisurii δ_C sau a integralei critice J_{IC} .

Valorile tenacității la rupere se determină experimental, încercările fiind standardizate: pentru factorul critic de intensitate a tensiunii K_{IC} la noi în țară de STAS 9760-84, [246], respectiv BS 7488 în Marea Britanie [68], pentru deplasarea critică de deschidere la vârful fisurii δ_C de STAS E 12803-90 [248] la noi în țară de BS 7488 în Marea Britanie [68] și de ASTM E 1290-89 [14] în SUA iar pentru integrala critică J_{IC} BS 7488 [68] în Marea Britanie și ASTM E 813-83 [17] în SUA.

c) Directia de propagare a fisurii

S-au dezvoltat o serie de teorii pentru determinarea direcției de propagare a fisurii. Trei dintre acestea sunt la ora actuală acceptate și cele mai utilizate: teoria tensiunii principale maxime, teoria ratei de eliberare a energiei de deformare (forței maxime de extensie a fisurii) și teoria densității minime a energiei de deformare.

Teoria tensiunii circumferențiale maxime, $\sigma_{\theta\max}$ a fost propusă de Erdogan [108] și se bazează pe următoarele ipoteze:

- extensia fisurii pornește de la vârful acesteia și se produce pe o direcție radială;
- extensia fisurii se produce pe o direcție perpendiculară pe direcția tensiunii principale maxime $\sigma_{\theta\max}$
- extensia fisurii începe când tensiunea principală maximă $\sigma_{\theta\max}$ atinge o valoare critică (de exemplu rezistența la rupere a materialului).

Teoria forței maxime de extensie a fisurii, propusă de Hussain [267], apreciază că extensia fisurii se produce atunci când forța de extensie a fisurii " ζ " atinge o valoare critică " ζ_c " și se bazează pe următoarele considerente:

- extensia fisurii pornește de la vârful acesteia și se produce pe o direcție radială
- extensia fisurii se produce pe direcția forței maxime de extensie a fisurii $\zeta_{0\max}$
- extensia fisurii începe atunci când forța maximă de extensie a fisurii $\zeta_{0\max}$ atinge o valoare critică ζ_c , care reprezintă tenacitatea la rupere a materialului.

Teoria densității minime a energiei de deformare, propusă de Sih [267], se bazează pe următoarele observații:

- densitatea energiei elastice de deformare reprezintă local măsura energiei de deformare disponibilă pentru propagarea fisurii;
- energia de deformare se poate descompune în orice punct în două componente, una modificatoare de volum și una modificatoare de formă;

- analizând energia de deformație în punctele echidistante față de vârful fisurii, Sih a observat că punctul corespunzător densității minime a energiei de deformație are valoarea maximă a densității energiei modificatoare de formă.

Pe baza observațiilor de mai sus și cunoscând că energia de deformație modificatoare de formă cauzează fenomenul de curgere, iar componenta modificatoare de volum este responsabilă de rupere, teoria densității minime a energie de deformație este formulată de Sih astfel:

- extensia fisurii pornește de la vârful acesteia și se produce pe o direcție radială;
- densitatea energiei de deformație, $S(\theta)$ se definește astfel:

$$\frac{S(\theta)}{r} = \frac{\partial U}{\partial V} \quad (\text{V.42})$$

unde U - energia de deformație iar V este volumul;

- extensia fisurii se realizează pe direcția valorii minime a densității energiei de deformație $S_{0\min}$, valoarea unghiului corespunzător direcției de propagare a fisurii fiind soluția ecuației:

$$\frac{\partial S}{\partial V} = 0 \quad (\text{V.43})$$

- extensia fisurii se produce atunci când valoarea densității energiei de deformație atinge o valoare critică S_{cr} , care reprezintă o caracteristică de material.

Pentru cazul solicitării monoaxiale legătura dintre valoarea critică a densității energiei de deformație și tenacitatea la rupere K_{IC} este dată de relația:

$$S_{cr} = \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{2\pi E} K_{IC}^2 \quad (\text{V.44})$$

Cele trei teorii prezentate pot fi reprezentate în coordonatele K_I/K_{IC} respectiv K_{II}/K_{IC} în fig. V-44

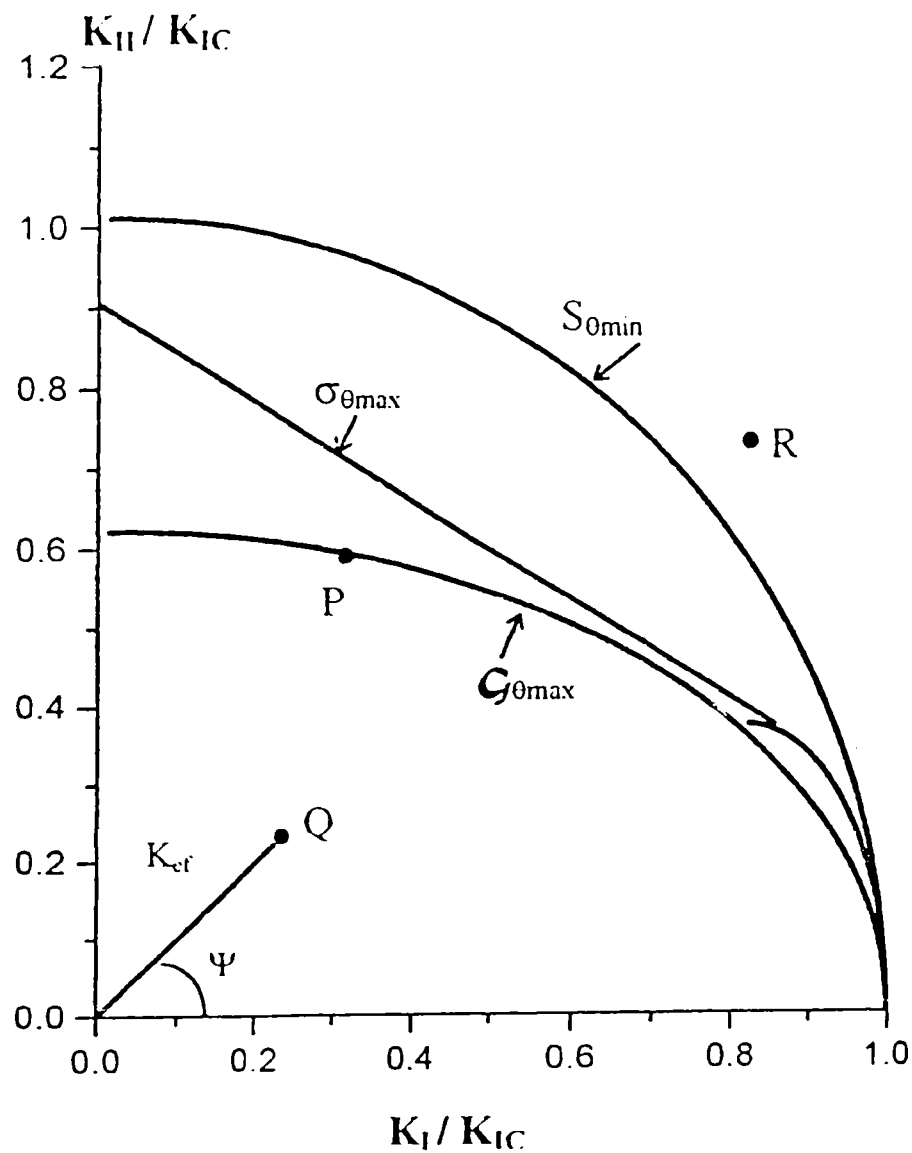


Fig. V- 44 [31]

Fiecare dintre teorii, reprezentate în fig. V-44 printr-o curbă, descrie cele domenii ale propagării fisurii. Astfel toate punctele Q de coordonate (K_{ef}, ψ) aflate în interiorul curbelor se află în domeniul propagării subcritice a fisurii (domeniul I). Punctele P, aflate pe curbe, reprezintă domeniul propagării stabile a fisurii (domeniul II) iar punctele R, aflate în afara curbelor, indică condițiile propagării instabile a fisurii.

Unghiul ψ , definit de relația (V.5), caracterizează modul mixt de deplasare a flancurilor fisurii:

$$\psi = \arctg \frac{K_{II}}{K_I} \quad (V.45)$$

Cele trei teorii estimează valori diferite ale direcției de propagare a fisurii, așa cum rezultă din fig. V-45. În fig. V-45 se observă că pentru valori mici ale unghiului ψ teoriile $\sigma_{\theta\max}$ dau aceleași valori pentru unghiul de propagare θ .

Unghiul de propagare θ [°]

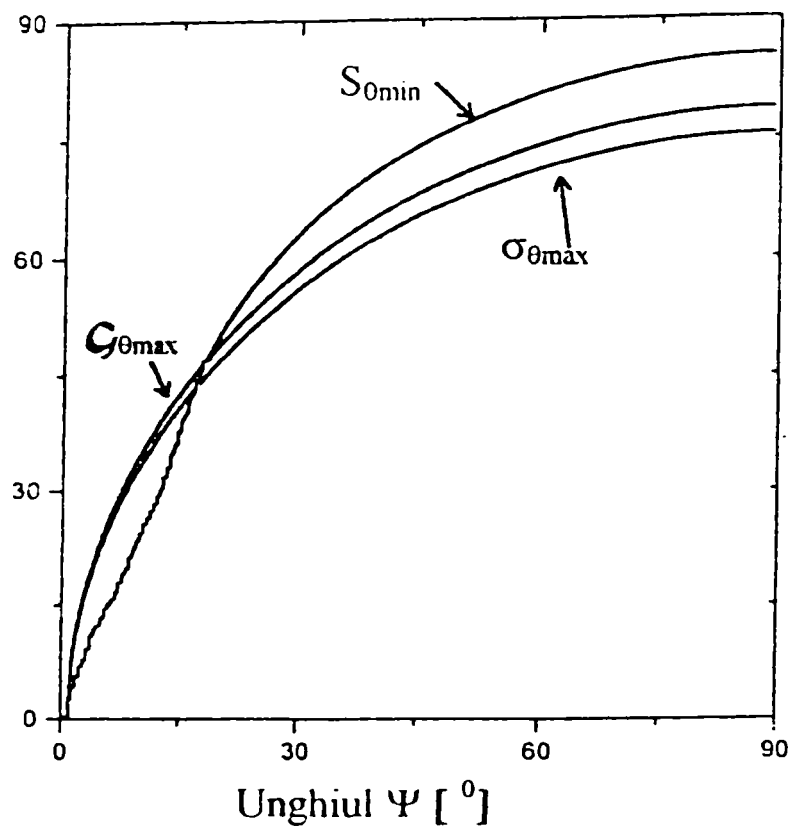


Fig. V- 45 [31]

Oricare dintre cele trei teorii sunt valabile pentru materialele izotrope, problema unghiului de propagare a fisurii fiind mai complicată pentru cazul materialelor anizotrope.

V.3.5.4 Rezistența la oboseală, curba Wöhler Aprecierea comportării unui material la sarcini variabile se face de obicei prin Wöhler. O asemenea curbă (Wohler) dă informații globale asupra durabilității materialului (amorsare + propagare + rupere). Curba Wöhler a fost prezentată detaliat la capitolul II.

Legat de etapele de evoluție a fisurii, o serie de studii au permis construirea de curbe care evidențiază calitativ fiecare etapă în parte (Fig. V-46).

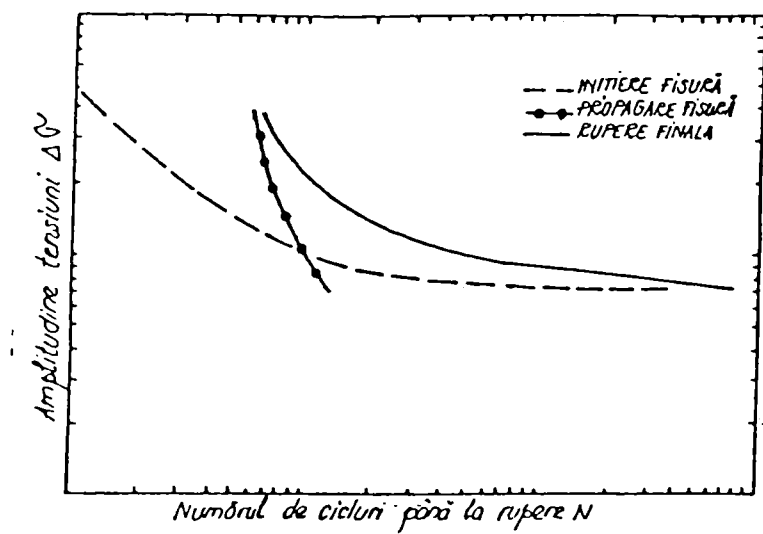


Fig. V- 46 [34] Curbă $\Delta\sigma$ -N cu separarea celor trei etape distincte

Extinderea celor două etape, respectiv de amorsare și de propagare, depinde de amplitudinea solicitării, geometria piesei, natura materialului, temperatură, solicitările anterioare, ecrusări etc.

Pe baza celor de mai sus este evident că încercările la oboseală sunt necesare pentru expertizarea nivelului de degradare a unor echipamente miniere.

V.3.5.5 Încercări la oboseală

În fig. V-47 sunt prezentate încercările la oboseală care se impun unui studiu cât mai complet privind evaluarea mecanismului de degradare în condițiile sarcinilor variabile.

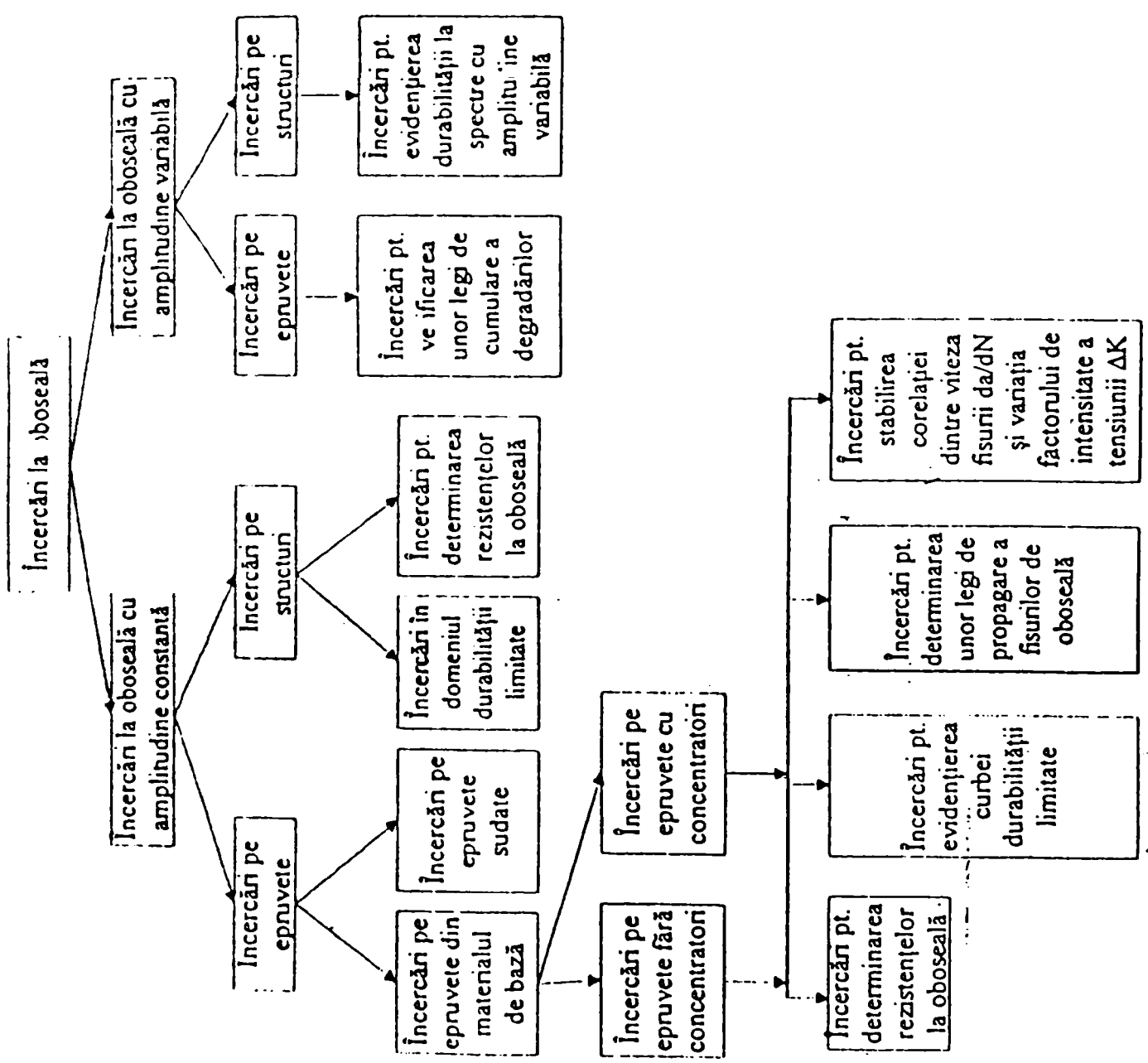


Fig. V- 47 [34]

V.3.5.5.1 Încercări la oboseală cu amplitudine constantă

Aceste încercări sunt cel mai ușor de realizat și pot fi efectuate atât pe epruvete cât și pe structuri de rezistență. Se descriu în continuare câteva încercărilor la oboseală cu amplitudine constantă asupra oțelului St52, analog cu OL52, utilizat în componența multor elemente din construcția excavatorului ERC 1400 și a mașinii de haldat IH 6500x900. Încercările au fost efectuate pe epruvete plate cu dimensiunile (295x85x4) mm și care au fost prevăzute în zona centrală cu o gaură având diametrul de 1 mm, din care au pornit două creștături ascuțite având lungimea de 0,5 mm (Fig. V-48) [122], [214].

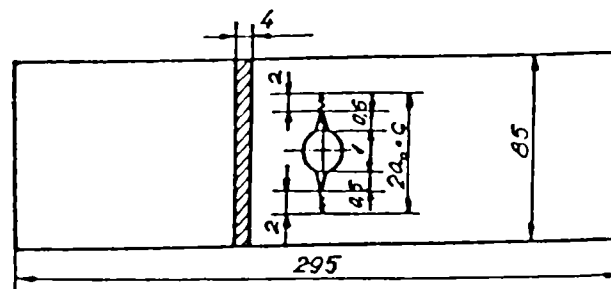


Fig. V- 48 [34], [122], [214]

În figurile V-49 , V-50 și V-51 s-a indicat influența tratamentului termic și a gradului de asimetrie R asupra perioadelor de inițiere a fisurii și a ruperii la oboseală [122] [214].

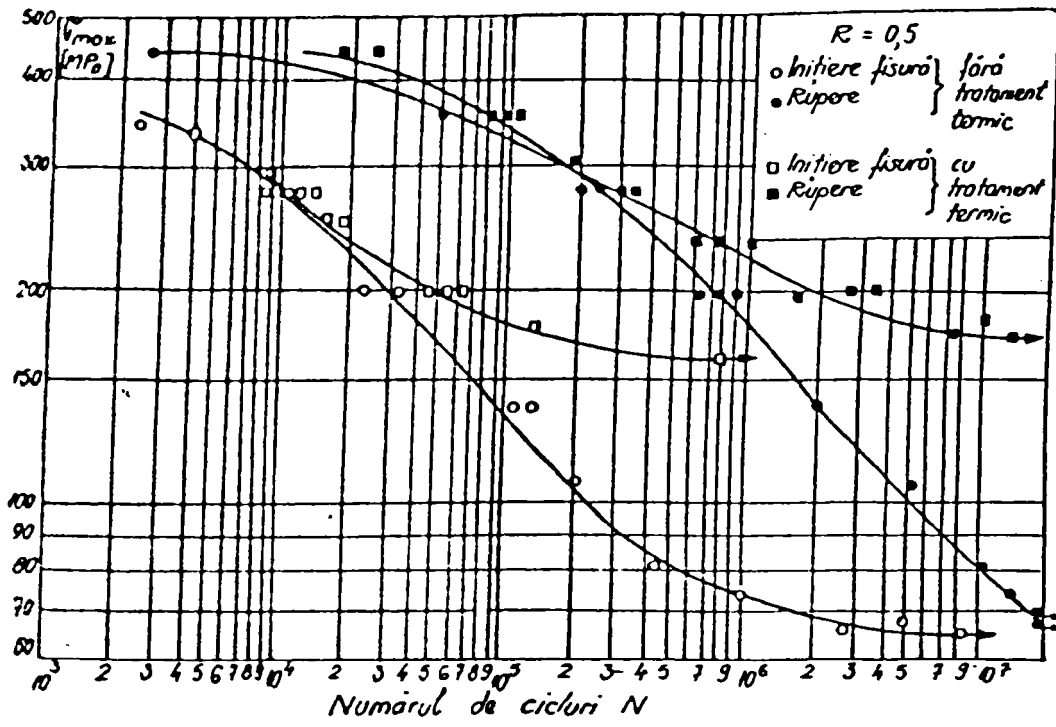


Fig. V- 49 [34], [122], [214]

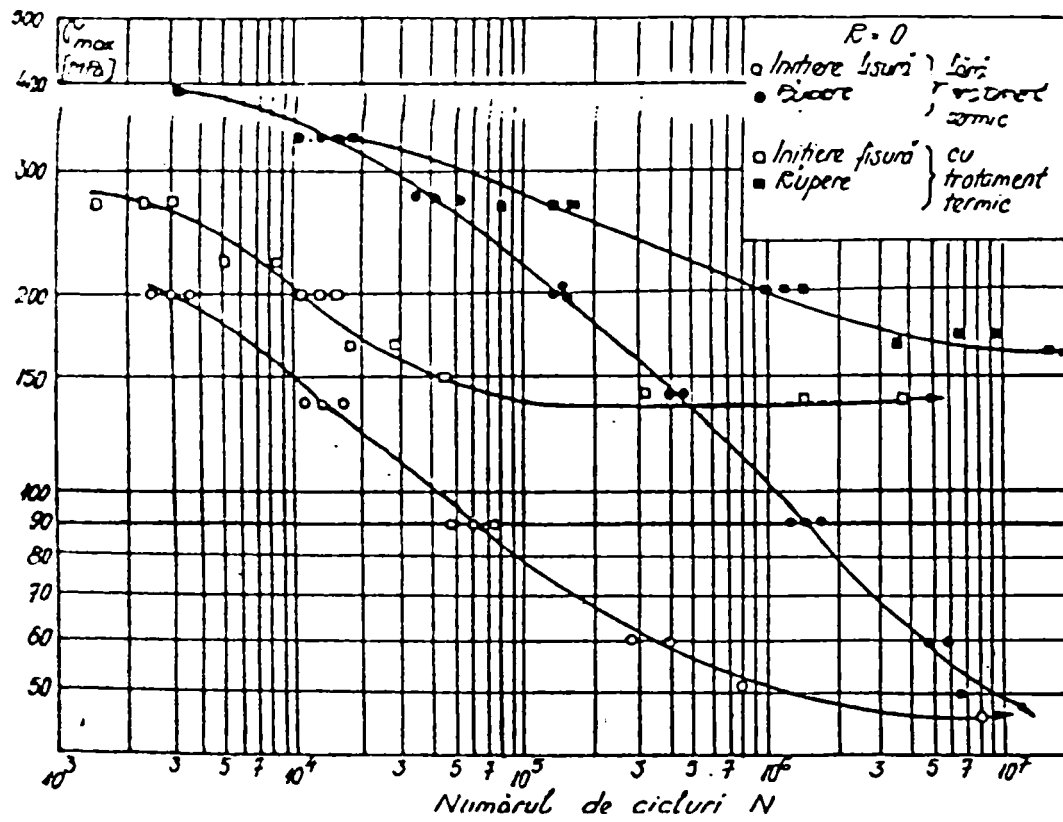


Fig. V- 50 [34], [122], [214]

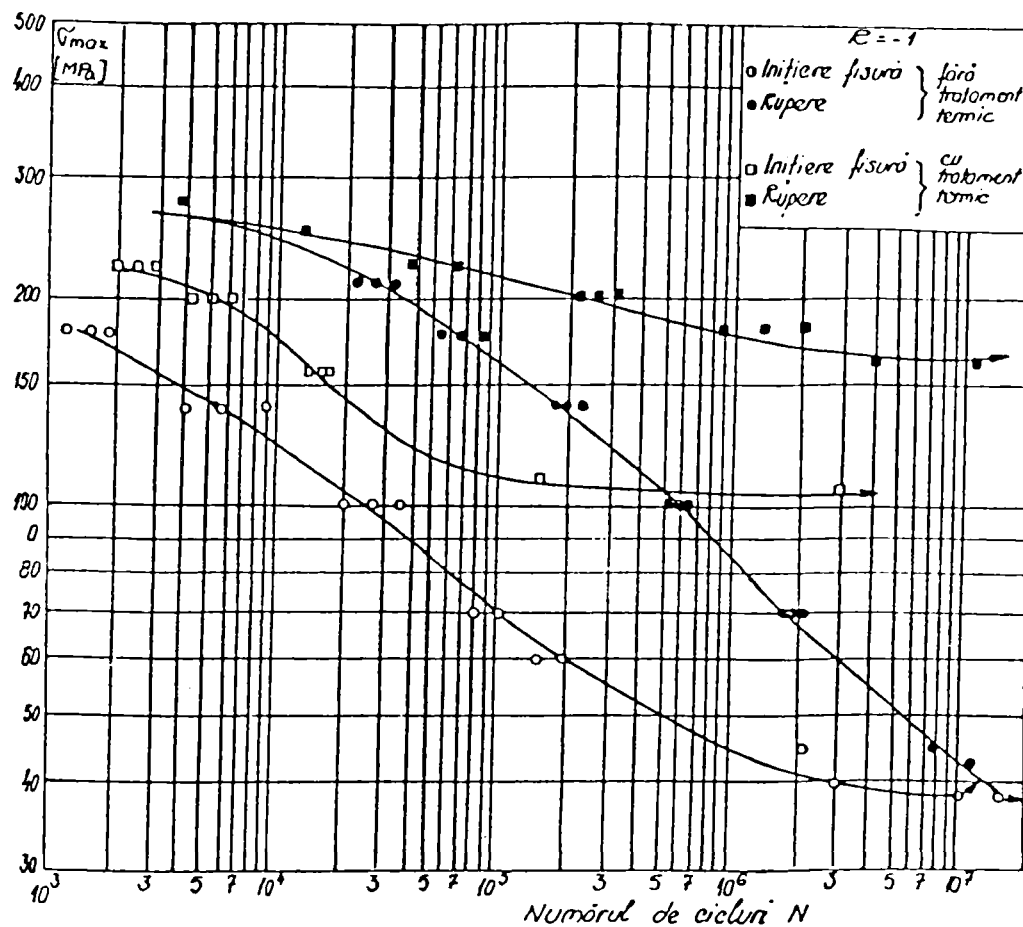


Fig. V- 51 [34], [122], [214]

Ca număr de cicluri necesar inițierii fisurii a fost considerat numărul de cicluri pentru care fisura extinsă din vârful celor două creștături ascuțite atinge lungimea $2a_1 = 0,2$ mm.

Din figurile V-49, V-50, V-51 se constată influența deosebită a gradului de asimetrie și a tratamentul termic atât asupra perioadei de inițiere a fisurii de oboseală cât și asupra duratei până la rupere a epruvetelor.

După ce fisura pe ambele sale ramuri a atins lungimea de $2a_0 = 6$ mm și când propagarea acesteia a devenit stabilă, s-au trasat diagramele de variație ale lungimii fisurii, pentru mai multe nivele de solicitare, în funcție de numărul ciclurilor aplicate.

În figurile V-52 și V-53 sunt prezentate diagramele de variație ale lungimii fisurii în funcție de numărul de cicluri pentru două grade de asimetrie $R = \sigma_{min} / \sigma_{max}$, atât pentru epruvetele tratate cât și cele netratate termic [214]. Pe baza acestor curbe, s-a putut determina viteza de propagare a fisurii pentru diferite lungimi ale acesteia la nivelul de solicitare aplicat.

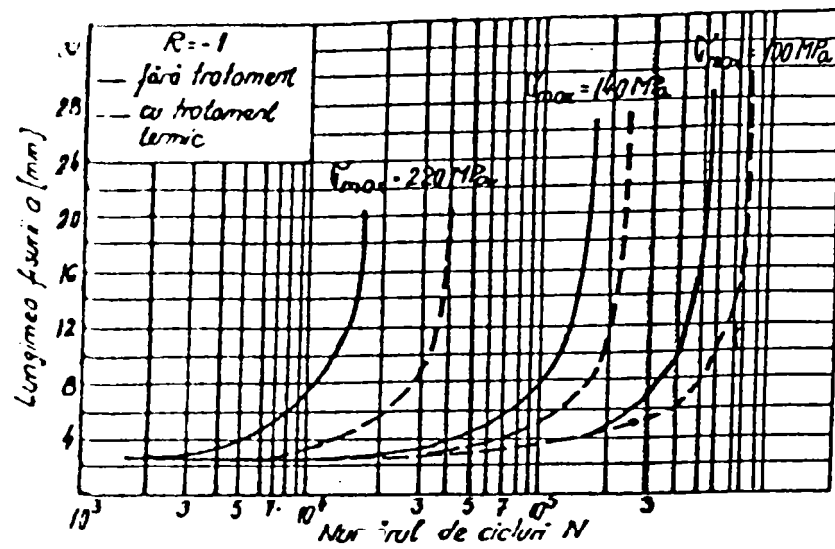


Fig. V- 52 [34], [244]

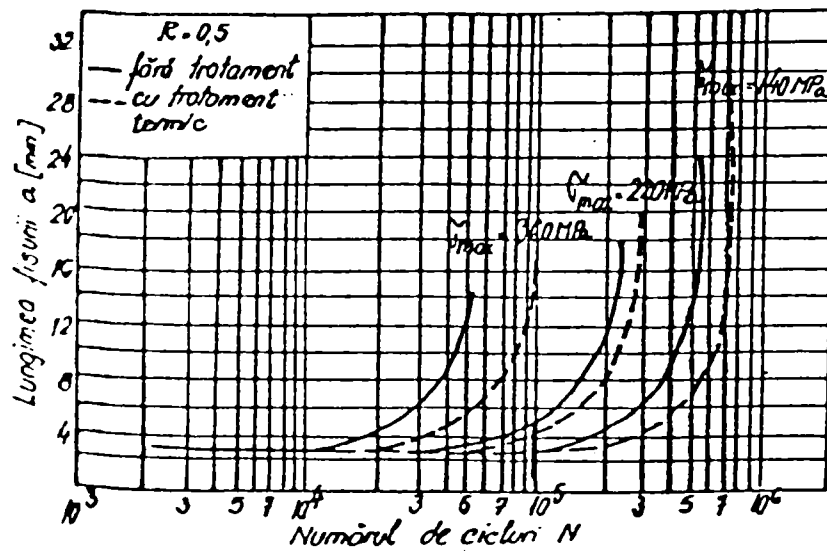


Fig. V- 53 [34], [244]

Considerând aceleași lungimi de fisuri s-a calculat pentru mai multe grade de asimetrie, variația factorilor de intensitate a tensiunii ΔK , pentru care, în condițiile date, există o soluție analitică de forma:

$$\Delta K = \Delta \sigma \sqrt{\pi a} \left[1 - 0,1 \left(\frac{2a}{b} \right) + \left(\frac{2a}{b} \right)^2 \right] \quad (\text{V.46})$$

unde $\Delta \sigma$ - reprezintă variația tensiunii aplicate; a - lungimea fisurii; b - lățimea epruvetelor.

Influența asimetriei poate fi confirmată de rezultatele experimentale înfățișate în fig. V-54, obținute pe un oțel St 52 netratat termic, cu metodică prezentată anterior, pentru trei grade de asimetrie [122]

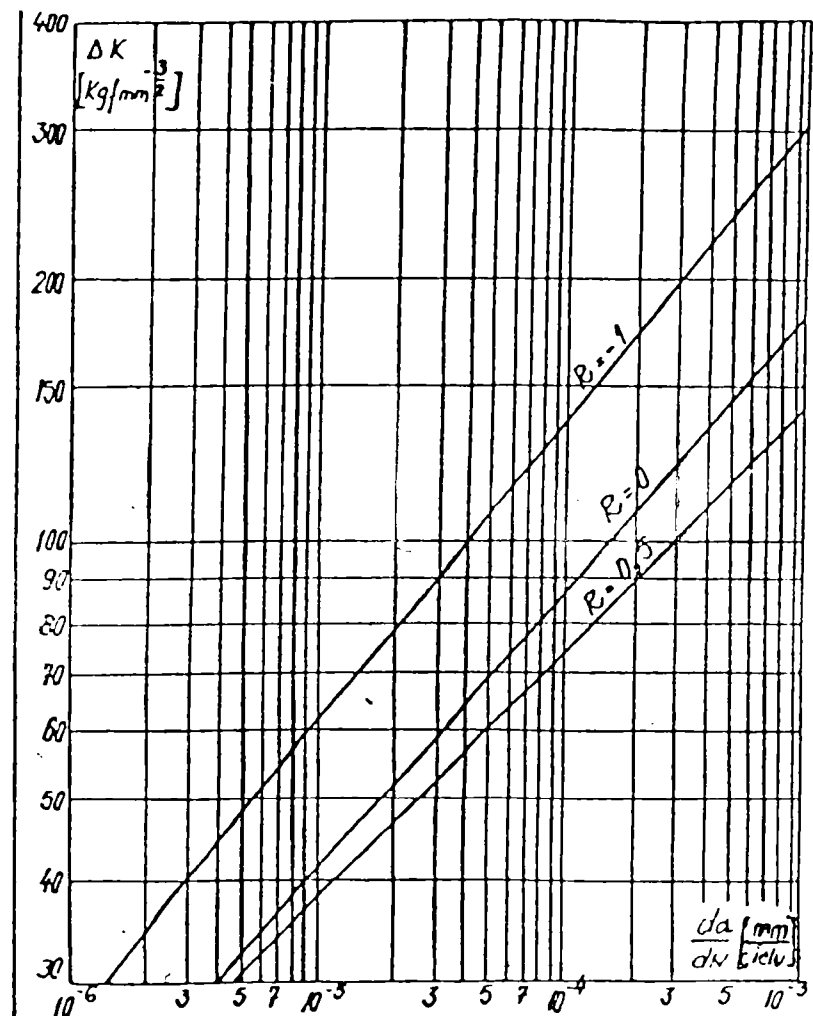


Fig. V- 54 [34], [122]

Obținerea unor asemenea diagrame $\Delta K = f\left(\frac{da}{dN}\right)$ permite stabilirea numărului de cicluri până la rupere pe baza unor programe de calcul care sunt analizate mai amănunțit în capitolul VI.

Încercările pe structuri (noduri, grinzi) sunt mai greu de realizat, necesitând executarea unor dispozitive atașabile mașinilor de încercări la oboseală.

Încercările la oboseală trebuie coroborate cu un riguros studiu microfractografic. Înainte de a începe încercările pe structuri sau epruvetele debitate din elementele de rezistență care au avut o perioadă de serviciu, se impune o riguroasă analiză microfractografică, pentru a evidenția în ce măsură au apărut stadiile I sau II [113] [184].

Pe parcursul încercărilor, evoluția degradării se poate urmări prin analiza microstructurii și prin încercări de microduritate în zonele în care se concentrează deformațiile. În fig. V-55 este înfățișată variația microduratei în funcție de distanța față de suprafața fisurii, așa cum rezultă din datele experimentale obținute de Bathias și Pelloux [40]

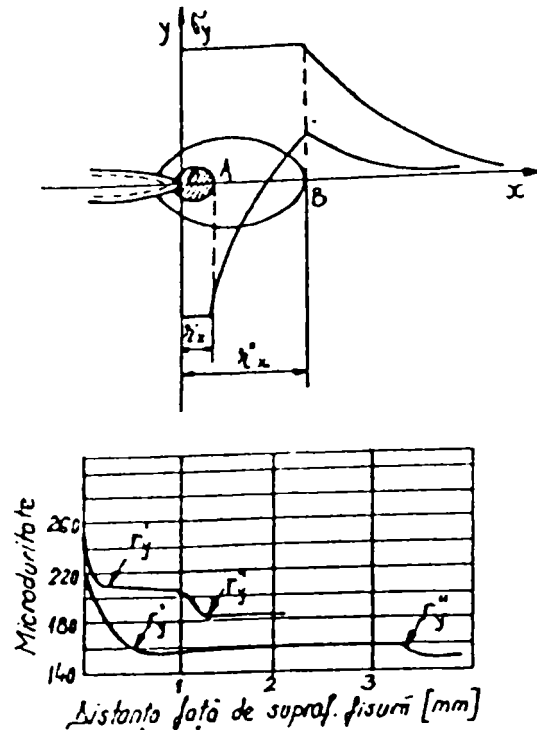


Fig. V- 55 [34], [40]

Pe baza evoluției microdurateții s-a putut stabili extinderea enclavei plastice stabilită de Hahn [120]:

$$r_p = 0,033 \left(\frac{\Delta K}{\sigma_c} \right)^2, \quad (V.47)$$

precum și extinderea zonei deformată elastic.

Încercările pe epruvete pot evidenția într-o primă fază în ce măsură se păstrează sau se modifică extinderea celor trei etape pentru materialul degradat și pentru materialul nesolicitat. Aceste studii, care trebuie să includă și stabilirea corelațiilor între da/dN și ΔK (variația lungimii fisurii în funcție de numărul de cicluri), pot constitui elemente de completare ale analizei, evidențiind aspecte noi ale fenomenului de oboseală.

Atenție deosebită trebuie acordată studiului rezistenței la oboseală a îmbinărilor sudate, în primul rând din cauza tensiunilor reziduale care există în asemenea îmbinări (Fig. V-56). Modul de variație al acestor tensiuni, care pot apărea pe direcție longitudinală sau transversală, este ilustrat în fig. V-56 . Tot în zonele îmbinărilor pot apărea defecte specifice materialului (fisuri, întrepătrunderi, porozități,

incluziuni etc.), care reduc considerabil rezistența la oboseală. În plus, în aceste zone se remarcă și un efect puternic de concentrare a tensiunilor [39].

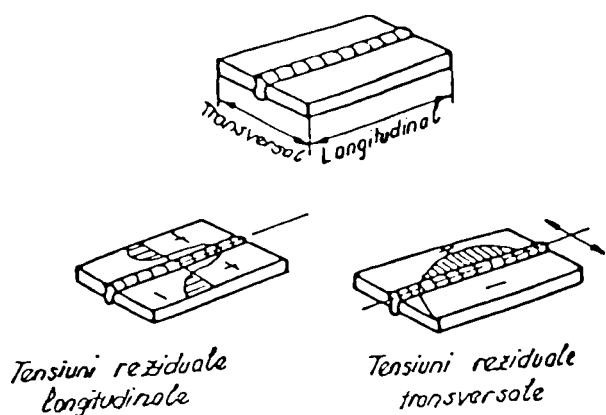


Fig. V- 56 [34]

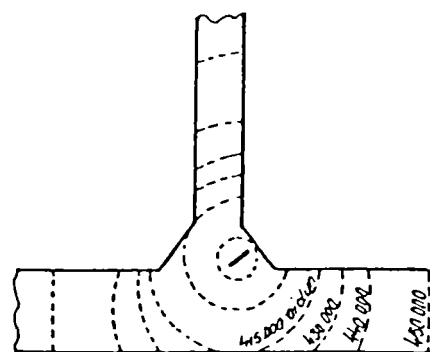


Fig. V- 57 [34]

În fig. V-57 este indicat modul cum s-a propagat, sub acțiunea sarcinilor variabile, o fisură inițiată în zona unei incluziuni de la o îmbinare sudată.

Un aspect specific încercărilor la oboseală este puternica dispersie a rezultatelor (Fig. V-58). Dispersia este determinată nu numai de tehnica experimentală, ea fiind specifică însuși mecanismului complex de desfășurare a fenomenului de oboseală. Dispersia implică utilizarea unui număr mare de epruvete în vederea prelucrării statistice a datelor experimentale. De obicei se trasează mai multe curbe de oboseală, fiecareia corespunzându-i o anumită probabilitate de rupere (Fig. V-59). La expertizarea stării materialului dispersia poate crea mari neajunsuri, întrucât anumite abateri ale mărimilor analizate la materialul degradat se pot încadra în limitele de dispersie specifice materialului original nesolicitat.

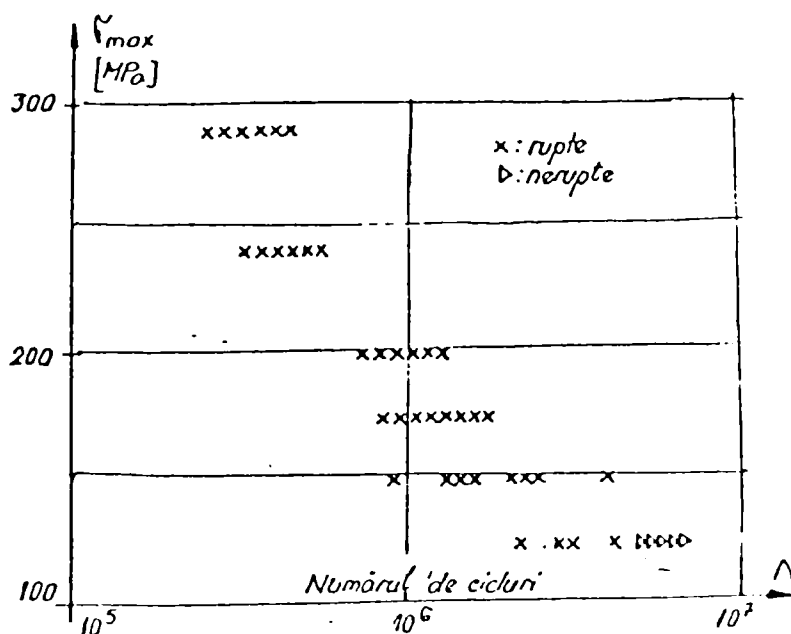


Fig. V- 58 [34] Dispersia rezultatelor la o încercare de încovoiere rotativă pentru un oțel Cr-Ni.

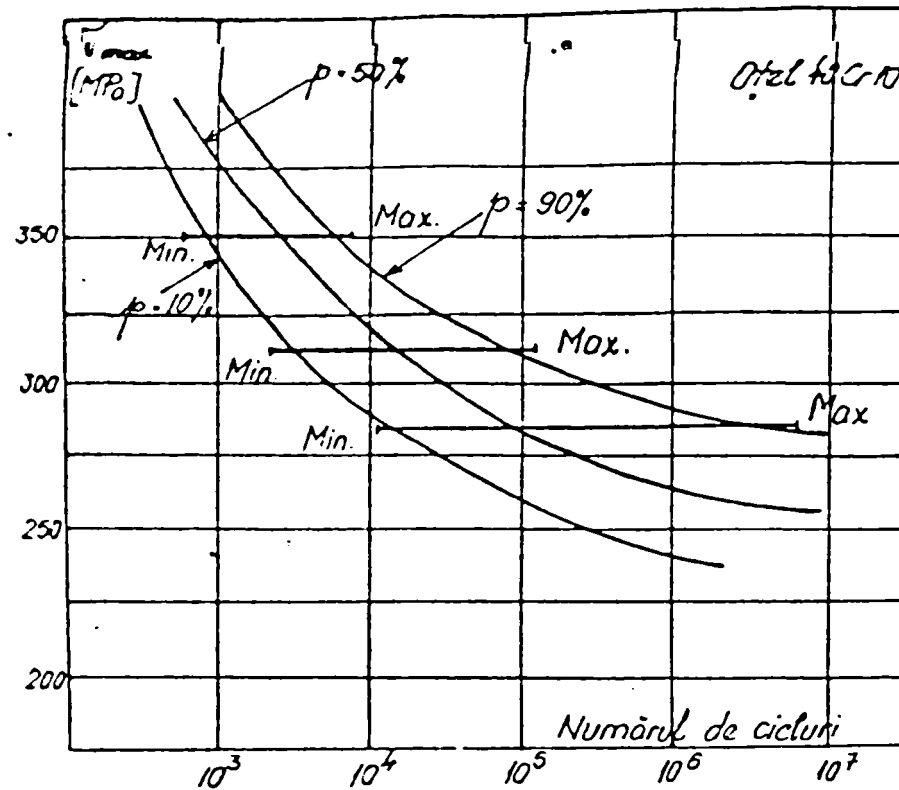


Fig. V- 59 [34] Curbe de oboseală pentru probabilități la rupere de 10%, 50%, 90%, la încercări de încovoiere rotativă a oțelului 40Cr10

Astfel devine dificilă aprecierea nivelului de degradare a materialului debitat în zonele intens solicitate. Dificultatea este amplificată de faptul că din asemenea zone nu pot fi decupat un număr suficient de mare de epruvete care să permită prelucrarea statistică a rezultatelor, mai ales că la aceste încercări dispersiile sunt și mai mari față de cele ale încercărilor pe epruvetele din materialul nesolicitat.

În practică problema este de a stabili - cunoscând spectrele reale de solicitare, de regulă de amplitudini variabile, și durata de aplicare a acestora - în ce măsură nivelul de degradare a unui element poate fi apreciat pe baza curbei de oboseală obținută în condițiile unui spectru cu amplitudine constantă (pe epruvete sau pe elementul considerat fără solicitări anterioare) cu aplicarea unui criteriu de degradare cumulativ. Problema, de mare complexitate, implică o analiză aprofundată, iar rezolvarea devine particularizată, în urma considerării factorilor semnalati la alineatul precedent.

V.3.5.5.2 Încercări la oboseală cu amplitudine variabilă

În mod obișnuit spectrele de solicitare induse în ER din SP ale UG sunt spectre aleatoare la care variația în timp a tensiunilor nu poate fi definită printr-o expresie matematică explicită.

În fig. V-60 este prezentat spectrul de solicitare înregistrat timp de 12 secunde în tirantul unui excavator ERC 1400, cu ajutorul semnalelor unor traductori rezistivi aplicați pe tirant, în condițiile unui regim de frezare (săpare) ușoară [83] [103].

Trebuie semnalat că la majoritatea UG starea de tensiune din diverse subansambluri este determinată în primul rând de încărcarea creată de greutatea proprie a subansamblelor componente. Cele de mai sus sunt explicitate prin analiza experimentală a stării de tensiune din mai multe secțiuni ale unor subansambluri de la mașina de stivuit T 2053 (Fig. V-61) [103].

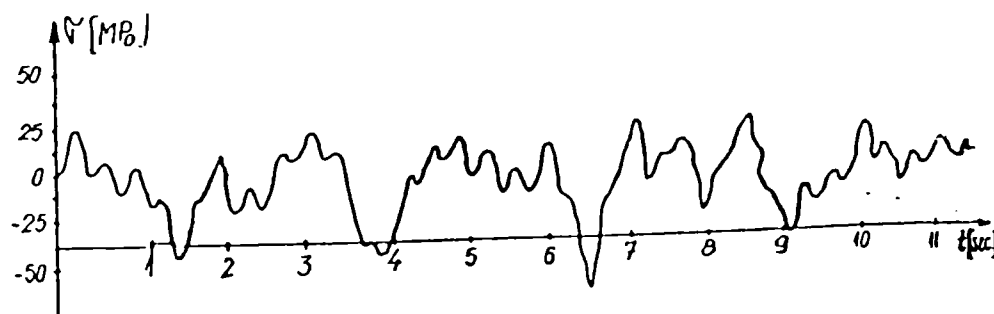


Fig. V- 60 [34]

În tabelul V-1 sunt prezentate valorile maxime ale tensiunilor măsurate în secțiune indicate provenind din greutatea proprie și din sarcinile suplimentare [103].

Tabelul V-1

Nr. trad	Tens. în regim dinamic [MPa]		Tens. din greut. proprie [MPa]	Tensiunea rezultată [MPa]	
	Încudăție înainte	Translație înapoi		(a)	(b)
	(a)	(b)			
1	+18,7	-13,2	-	+18,7	-13,2
2	+3	+2,5	-114	-111	-111,5
3	+16,8	-18,9	-58	-41,2	-76,9
4	-11,9	-9,3	-	-11,9	-9,3
5	-15,2	+16,5	-	-15,2	16,5
6	+1	+0,8	-80	-79	-79,2
7	-9,8	-8,6	-100	-109,8	-108,6
8	-9,9	+12,1	-45,6	-55,5	-33,5
9	+6,8	+6,8	-	+6,8	+6,8
10	-1,7	-5,5	-	-1,7	-5,5
11	1,5	-1,6	+45,6	+47,1	+54,0
12	-6,7	+5,6	-35,2	-41,9	-29,6
13	+9,9	-8,8	-143	-133,1	-151,8
14	-4,4	+3,3	-	-4,4	+3,3
15	-4,4	-4,4	-43,9	-48,3	-48,3

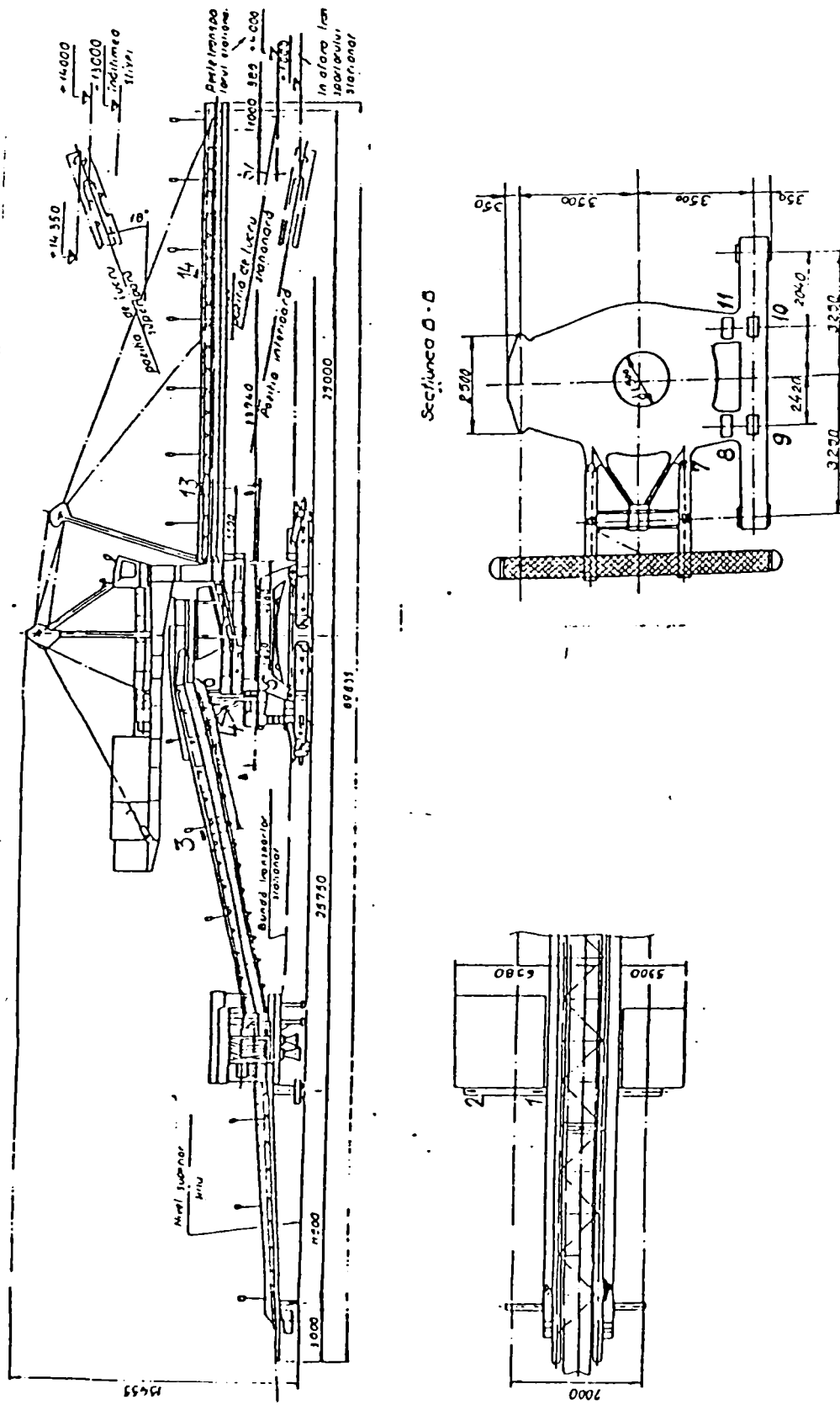


Fig. V- 61 [34]

În fig. V- 62 este prezentat un spectru aleator obținut într-o zonă cu concentrare de tensiune dintr-o placă suport de la o mașină de haldat, la care este indicată și variația în timp a sarcinii aplicate precum și a deformațiilor specifice în zona cu concentrator de tensiune [39].

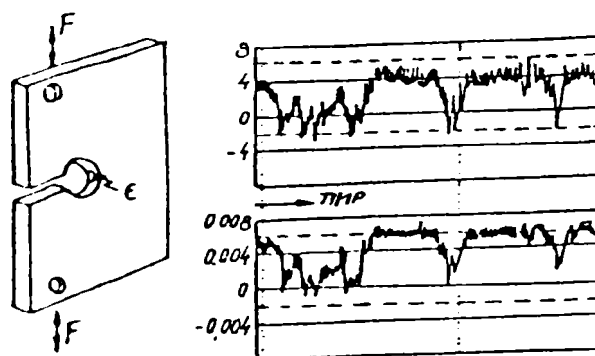


Fig. V- 62 [34], [39]

Pentru realizarea unor asemenea studii experimentale sunt necesare încercări la oboseală, cu programe prin care să simuleze spectrele de solicitare cât mai apropiate de cele reale. Pentru elucidarea unor probleme specifice acestor încercări în continuare sunt prezentate cele două metode folosite actualmente pentru studiul durabilității la sarcini aleatoare și anume: metoda digitală și metoda analogică.

Tehnica digitală controlează fiecare ciclu sau grup de cicluri cu amplitudine constantă. Metoda digitală a fost pusă la punct în cadrul Laboratorului Betriebsfestigkeit (L.B.F.) din Darmstadt. În cadrul metodei se folosesc blocuri programabile prin care pot fi obținute toate formele de distribuție ale solicitărilor.

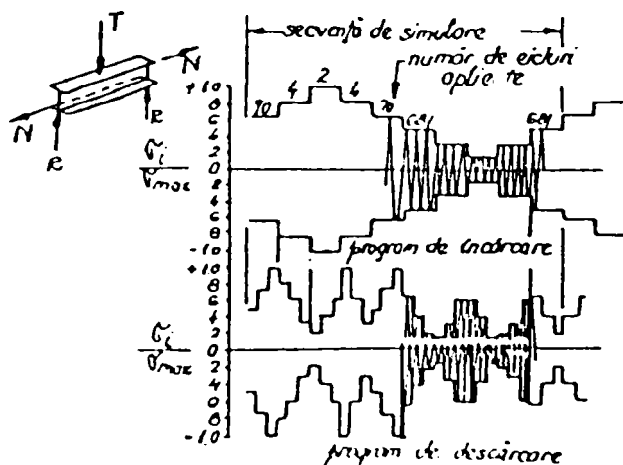


Fig. V- 63 [34] Secvență de solicitări de simulare a unor încercări la oboseală

Pe baza acestor încercări se trasează așa-zisele pseudocurve Wöhler, pentru diferite valori ale coeficientului "p" care caracterizează o anumită distribuție (Fig. V-64).

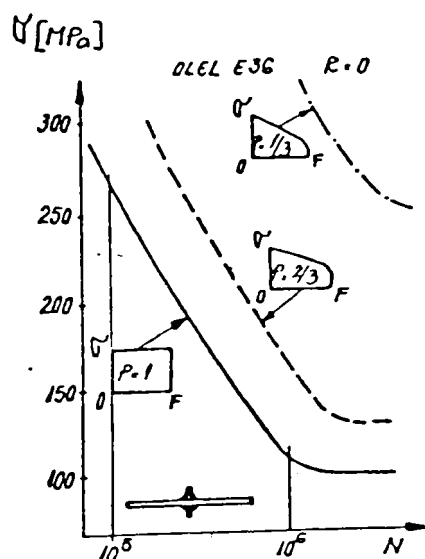


Fig. V- 64 [34] Pseudocurve Wöhler la încercările unei îmbinări sudate, pentru 3 valori ale lui "p", material de bază oțel E 36

Această metodă a fost aplicată în special pentru o serie de cercetări în industriile aeronautice și de automobile.

Metoda care utilizează tehnica analogică

În acest caz definirea ciclului nu mai poate fi făcută numai pe baza parametrilor:

- media pătratică (RMS, (root mean square):

$$RMS = \frac{1}{T} \int_0^T x^2(\tau) dt, \quad (V.48)$$

- densitatea spectrală de putere:

$$\varphi(f) = \lim_{B \rightarrow 0} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{BxT} \int_0^T x^2(t, B) dt, \quad (V.49)$$

unde: B – banda de frecvență; T – perioada

- coeficientul de neregularitate:

$$I = N_0/N_m,$$

unde: N_0 – numărul de treceri prin zero; N_m – numărul de maxime.

- factorul de vârf (creasta), definit ca raport între valoarea maximă a tensiunii și valoarea RMS.

Metoda de simulare în acest caz constă din filtrarea unui semnal brut astfel încât să se obțină o excitație ale cărei caracteristici să fie comparabile cu cele ale spectrelor care apar în serviciu la structura considerată. În fig. V-65 este indicat modul de obținere prin metoda analogică a unui spectru real [39]

Aplicarea spectrului

Spectrul indicat se poate aplica structurii, prin intermediul unei mașini de încercare cu program, în două moduri:

- prin folosirea unor paliere cu RMS constant;
- prin aplicarea de spectre aleatoare.

Principiul încercărilor analogice are la bază posibilitatea de simulare a frecvenței relative a solicitărilor dintr-un spectru real, printr-un proces aleator staționar echivalent. Se subliniază că această tehnică de încercare a structurilor are avantajul că respectă interacțiunea dintre tensiuni în cadrul ciclului de solicitare.

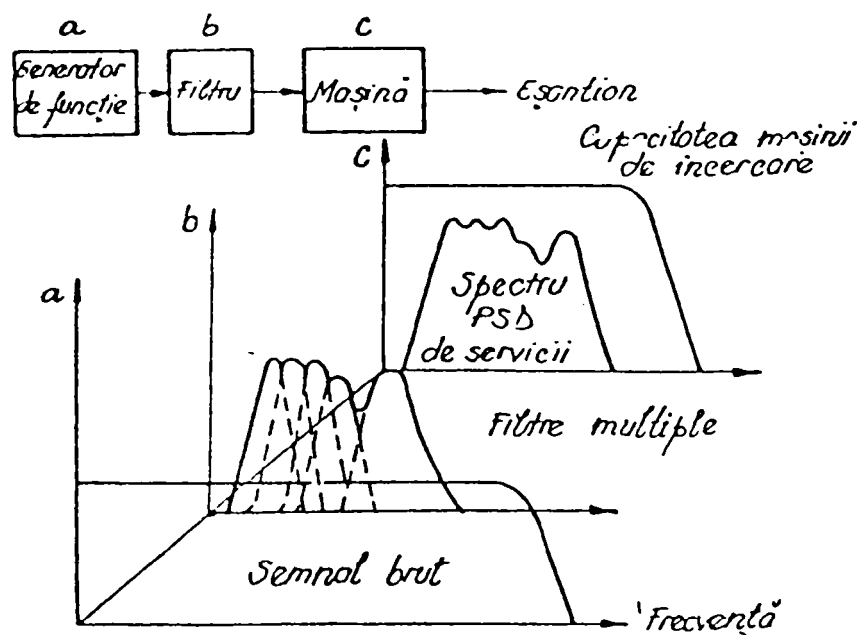


Fig. V- 65 [34]

V.3.5.5.3 Degradarea sub acțiunea spectrelor cu amplitudine variabilă

Mai sus s-au prezentat metodele de simulare bazate pe tensiuni cu amplitudini variabile, care, în condițiile reale de serviciu, sunt specifice celor mai multe structuri și piese. Dacă studiile se fac pentru un număr mic de cicluri ($N_R < 10^5$ cicluri), este preferabil de a utiliza amplitudinea deformației ca o caracteristică a solicitării. În literatură sunt indicate foarte multe criterii de degradare cumulativă. În cele ce urmează se va analiza criteriul lui Miner, utilizabil la încercările cu deformații impuse sau cu tensiuni impuse.

Numeroase cercetări arată că între numărul de cicluri N_R și deformația plastică macroscopică $\Delta\varepsilon_p$ există relația:

$$N_R^\alpha \Delta\varepsilon_p = C \quad (\text{V.50})$$

unde C și α sunt constante de material.

Dacă se admite că degradarea este o funcție de deformația plastică cumulată, utilizând relația de mai sus se poate defini degradarea pentru un singur ciclu de solicitare:

$$\frac{dD}{dN} = \left(\frac{\Delta\varepsilon_p}{C} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \quad (\text{V.51})$$

$$D = \sum_1^n \left(\frac{\Delta\varepsilon_p}{C} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \quad (\text{V.52})$$

Aceasta revine la aplicarea criteriului lui Miner la încercări unde amplitudinea deformațiilor este impusă. Rezultatele experimentale sunt date de obicei în coordonate $\log \Delta\varepsilon_p$ ($\log N$). Această metodă a fost aplicată de Kikukawa și Jono în cazul încercărilor de tracțiune-compresiune în domeniul oligociclic ($N < 10^5$ cicluri).

Landgraf apreciază durata de viață a epruvetelor supuse sarcinilor variabile prin repartizarea în secvențe. Fiecare secvență conține 30-50 cicluri care se repetă până la rupere. Degradarea se calculează pentru fiecare ciclu, aplicând ecuația generală a lui Manson-Coffin:

- la tensiunea medie nulă, tensiune medie nulă:

$$\frac{\Delta \varepsilon_t}{2} = \frac{\sigma'}{E} (2N_R)^b + \varepsilon' (2N_R)^C, \quad (\text{V.53})$$

- la tensiune medie variabilă

$$\frac{\Delta \varepsilon_t}{2} = \frac{\sigma' - \sigma_M}{E} (2N_R)^b + \varepsilon' (2N_R)^C, \quad (\text{V.54})$$

unde $2N_R$ – număr de cicluri până la rupere;

$\Delta \varepsilon_t$ – deformația specifică totală;

σ' , ε' , b , C - caracteristici ciclice de material, care se obțin prin încercări la deformații impuse.

Degradarea pe un ciclu de solicitare devine:

$$\frac{dD}{dN} = \frac{1}{2N_t} \left(\frac{\Delta \varepsilon_p}{\Delta \varepsilon_e} \right)^{\frac{1}{b-C}}$$

(V.55)

unde: $2N_t$ – abscisa punctului de intersecție a dreptelor "elastice" și "plastice" din diagrama lui Manson-Coffin;

$\Delta \varepsilon_e$, $\Delta \varepsilon_p$ – amplitudinile deformațiilor elastice, respectiv plastice.

V.4 CONCLUZII

V.4.1 Concluzii privind aplicarea metodologiilor de analiză a sensibilității la fisurare și rupere fragilă pentru expertizarea UG

V.4.1.1 Programul de cercetări pentru determinarea sensibilității la fisurare și la rupere fragilă a oțelurilor pentru construcții sudate, expus la punctul V.3.1 se bazează pe o comparație de caracteristici mecanice: ale materialului din care este executat ER critic cel mai solicitat, pe epruvete debitate chiar din ER respectiv, și cele de material identic cu cel din care a fost executat ER, dar la starea inițială, adică (nesolicitat). Analiza comparativă a caracteristicilor structurale mecanice și de tenacitate este eficientă, dacă există o identitate între materialul nesolicitat în prealabil, din care se confecționează epruvete, și materialul debitat din ER solicitat la maximum.

V.4.1.2 Pe lângă metoda distructivă de urmărire a sensibilității la fisurare și la rupere fragilă se pot utiliza și metode nedistructive. Dar acestea din urmă sunt mai puțin sigure și necesită, în laborator, încercări de lungă durată.

V.4.1.3 Procedurile descrise la punctele V.3.2, V.3.3, V.3.4 trebuie corelate cu cele de la punctul V.3.5, în special cu cele referitoare la cumulara degradărilor, a propagării fisurilor și a interpretărilor fractografice. De asemenea, este necesară corelarea rezultatelor de la punctele V.3.2, V.3.3, V.3.4 cu alte procedee de investigație, precum: microduritatea măsurată "in situ" pe ER cel mai solicitat, explorarea ansamblului cu ultrasunete sau cu raze X, pulberi magnetice, lichide penetrante etc.

V.4.1.4 Concluziile și garanțiile privind durata de utilizare a utilajului în condiții de exploatare, inclusiv la temperaturi de -20°C, trebuie să țină seama și de efectul coroziunii, având în vedere regimul de lucru al utilajelor destinate manipulării cărbunelui în CET și excavării lui în exploatările de suprafață. Deoarece sunt puține rezultate asupra acestui gen de solicitare, a factorilor de mediu, trebuie inițiate programe de cercetare despre influența factorilor de mediu asupra comportării de durată a structurilor sudate.

V.4.1.5 Concluziile privind perioada de mentenabilitate a ansamblului agregatului se vor filtra prin gradul de probabilitate al determinărilor și prin interpretarea probabilistică a ratei de defectare (curba "cada de baie"), ținând seama că utilajele ce se examinează se găsesc în perioada a III-a de uzură, rata defectărilor bruște crescând în timp. În sistemele reparabile, cum este un ansamblu din domeniul examinat, componentele care nu sunt supuse mentenanței sau sunt nereparabile încep să cadă

V.4.1.6 Pentru a fundamenta statistic, respectiv pentru a trage concluziile cele mai corecte privind starea de degradare a oțelurilor, este necesar ca numărul de epruvete să fie suficient de mare, iar dacă nu este prevăzut în documente normative, să fie stabilit prin acordul factorilor interesați de expertize.

V.4.2 Concluzii asupra încercărilor la oboseală

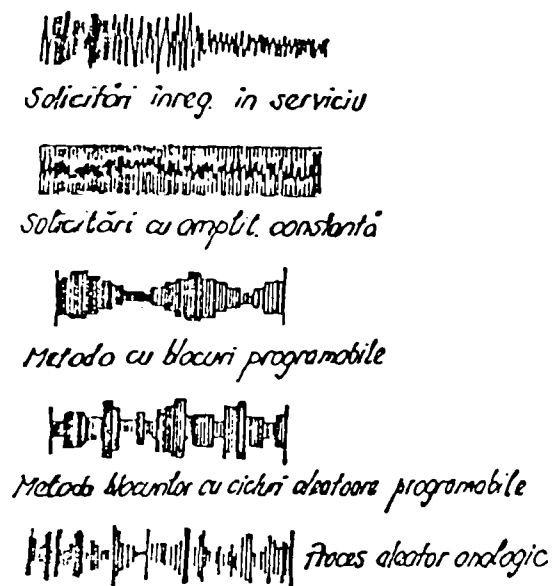
V.4.2.1 Din materialul prezentat rezultă că la baza verificărilor ER sau o SP supuse la sarcini variabile în timp stau încercările de laborator care simulează solicitările de serviciu. Metoda cea mai simplă constă în efectuarea încercărilor cu amplitudine constantă (metoda Wöhler).

Realizarea unor mașini de încercări la oboseală perfecționate au permis efectuarea unor studii la care spectrele se apropie tot mai mult de cele din serviciu.

În particular, când solicitările au un caracter staționar se pot utiliza în mare măsură metodele de încercare cu program:

- metoda blocurilor programabile;
- metoda blocurilor cu cicliuri aleatoare programate;
- metoda analogică aleatoare.

În fig V-66 este reprezentat un ciclu real înregistrat în serviciu și mai multe moduri de încercări cu programe ale căror spectre se apropie mai mult sau mai puțin de spectrul real.



Metoda blocurilor programabile este cea mai aplicată și se caracterizează prin:

- simplitate în rezolvarea,
- posibilitatea studiului distribuirii solicitărilor cu ajutorul a doi parametri;
- prezentarea rezultatelor sub formă de curbe Wohler.

Această metodă are însă un dezavantaj: nu ia în considerare interacțiunea tensiunilor în cadrul spectrului.

Celelalte două metode sunt mai complicate, atât în ceea ce privește realizarea spectrului pe instalațiile de încercări, cât și în privința prelucrării datelor obținute.

V.4.2.2 La evaluarea nivelului de degradare a unor ER este necesar să fie cunoscute cât mai multe detalii privind starea SP sau a ER analizat. De asemenea trebuie testat fenomenul de îmbătrânire a oțelurilor în special susceptibilitatea inițială la îmbătrânire.

V.4.2.3 La expertizări trebuie acordată atenție zonelor îmbinărilor sudate, știut fiind că, din cauza concentratorilor (defecte de sudare de tipul netopiri, nepătrunderi, incluziuni solide și fisuri în suduri și zonele influențate termic), cel mai frecvent ruperile la oboseală se produc în aceste zone.

V.4.2.4 Pe baza celor de mai sus, în fig. V-67 este schematizat un mod de determinare a duratei de viață, bazat pe rezultatele obținute prin încercări la oboseală, pentru brațul port rotor cu cupe (braț al roții cu cupe) al unui excavator.

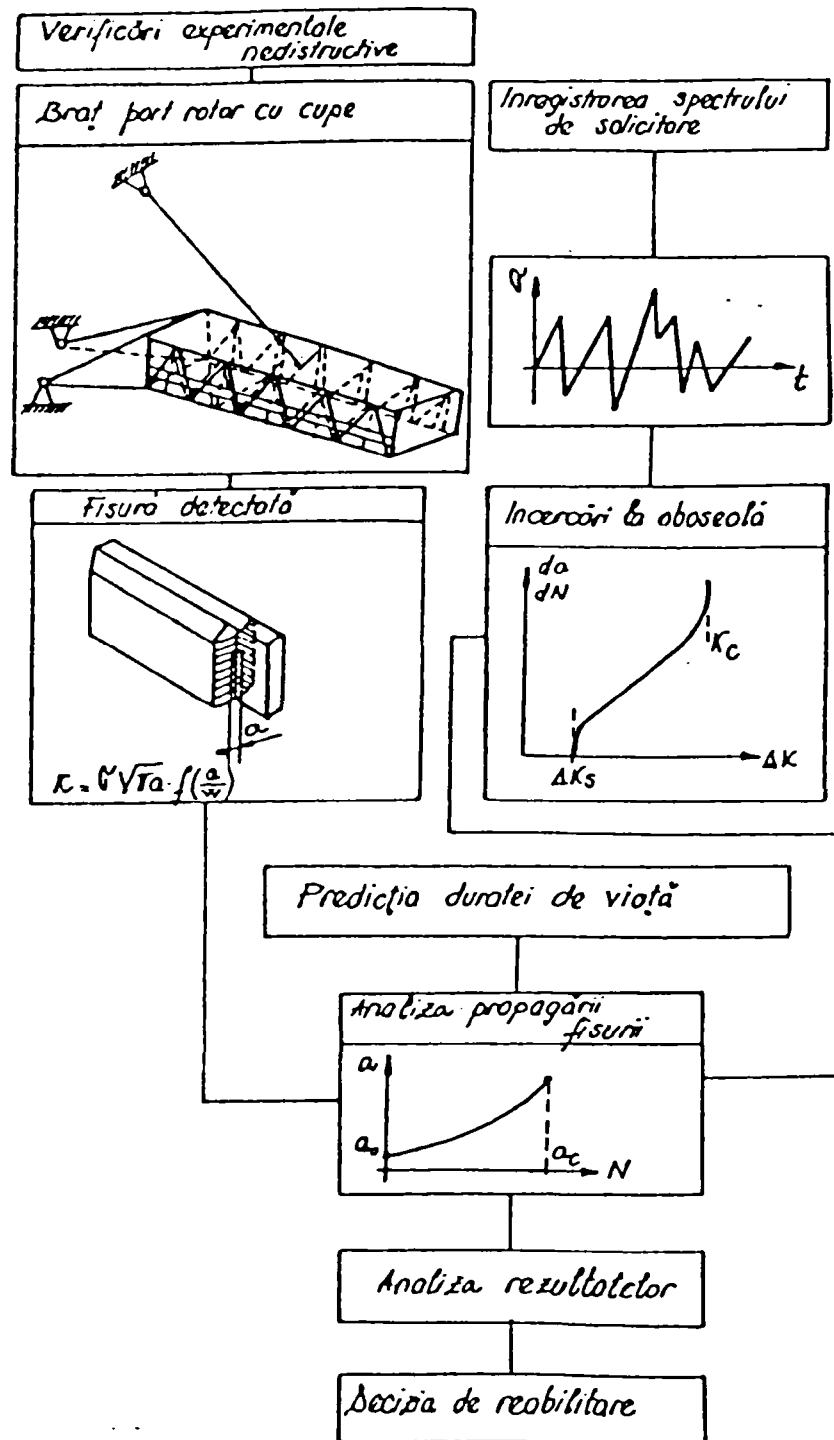


Fig. V- 67 [34] Lucrări de determinare a duratei de viață a unui braț de roată cu cupe, prin încercări la oboseală

Capitolul VI

CERCETĂRI PRIVIND ESTIMAREA DURABILITĂȚII ELEMENTELOR DE REZISTENȚĂ, APLICÂND CONCEPTELE MECANICII RUPERII

VI.1 STUDIUL ESTIMĂRII SIGURANȚEI ÎN EXPLOATARE ȘI A DURABILITĂȚII UNOR GRINZI

Grinzile sunt elemente de rezistență (ER) caracteristice structurilor portante (SP) ale utilajelor grele din minerit (UG). Mai jos se prezintă, după [31], un studiu de estimare a durabilității unei grinzi cu fisură, în două ipoteze de dispunere a fisurii în raport cu distanța dintre reazeme - "l":

- fisură centrală, situată la $\frac{1}{2}$ din "l";
- fisură situată la $\frac{1}{4}$ din "l".

VI.1.1 Determinarea durabilității unei grinzi cu fisură centrală [31]

Geometria grinzii – conform fig. VI-1.

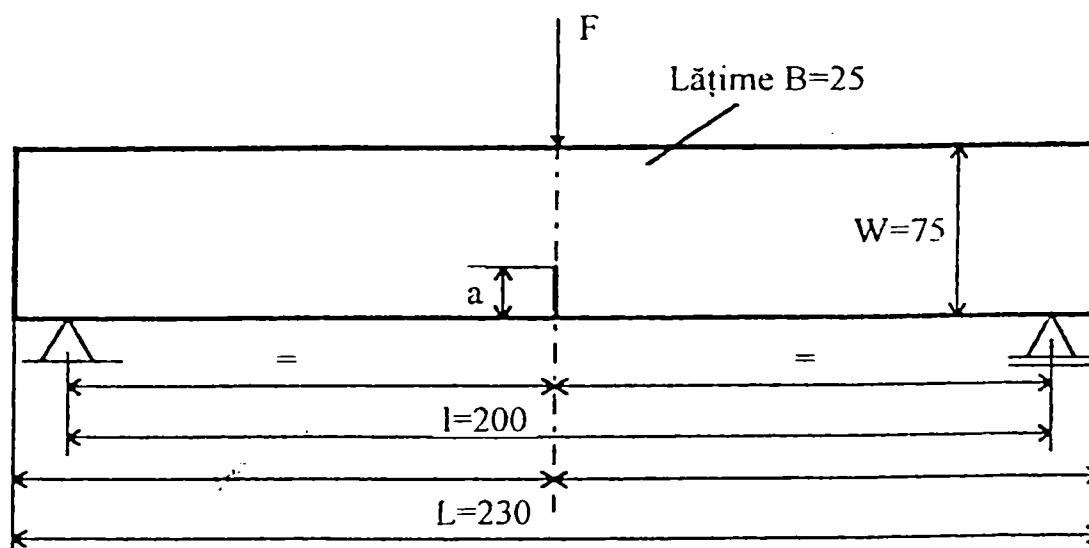


Fig. VI-1 [31]

Trebuie determinat factorul de intensitate a tensiunii, deoarece, pentru raportul $1/W = 2,67$, în literatura tehnică nu există o soluție analitică (există soluții analitice numai pentru $1/W = 4$ sau 8); în prealabil se determină tensiunea maximă din grindă.

Determinarea tensiunii maxime

Tensiunea maximă, manifestată la mijlocul grinzii, s-a făcut prin:

a) calcul analitic:

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{I \max}}{W_z} = \frac{Fl}{bw^2} = \frac{3 \cdot 10000 \cdot 200}{2 \cdot 25 \cdot 75^2} = 21,33 \text{ MPa} \quad (\text{VI.1})$$

b) determinare numerică a tensiunilor și a parametrilor de mecanica ruperii, cu programul FRANC2D/L.

Modelarea cu elemente finite a grinzii fără fisură s-a realizat utilizând 1380 de elemente finite triunghiulare cu 2 noduri, conectate între ele în 2883 noduri, fig. VI-2.

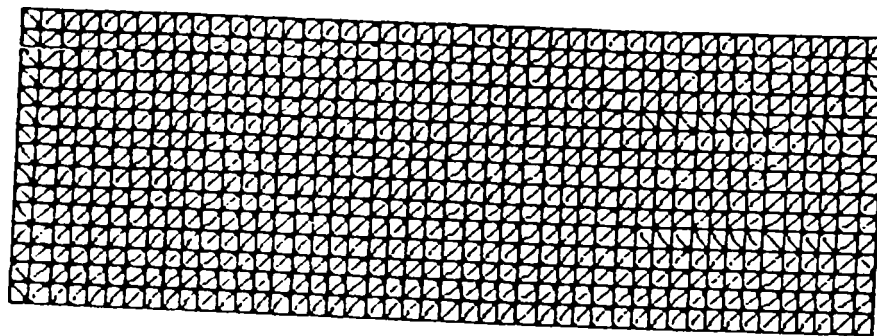


Fig. VI - 2 [31]

După definirea rezemărilor, a încărcărilor și a caracteristicilor de material (materialul grinzii: oțel $E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ MPa}$, $\nu = 0,3$ și $K_{IC} = 3400 \text{ N/mm}^{3/2}$), s-a rulat, obținându-se valoarea tensiunii maxime $\sigma_{\max, \text{MEF}} = 21,75 \text{ MPa}$.

Rezultatul validează modelul considerat, având în vedere abaterea mică dintre valoarea analitică și cea obținută prin MEF:

$$\Delta = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\max, \text{MEF}}}{\sigma_{\max}} = \frac{21,33 - 21,75}{21,33} \cdot 100 = -1,97\%, \quad (\text{VI.2})$$

Determinarea factorului de intensitate a tensiunii

Pentru determinarea factorului de intensitate a tensiunii s-au definit, succesiv, fisuri de diferite lungimi, începând de la lungimea "a" = 5 mm. După definirea unei fisuri, programul FRANC2D/L șterge elementele din zona fisurii și rediscreditează, folosind elemente finite izoparametrice, care creează singularitatea câmpului de deformații și tensiuni în vârful fisurii. Pentru fisura de lungime 10 mm, zona rediscritizată a vârfului fisurii este prezentată în fig. VI-3

După o nouă rulare, se obțin, pe lângă deplasări, deformații și tensiuni, și valorii factorilor de intensitate a tensiunii, K_I și K_{II} . Pentru fisura situată la mijlocul grinzii, factorul de intensitate a tensiunii K_{II} are valoarea nulă, indiferent de lungimea fisurii, ceea ce înseamnă că deplasarea flancurilor fisurii se realizează numai prin rotații (A se vedea Cap. 11).

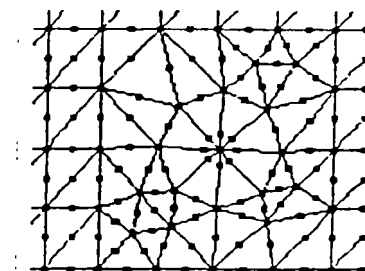


Fig. VI-3 [31]

Rezultatele obținute sunt înscrise în tabelul VI-1 și în fig. VI-4 .

Tabelul VI-1 [31]

Nr. crt.	Lungimea fisurii "a" [mm]	Factorul de intensitate a tensiunii K_I [N/mm ^{3/2}]
1	5	72,5
2	10	98,8
3	15	120,8
4	20	143,8
5	25	169,9
6	30	202,2
7	35	243,4
8	40	298,4
9	45	375,5
10	50	487,9
11	55	669,6
12	60	984,6
13	65	1657,1
14	70	3579,4

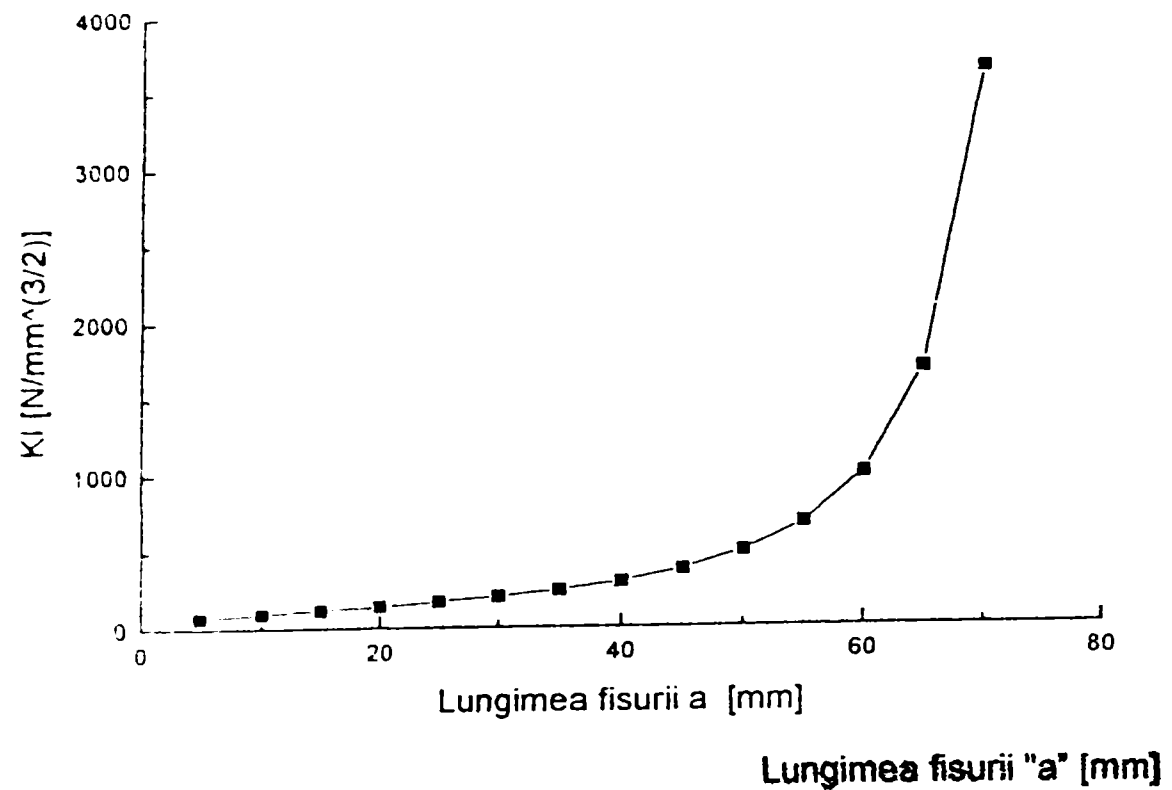


Fig. VI-4 [31]

Propagarea fisurii

Propagarea fisurii s-a realizat cu ajutorul programului FRANC2D/L, cu comanda PROPAGATE. Propagarea se obține pe baza legii lui Paris, în care se introduc valorile caracteristice ale oțelului St 52: coeficientul $C = 3,92 \cdot 10^{-10}$ și exponentul $n = 2,82$. Incrementul utilizat pentru propagarea fisurii – $da = 5$ mm. La fiecare creștere a fisurii, programul a rediscretizat zona adiacentă vârfului fisurii, a rulat și a determinat valoarea factorului de intensitate a tensiunii. Rularea a durat 48 minute. A rezultat lungimea critică a fisurii $a_c = 71,85$ mm, lungimea fisurii la care factorul de intensitate a tensiunii K_I atinge valoarea critică $K_{Ic} = 3400$ N/mm^{3/2}. Aceasta se atinge după $N_c = 314\ 879$ cicluri.

VI.1.2 Determinarea durabilității unei grinzi cu fisură situată la ¼ din din distanța dintre reazeme [31]

Geometria grinzii - ca și în cazul precedent, modificând doar poziția la care se situează fisura, conf. fig. VI-5 (la această poziție, $M_i = 250000$ N mm, iar $\sigma = 10,67$ MPa) .

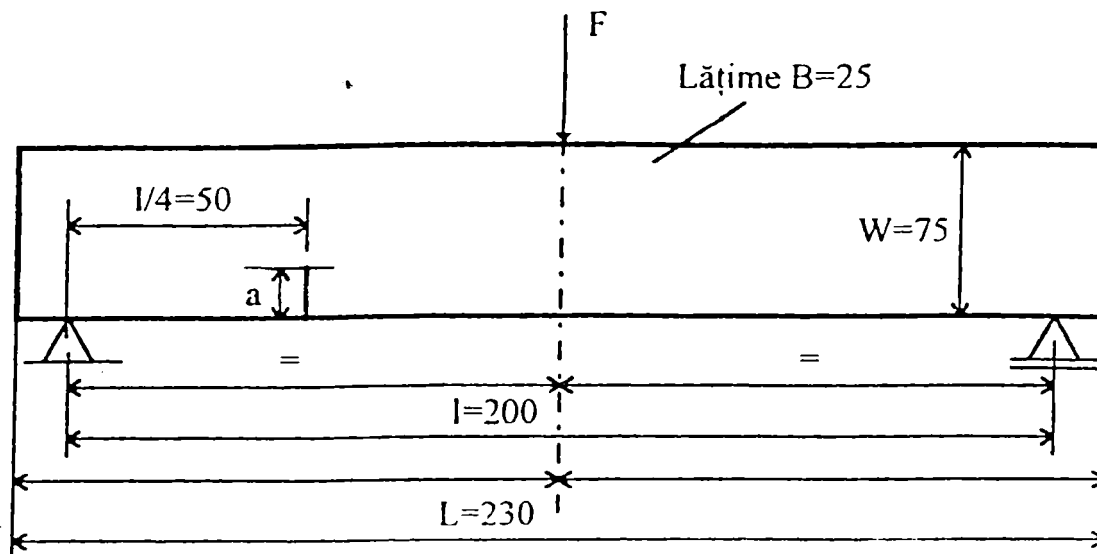


Fig. VI-5 [31]

Modelarea cu elemente finite - ca și în cazul precedent.

Determinarea factorului de intensitate a tensiunii

După definirea unei fisurii, de lungime "a" = 5 mm, la un sfert din distanța dintre reazeme, rediscretizare și rulare s-au obținut valorile factorilor de intensitate a tensiunii:

$$K_I = 44,87 \text{ N/mm}^{3/2} \text{ și } K_{II} = 1,88 \text{ N/mm}^{3/2}$$

Se observă apariția ambelor moduri (I și II) de deplasare a flancurilor fisurii (A se vedea capitolul II).

Propagarea fisurii. Pornind de la o lungime inițială a fisurii, a = 5 mm, propagarea s-a realizat cu comanda PROPAGATE (incrementul da = 5mm).

Rezultatele obținute (după 61 de minute de rulare) sunt prezentate în tabelul VI-2 ; în ultima coloană este înscris factorul de intensitate a tensiunii efectiv K_{ef} , calculat cu relația V.40 (cap. V)).

Tabelul VI-2 [31]

Nr. crt.	Lungime fisură	Coordonatele vârfului fisurii		Factorul de intensitate a tensiunii	Factorul de intensitate a tensiunii	Factorul de intensitate efectiv
		a	x			
	[mm]	[mm]	[mm]	[N/mm ^{3/2}]	[N/mm ^{3/2}]	[N/mm ^{3/2}]
1	5,16	65,12	5,15	44,9	1,88	44,94
2	10,32	65,66	10,29	62,3	2,93	62,37
3	15,48	66,68	15,35	78,3	2,65	78,34
4	20,64	68,03	20,33	95,0	3,16	95,05
5	25,80	69,71	25,20	114,7	1,65	114,71
6	30,96	71,54	30,03	137,4	1,68	137,41
7	36,12	73,48	34,81	166,0	0,72	166,00
8	41,28	75,46	39,58	201,4	-0,39	201,40
9	46,44	77,42	44,35	249,8	-0,87	249,80
10	51,60	79,35	49,13	315,0	-3,38	315,02
11	56,76	81,17	53,96	413,2	-6,57	413,25
12	61,92	82,85	58,84	569,1	-1,15	569,10
13	67,08	84,32	63,79	856,1	-22,28	856,39
14	72,24	85,53	68,80	1499,3	-45,75	1500,0
15	77,39	86,44	73,88	3723,5	-134,7	3725,93

Deformata grinzii obținută în urma analizei cu elemente finite este prezentată în figura VI-6 .

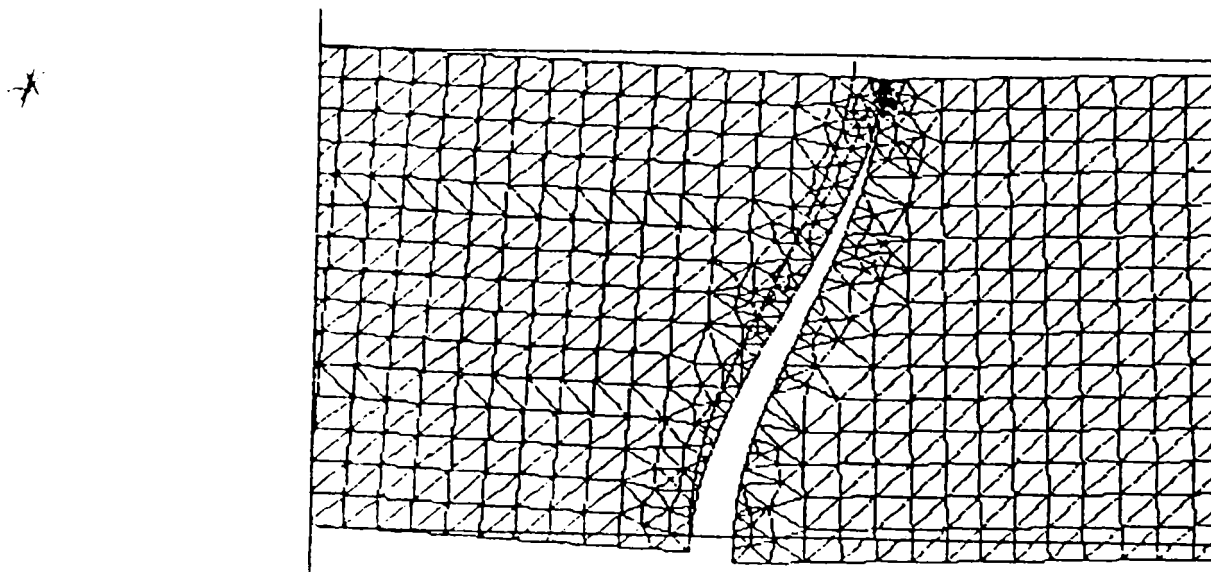


Fig. VI-6 [31]

Se observă că direcția de propagare a fisurii este o curbă, datorată prezenței modului mixt de propagare a fisurii. Traectoria fisurii este trasată în fig. VI-7

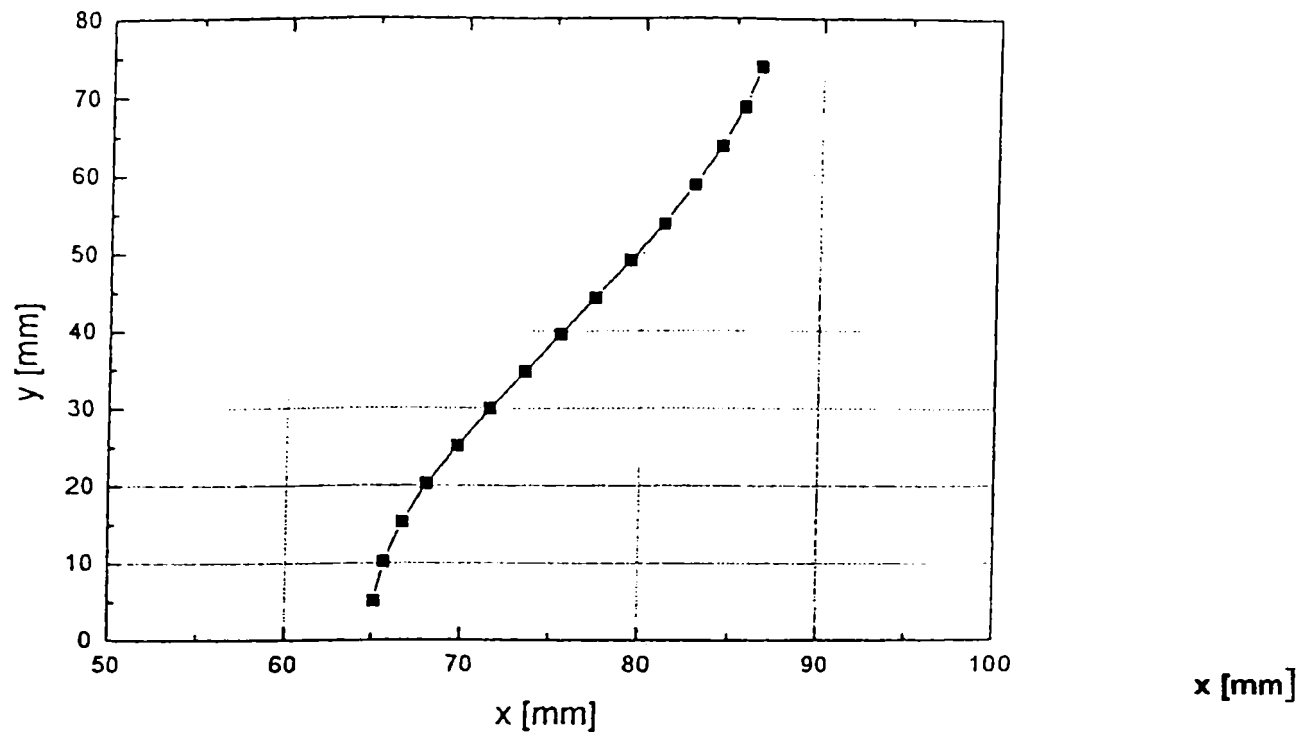


Fig. VI-7 [31] Traectoria fisurii

În figurile VI-8, VI-9 sunt prezentate variațiile factorilor de intensitate a tensiunii K_I , respectiv K_{II} , în funcție de lungimea fisurii, pe parcursul propagării acesteia.

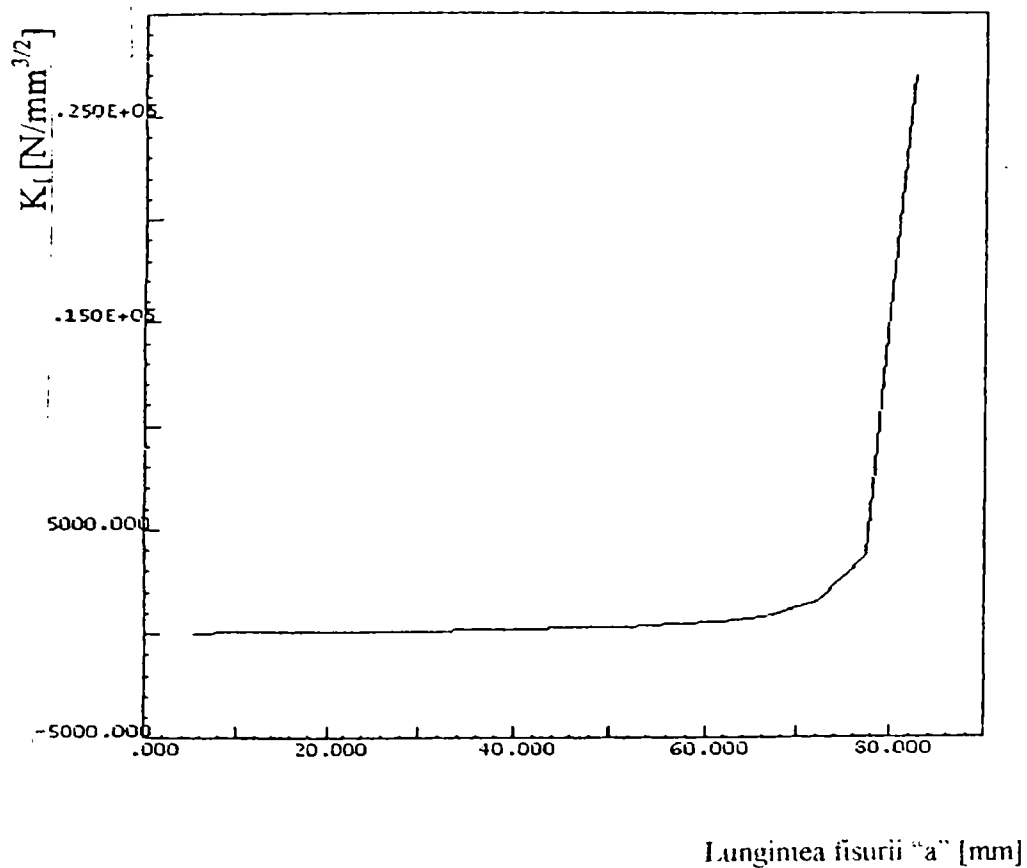


Fig. VI-8[31] Variația factorului de intensitate a tensiunii

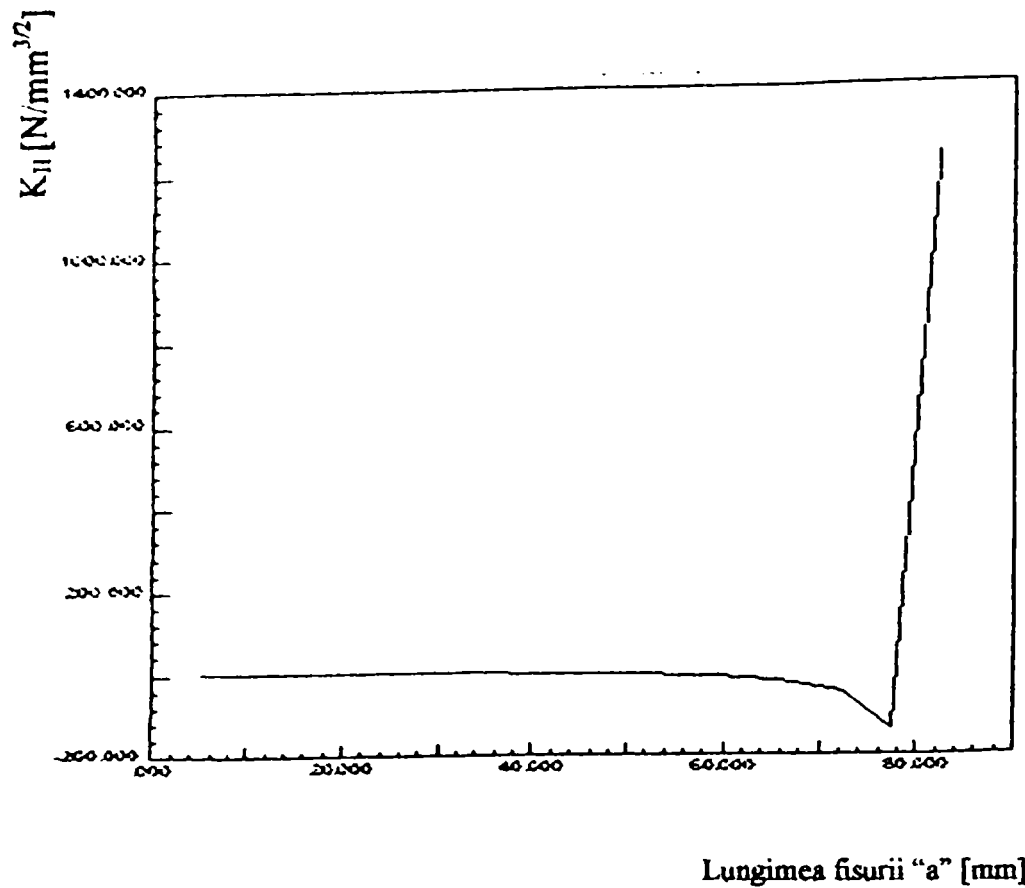


Fig. VI-9 [31] Variația factorului de intensitate a tensiunii

În figura VI-10 este reprezentată grafic dependența dintre numărul de cicluri și lungimea fisurii.

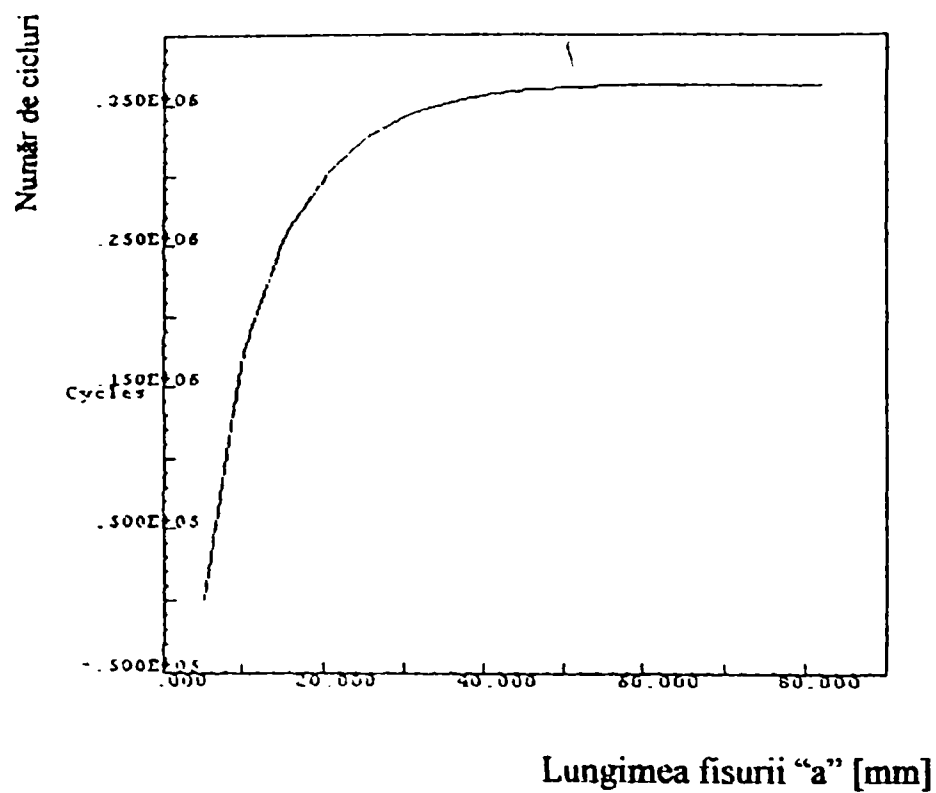


Fig. VI-10[31]

Factorul de intensitate a tensiunii efectiv K_{ef} atinge valoarea tenacității la rupere $K_{IC} = 3400 \text{ N/mm}^{3/2}$ pentru o fisură de lungime $a_c = 75,22 \text{ mm}$. Lungimea critică a fisurii se atinge după un număr de cicluri $N_c = 375215$, fig. VI-10.

Concluzii

Propagarea fisurii într-o grindă s-a efectuat pentru două poziții diferite ale fisurii:

a) fisură centrală, plasată la $\frac{1}{2}$;

b) fisură plasată la $\frac{1}{4}$.

Simularea propagării fisurii s-a realizat cu programul de modelare cu elemente finite FRANC2D/L, produse software performant, specializat pentru calculul parametrilor de mecanica ruperii.

În modelare s-au utilizat 1380 de elemente finite triunghiulare, cu 6 noduri pe element, conectate în 2883 de noduri.

Pentru fiecare poziție s-a pornit de la o fisură cu lungimea "a" = 5mm, care s-a propagat apoi cu comanda PROPAGATE. Rezultatele obținute în urma rulărilor sunt prezentate, comparativ, în tabelul VI-3 .

Tabelul VI-3 [31]

Date inițiale	Poziția fisurii			1/2	1/4
	Momentul	M_i	[N/mm]	500	250
Tensiunea	σ	[MPa]	21,33	10,67	
Tenacitatea la rupere	K_{IC}	[N/mm ^{3/2}]	3400	3400	
Lungimea inițială a fisurii	a	[mm]	5	5	
Date după prima rulare a = 5 mm	Factorul de intensitate a tensiunii	K_I	[N/mm ^{3/2}]	72,51	44,8
	Factorul de intensitate a tensiunii	K_{II}	[N/mm ^{3/2}]	0	1,82
	Factorul de intensitate a tensiunii	K_{ef}	[N/mm ^{3/2}]	72,51	44,94
Date după propagare	Lungimea critică a fisurii	a_c	[mm]	71,85	75,22
	Numărul de cicluri până la rupere	N_c	[cicluri]	314879	375215

Se constată că la poziția fisurii aflate la mijlocul grinzii factorul de intensitate a tensiunii K_I are valoarea maximă, explicabil prin aceea că tensiunea σ aferentă este maximă. De asemenea, pentru această poziție nu apare modul II de deplasare a fisurii.

Pentru poziția fisurii "la $\frac{1}{4}$ de reazem" apare modul mixt (I și II) de deplasare a flancurilor fisurii, pentru care traiectoria propagării fisurii este reprezentată în figura VI-7. Această traiectorie determină o lungime critică a fisurii mai mare decât la poziția precedentă (75,22 față de 71,85), respectiv pentru atingerea acestei valori sunt necesare un număr mai mare de cicluri: 375 215, față de 314 879. În concluzie, durabilitatea în cazul fisurii "la $\frac{1}{4}$ " este mai mare.

VI.1.3 Calculul factorului de intensitate a tensiunii pentru grindă solicitată la incovoiere, cu fisură semieliptică

Pentru exemplificarea modului în care se face un asemenea calcul, se analizează cazul unei grinzi care poate fi asimilată cu o placă (inima unui profil I), de având lățime $W = 75$ mm și de grosime egală cu unitatea, solicitată prin momentul distribuit $m = 753$ KN m/m. Placa are o fisură semieliptică, de lungime " $2c$ " = 10 mm și adâncime " a " = 1 mm, situată pe fibrele întinse.

Materialul plăcii: oțel cu $\sigma_c = 1415$ MPa și $K_{Ic} = 80$ MPa \sqrt{m} .

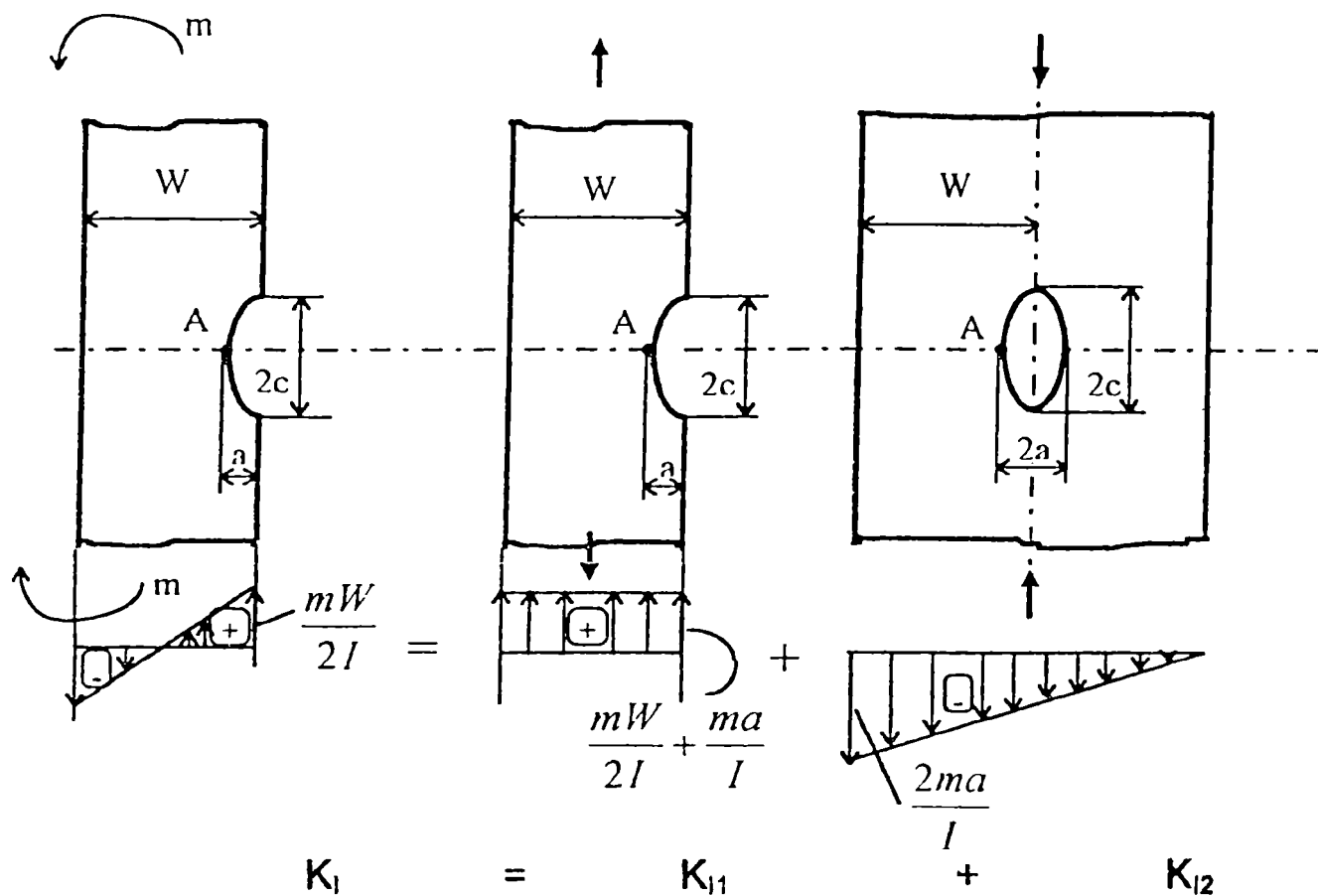


Fig. VI-11 [31]

Determinarea factorului de intensitate a tensiunii

Factorul de intensitate a tensiunii se obține prin suprapunere de efecte.

Suprapunerea se realizează prin:

- placă cu fisură semieliptică sollicitată la tracțiune prin tensiunile:

$$\sigma' = \frac{m}{I} \left(\frac{W}{2} + a \right) \quad (\text{VI.3})$$

unde I – momentul de inerție al secțiunii plăcii: $I = \frac{W^3 \cdot l}{12}$;

- placă cu o fisură eliptică sollicitată la compresiune prin tensiunile:

$$\sigma'' = -\frac{2ma}{I} \quad (\text{VI.4})$$

Pentru fiecare caz în parte, factorul de intensitate a tensiunii se calculează pentru punctul A, corespunzător vârfului fisurii, în care tensiunea rezultantă este:

$$\sigma = \sigma' + \sigma'' = \frac{m}{2I}(W + 2a) - \frac{2ma}{I} = \frac{m}{2I}(W - 2a) \quad (\text{VI.5})$$

Pentru primul caz de încărcare, factorul de intensitate a tensiunii K_{II} se calculează cu relația:

$$K_{II} = \sigma' \sqrt{\frac{\pi a}{\Phi} \left[1 + 0,12 \left(1 - \frac{a}{2c} \right)^2 \right]} \quad (\text{VI.6})$$

în care:

σ' - tensiunea aplicată;

Φ - factor de corecție, dependent de forma elipsei și de extinderea zonei plastice de la vârful fisurii. Relația de calcul a lui Φ este:

$$\Phi = E(k)^2 - 0,212 \left(\frac{\sigma}{\sigma_c} \right)^2 \quad (\text{VI.7})$$

unde

$$k^2 = 1 - \left(\frac{a}{c} \right)^2 \quad (\text{VI.8})$$

$E(k)$ este integrala eliptică completă de speța a doua.

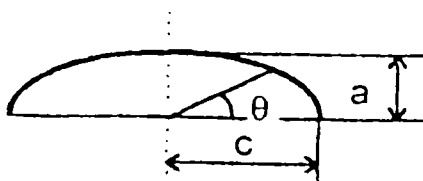


Fig. VI-12 [31]

$$E(k) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} (1 - k^2 \sin^2 \theta)^{1/2} d\theta \quad (\text{VI.9})$$

Factorul de corecție Φ se poate citi din diagrama figurii VI-13, în funcție de rapoartele

$$\frac{a}{2c} \text{ și } \frac{\sigma}{\sigma_c}, \quad (\text{VI.10})$$

unde σ - tensiunea aplicată.

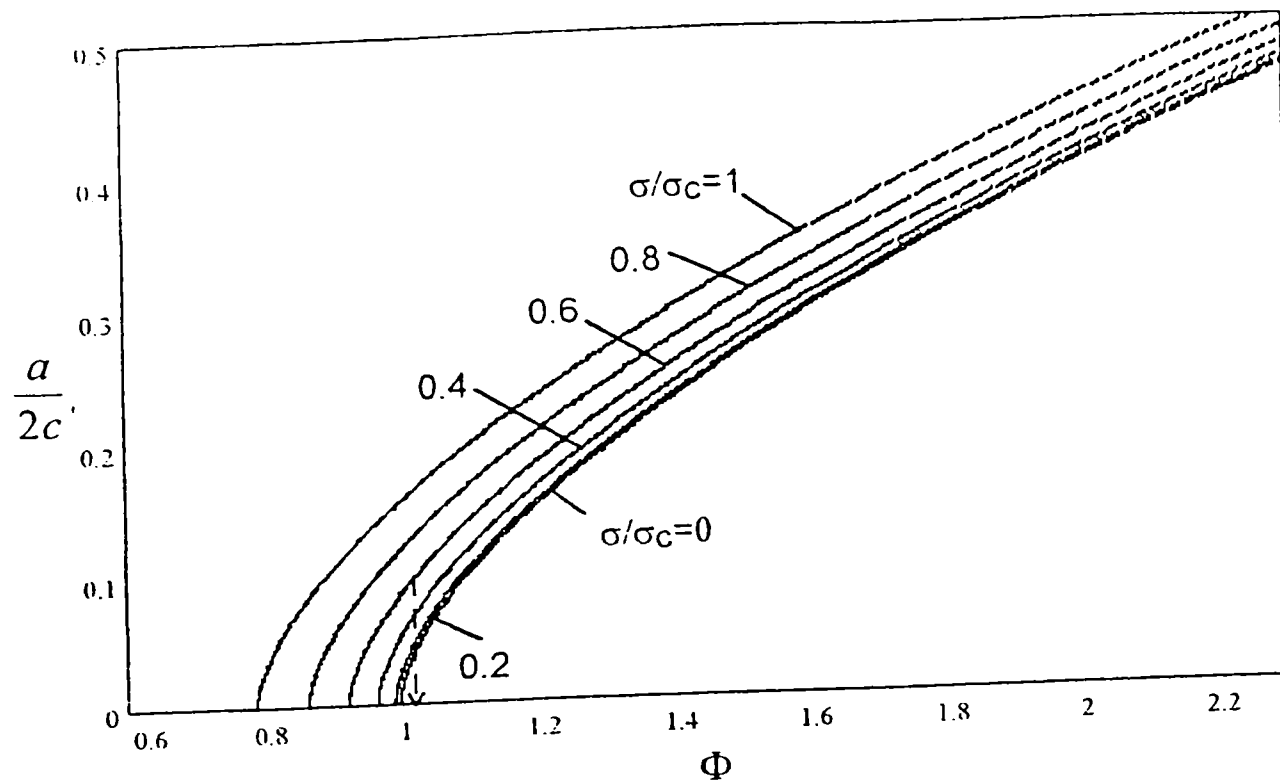


Fig. VI-13 [31]

În cazul unei fisuri circulare, K_{II} este:

$$K_{II} = \sigma' \sqrt{\frac{\pi a}{\Phi}} \quad (\text{VI.11})$$

Pentru cazul analizat, înlocuind în VI.3, rezultă:

$$\sigma' = \frac{753 \cdot 10^3}{75^3 \cdot 1} \left(\frac{75}{2} + 1 \right) = 824,6 \text{ MPa} \quad (\text{VI.12})$$

Pentru rapoartele:

$$\frac{\sigma'}{\sigma_c} = \frac{824,6}{1415} = 0,58 \text{ și} \quad (\text{VI.13})$$

$$\frac{a}{2c} = \frac{1}{10} = 0,1 \quad \Rightarrow \Phi = 1,03 \text{ (A se vedea figura VI-13)} \quad (\text{VI.14})$$

Înlocuind în VI.6. se obține:

$$K_{11} = 824,6 \sqrt{\frac{\pi 10^{-3}}{1,03}} \left[1 + 0,12(1 - 0,1)^2 \right] = 50 \text{ MPa}\sqrt{m} \quad (\text{VI.15})$$

Pentru cel de al doilea caz de încărcare, respectiv placă cu o fisură eliptică, factorul de intensitate a tensiunii K_{12} este dat de relația:

$$K_{12} = M\sigma'' \sqrt{\frac{\pi a}{\Phi}} \left(\cos^2 \theta + \frac{a^2}{c^2} \sin^2 \theta \right) \left[1 - \frac{k^2 E(k) \cos \theta}{(1+k^2)E(k) - (1-k^2)F(k)} \right] \quad (\text{VI.16})$$

unde:

M – coeficient de corecție care se calculează în funcție de rapoartele a/c și a/W , corespunzător condițiilor de încărcare prezentate anterior;

$F(k)$ – integrala eliptică de prima speță.

Pentru cazul analizat, corespunzător punctului A ($\theta = 180^\circ$), K_{12} devine (din VI.16):

$$K_{12} = M\sigma'' \sqrt{\frac{\pi a}{\Phi}} \left[1 + \frac{k^2 E(k)}{(1+k^2)E(k) - (1-k^2)F(k)} \right] \quad (\text{VI.17})$$

Pentru $\frac{a}{c} = 0,2$ și $\frac{a}{W} = 0,013$, din figura VI-14 se obține $M \approx 1$

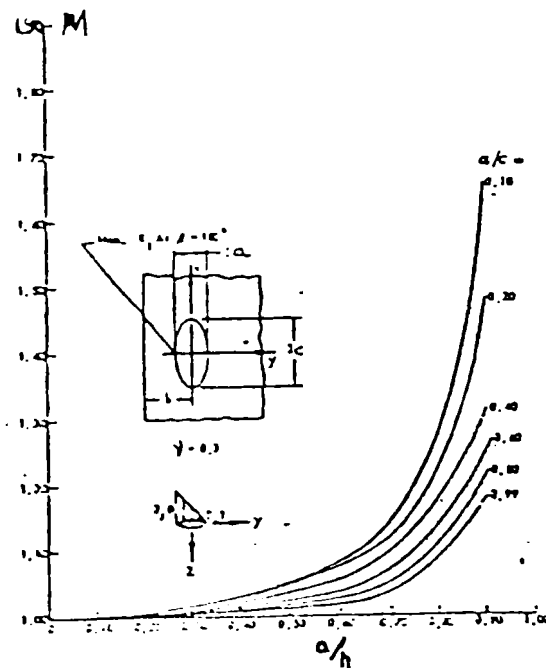


Fig. VI-14 [31]

Se calculează tensiunea $|\sigma''|$, înlocuind în VI.4:

$$|\sigma''| = \frac{2ma}{I} = \frac{2 \cdot 753 \cdot 10^3 \cdot 1}{\frac{75^3 \cdot 1}{12}} = 42,8 \text{ MPa} \quad (\text{VI.18})$$

Pentru rapoartele $\frac{\sigma''}{\sigma_c} = \frac{42,8}{1415} = 0,03$; $\frac{a}{2c} = \frac{1}{10} = 0,1$,

din fig.VI-13 se obține $\Phi = 1,24$.

Se calculează, cu relația VI.8:

$$k^2 = 1 - \frac{a^2}{c^2} = 1 - \left(\frac{1}{5}\right)^2 = 0,96 \Rightarrow k = 0,979 \Rightarrow \alpha = \arcsin k = 78^\circ 28' \quad (\text{VI.19})$$

Corespunzător acestui unghi, se pot calcula cele două integrale eliptice de speța întâi și de speța a doua, folosind tabelele în care acestea sunt prezentate.

Astfel, pentru: $\alpha = 78^\circ 30' \rightarrow F(k) = 3,0192$ și $E(k) = 1,0502$;

$\alpha = 79^\circ \rightarrow F(k) = 3,0617$ și $E(k) = 1,0468$.

Folosind o interpolare liniară rezultă:

$F(k) = 3,0418$ și $E(k) = 1,04838$.

Cu aceste valori, înlocuind în VI.17, se calculează K_{I2} :

$$K_{I2} = 1,0 \cdot 42,8 \sqrt{\frac{\pi 10^{-3}}{1,24} \left[1 + \frac{0,96 \cdot 1,04838}{(1 + 0,96)1,04838 - (1 - 0,96)3,0418} \right]} = 3,28 \text{ MPa} \sqrt{m} \quad (\text{VI.20})$$

Din valorile de mai sus, rezultă factorul de intensitate a tensiunii:

$$K_I = K_{I1} - K_{I2} = 50 - 3,28 = 46,72 \text{ MPa} \sqrt{m} \quad (\text{VI.21})$$

Întrucât $K_I < K_{Ic}$ inițial, nu apare pericolul unei ruperi fragile.

Determinarea lungimii critice a fisurii

Efectuând un calcul aproximativ, când pentru K_I se acceptă relația:

$$K_I = \frac{mW}{2I} M \frac{\sqrt{\pi a}}{E(k)} \quad (\text{VI.22})$$

și punând condiția $K_I = K_{Ic}$, rezultă adâncimea critică a fisurii:

$$a_{cr} = \frac{4 K_{Ic}^2 I^2 E^2(k)}{m^2 W^2 M^2 \pi} \frac{4 \cdot 2530^2 \left(\frac{75^3 \cdot 1}{12}\right)^2 \cdot 1,04838^2}{(753 \cdot 10^3)^2 \cdot 75^2 \cdot 1,1^2 \cdot \pi} = 2,87 \text{ mm} \quad (\text{VI.23})$$

Coeficientul de corecție M se citește în acest caz din diagrama VI-15, în funcție de rapoartele $\frac{a}{W}$ și $\frac{a}{c}$.

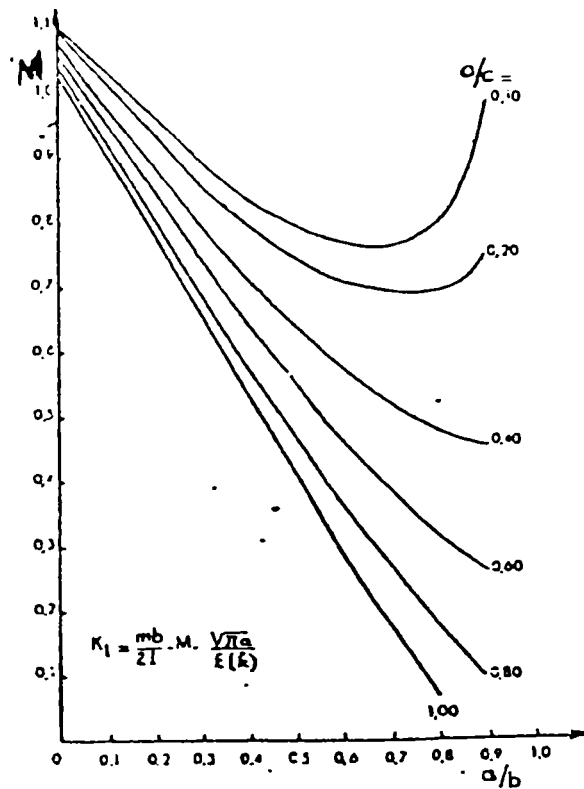


Fig. VI-15 [31]

Pentru cazul analizat $M = 1,1$.

Concluzie

Diferența foarte mică dintre adâncimea fisurii "a" și valoarea critică a acesteia "a_{cr}" impune o verificare periodică a evoluției în timp a fisurii.

VI.2 CERCETĂRI PRIVIND ESTIMAREA DURABILITĂȚII TIRANȚILOR EXCAVATOARELOR DIN EXPLOATĂRILE MINIERE, APLICÂND CONCEPTELE MECANICII RUPERII

VI.2.1 Funcția tiranților în ansamblul SP

Utilajele grele (UG) destinate lucrărilor de extragere a cărbunelui la exploatarea miniere de suprafață sunt utilaje deosebit de complexe, așa cum se poate constata ușor din fig. VI-16, în care este înfățișată o schiță de ansamblu a excavatorului ERC - 1300.

Tirantul (fig. VI-16 și fig. VI-17) susține elinda (brațul roții cu cupe), la a cărei extremitate se află montat rotorul port cupe (roara cu cupe). În exploatare se manifestă sarcini variabile în timp, care pot induce fisuri, urmate de ruperea tirantului și de prăbușirea utilajului, implicând accidente grave. Ca urmare, se impun inspecții periodice de verificare a stării tiranților.

Programul de evaluare a durabilității tiranților trebuie să cuprindă determinarea după anumite perioade de exploatare a caracteristicilor clasice și a caracteristicilor de mecanica ruperii, spre a constata dacă s-au modificat proprietățile materialului. De asemenea, trebuie analizată starea de tensiune și distribuția defectelor, care, coroborate, permit o analiză a interacțiunii defecte - tensiuni, [32], [157],[158]. În acest sens, problema durabilității tiranților se abordează pe baza conceptelor mecanicii ruperii. În continuare, după [34], se descriu cercetări recente semnificative.

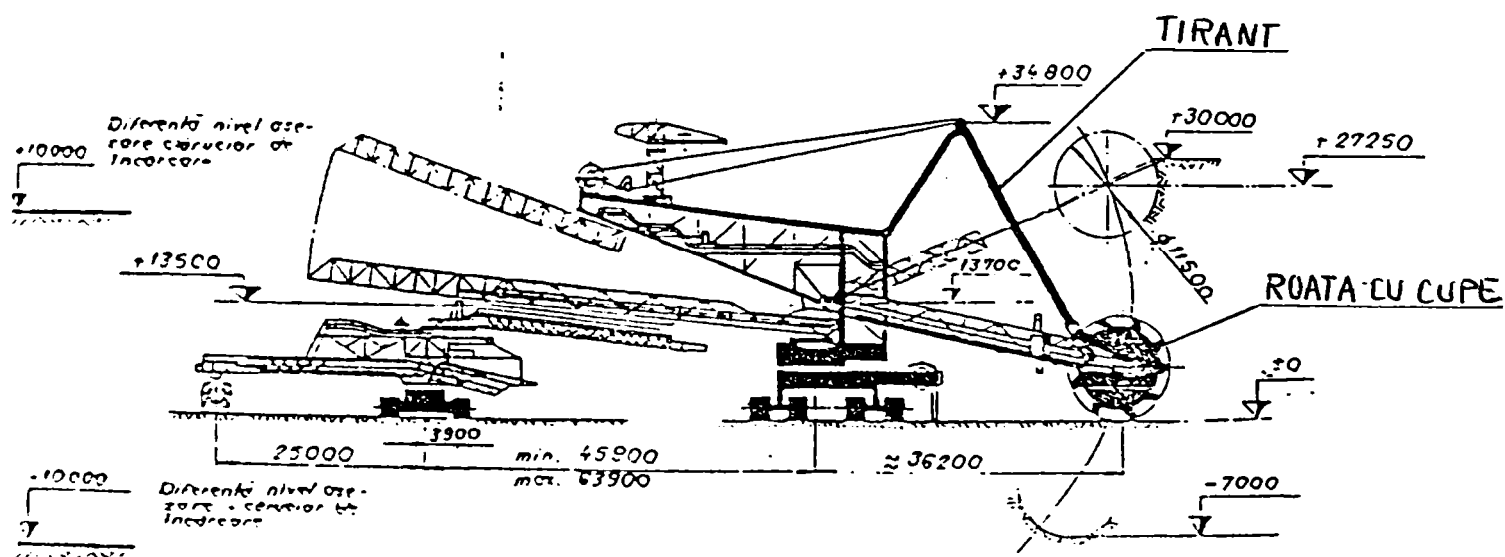


Fig. VI-16 [34]

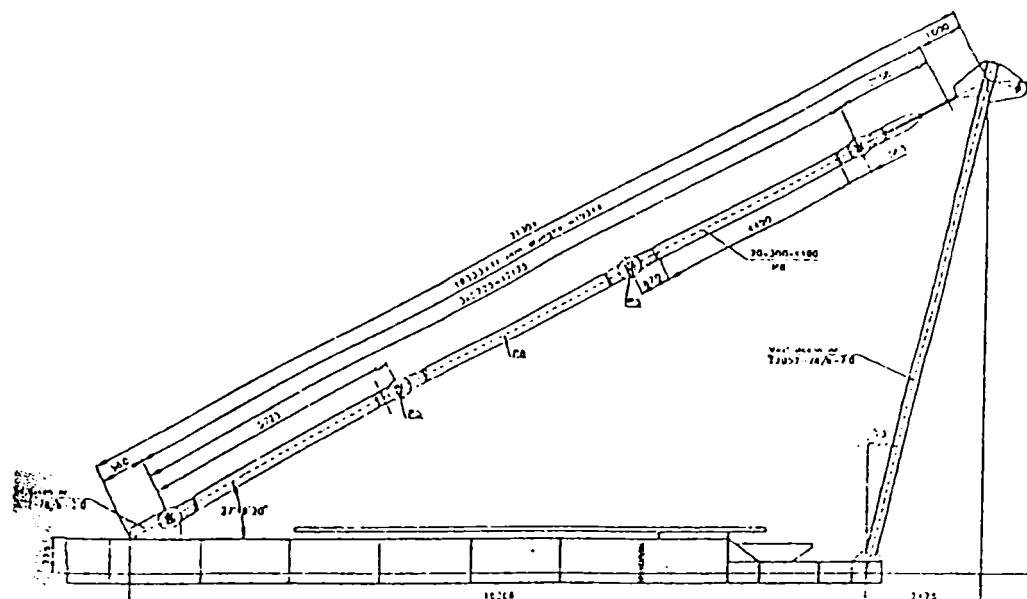


Fig. VI-17 [34]

VI.2.2 Compoziția chimică a tiranților

Materialul tiranților: oțel St 52-3 sau OL 52.

S-au efectuat analize chimice din platbandele sudate ale tiranților, rezultatele fiind prezentate în tabelele VI-4 și VI-5, comparativ cu valorile nominale din standardul de material.

Tabelul VI-4

	Elemente chimice							
	C [%α]	Si [%α]	Mn [%α]	P [%α]	S [%α]	Al [%α]	N [%α]	Fe [%α]
St 52-3 (prin analize)	0,173	0,572	1,77	0,075	0,024	0,015	-	Rest
St 52-3 (bibliografie [214])	0,190	0,42	1,10	0,020	0,029	0,037	0,007	Rest

Tabelul VI-5[34]

	Elemente chimice					
	C [%α]	Mn [%α]	Si [%α]	P [%α]	S [%α]	Alte elemente [%α]
OL 52-4K (prin analize)	0,176 ...0,197	1,62 ...1,79	0,344 ...0,348	0,011 ...0,013	0,019 ...0,028	Al 0,063 ...0,065
St 52 (STAS -500)	0,18 ... 0,22	1,10 ...1,50	0,50	0,035 ...0,055	0,040 0,055	Al min. 0,025

VI.2.3 Caracteristici statice

Principalele caracteristici mecanice ale oțelului St 52-3 au fost obținute prin încercări la tracțiune statică, conform STAS 200-75 [235] și STAS 10290-75 [232], pe o mașină de tracțiune de 100 kN, utilizând epruvete de secțiune circulară, [235].

În figura VI-18 este prezentată curba caracteristică σ - ϵ , obținută pentru oțelul St 52-3. Încercările au evidențiat existența unei limite de curgere aparente. După atingerea acesteia, s-a demontat extensiometrul și s-a continuat încercarea, până la rupere, înregistrându-se forța maximă, pe baza căreia s-a calculat rezistența la rupere, R_m .

În tabelul VI-6 sunt prezentate valorile medii ale caracteristicilor determinate.

Tabelul VI-6 [34]

Material	Rezistența la rupere R_m [MPa]	Limita de curgere $R_{p0,2}$ [MPa]	Alungirea la rupere A_n [%]	Gâtuirea la rupere Z [%]
St 52-3 (prin încercări)	567	434	20	56,6
St 52-3 (prin bibliografie [214])	590	410	27	66
OL 52 4K (STAS 500)	520...620	350-360	22	-
A 533 (SUA, bibl.[35])	585	427	28	72

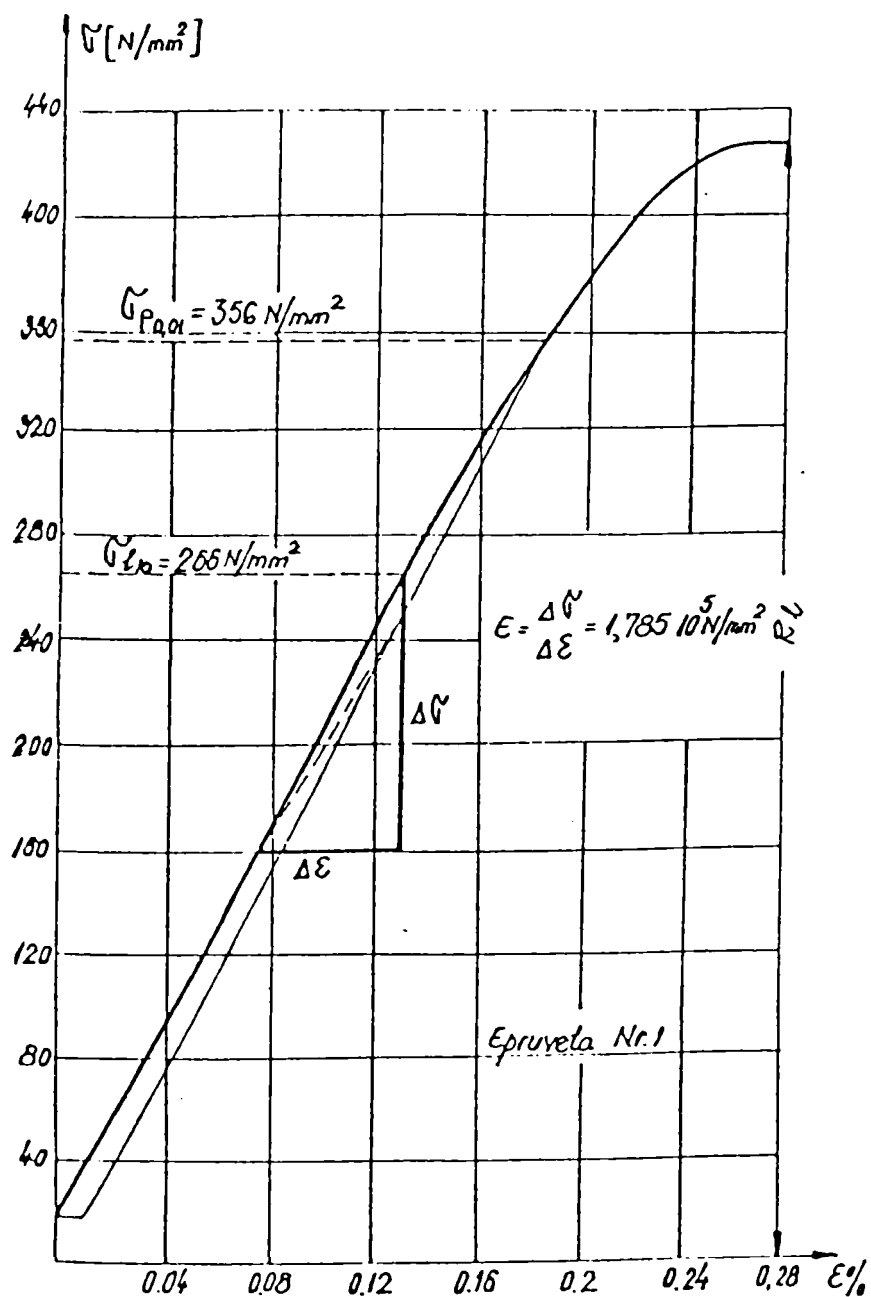


Fig. VI-18 [34]

Pentru comparație, în tabelul VI-6 sunt prezentate aceleași caracteristici și pentru alte oțeluri de aceeași calitate, dar de producție diferită.

Pe lângă caracteristicile mecanice uzuale pentru St 52-3 s-au determinat și cele din tabelul VI-7 (evidențiate pe figura VI-18)

Tabelul VI-7 [34]

Materialul	Limita de proporționalitate σ_{110} [MPa]	Limita de elasticitate $\sigma_{r,0.01}$ [MPa]	Modulul de elasticitate E [MPa]
St 52-3 (prin încercări)	272	360	$1,78 \cdot 10^5$

Prelucrând statistic datele experimentale obținute pe un număr mare de epruvete și comparând caracteristicile mecanice obținute prin încercări ale oțelului St 52-3 cu cele indicate în [214], se constată:

- durificarea materialelor din exploatare;
- tendință de reducere a rezistenței la rupere A_n și a găturii la ruperea Z;
- limita de curgere a manifestat o tendință de creștere.

În figura VI-19 sunt indicate **aspectele microfractografice ale ruperii la tracțiune**.



Fig. VI-19 [34]

VI.2.4 Comportarea la solicitări variabile a materialului tirantului

Încercările la solicitările variabile s-au făcut pe epruvete din oțel St 52-3 debitate din tirant și pe epruvete din oțel OL 52 în construcție sudată.

S-au folosit epruvete plate debitate în lungul plăcilor prelevate din tirant. Epruvetele (Fig. VI-20) au respectat grosimea produsului și calitatea suprafețelor acestuia și condițiile impuse de STAS 8027-78 [243].

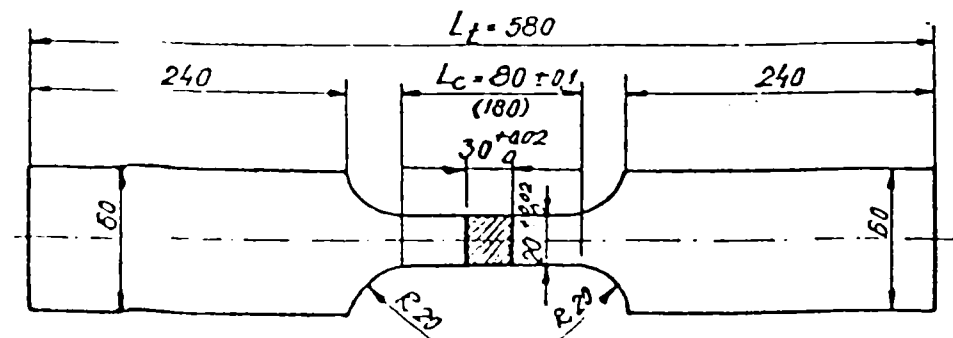


Fig. VI-20 [34]

Încercările s-au făcut pe o mașină de tracțiune de 1000 KN prevăzută cu pulsator activat hidraulic pentru cicluri oscilante pozitive la solicitări de tracțiune, compresiune.

Ciclurile de solicitare atât pentru epruvetele din St 52-3 cât și pentru cele din OL 52 în construcție sudată s-au caracterizat prin aceeași tensiune minimă $\sigma_{min} = 73,6$ MPa. Conform înregistrărilor din exploatare, această tensiune este determinată de greutatea proprie a subansamblurilor susținute de tirant, fig. VI-21

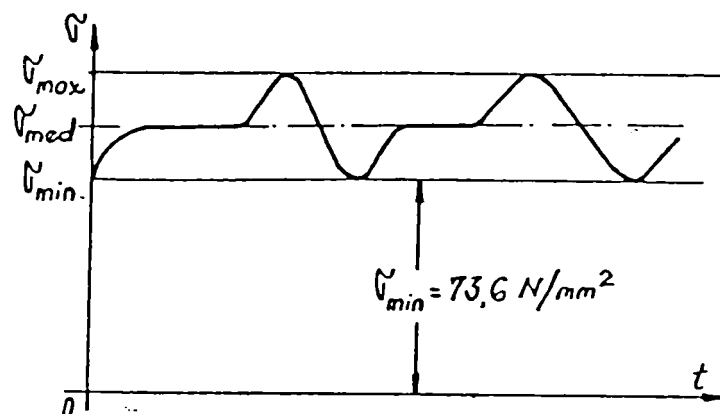


Fig. VI-21 [34]

Rezultatele încercărilor obținute la solicitări variabile pe epruvete fără concentrator, sunt prezentate în tabelul VI-8 și reprezentate prin puncte în fig. VI-22. În fig. VI-22 curbele I și II au fost preluate din lucrarea [122] și se referă la oțelul St 52-3, deci același oțel cu cel analizat.

Curba I corespunde inițierii ruperii prin oboseală și curba II corespunde ruperii prin oboseală, corespunzător gradului de asimetrie $R_s = 0,5$. Punctele 1,2,3,4,5,6,7 și 8 corespund încercărilor la oboseală ale epruvetelor din oțel St 52-3, iar punctele 9,10,11 și 12 - încercărilor la oboseală ale epruvetelor din OL 52, în construcție sudată.

Tabelul VI-8

Epruvetă	Material	Tensiune minimă	Tensiune maximă	Coeficient de asimetrie	Număr de cicluri până la rupere
		σ_{\min} [MPa]	σ_{\max} [MPa]	$R_s = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$ [-]	N [cicluri]
O 1	St 52	73,6	283,0	0,260	50 800
O 2	St 52	73,6	245,3	0,300	376 200
O 3	St 52	73,6	147,2	0,500	5 100 000
O 4	St 52	73,6	157,3	0,468	823 700
O 5	St 52	73,6	96,8	0,760	11 381 000
O 6	St 52	73,6	130,0	0,566	6 152 000
O 7	St 52	73,6	200,0	0,368	638 100
O 8	St 52	73,6	263,0	0,280	61 000
O 9	OL 52	73,6	400,0	0,184	9 300
O 10	OL 52	73,6	283,0	0,260	178 500
O 11	OL 52	73,6	147,2	0,500	1 286 000
O 12	OL 52	73,6	245,3	0,300	432 000

Comparând rezultatele obținute pentru $\sigma_{\min} = 73,6$ Mpa, la diferite grade de asimetrie, cu cele caracterizate prin $R_s = 0,5$, se constată că pentru tensiuni maxime $\sigma_{\max} > 150$ MPa, rezultatele obținute se plasează în jurul curbei de oboseală. Excepție au făcut două dintre epruvete, corespunzător lui $\sigma_{\max} = 275$ MPa și 263 MPa (punctele 1 și 8 din fig. VI-22). Pentru tensiuni $\sigma_{\max} < 150$ MPa durabilitățile epruvetelor încercate au depășit durabilitatea indicată pentru $R_s = 0,5$. Punctele marcate cu săgeți reprezintă epruvetele care nu s-au rupt și la care încercările au fost oprite.

Se remarcă că odată cu creșterea coeficientului de asimetrie a ciclului, R_s , crește durabilitatea. Faptul că durabilitatea epruvetelor sudate (punctul 10 și 12, fig. VI-22) a depășit durabilitatea otelului St 52-3 se explică prin aceasta că epruveta din OL 52 din construcție sudată a fost debitată dintr-un material nesolicitat anterior.

Analizând modul de rupere al epruvetelor sudate s-a constatat următoarele:

- la epruveta O 10, corespunzător lui $\sigma_{\max} = 283$ MPa, inițierea fisurii s-a făcut în sudură, dar continuarea rupturii s-a efectuat în zona influențată termic;
- la epruvetele O9, O11 și O12, ruperea s-a făcut în sudură

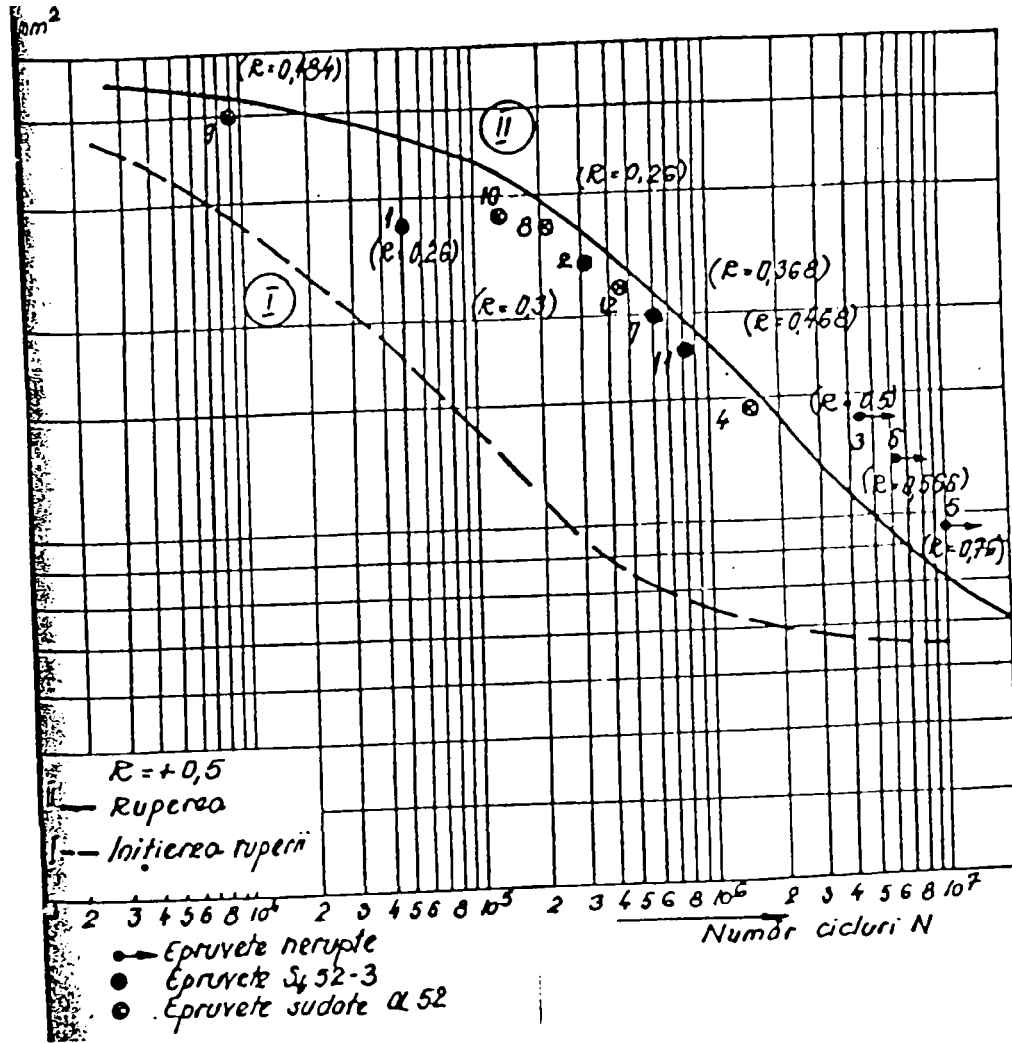


Fig. VI-22 [34]

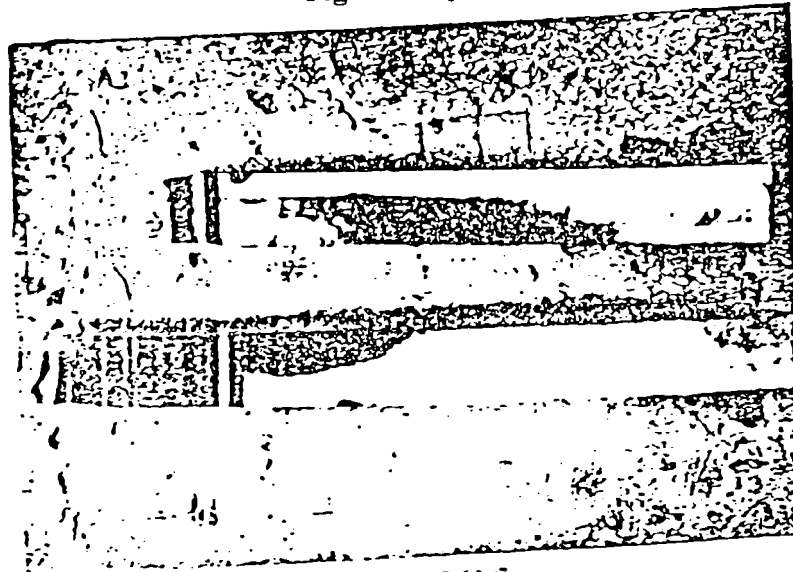


Fig. VI-23 [34]



Fig. VI-24 [34]

În fig. VI-23 este indicată una dintre epruvetele rupte prin oboseală, iar în fig. VI-24 aspectul secțiunii de rupere în cele două zone și anume: zona lucioasă – care corespunde ruperii prin oboseală, și zona cu aspect fibros – corespunzătoare ruperii finale. Din fig. VI-24 se observă că inițierea ruperii prin oboseală se produce într-unul din colțurile epruvetei, propagarea fisurii de oboseală extinzându-se pe aproximativ 20-25% din secțiune.

În fig. VI-25 este indică microfractografia ruperii prin oboseală aferentă epruvetei O1, fig. VI-23 , cu $\sigma_{max} = 283 \text{ Mpa}$, la care numărul de cicluri până la rupere a fost $N = 50800$.

Fig. VI-26 indică aceeași microfractografie, pentru epruveta O2, sollicitată cu $\sigma_{max} = 245.3 \text{ MPa}$ și la care numărul de cicluri până la rupere a fost $N = 376200$.

Microfractografiile din fig. VI-25 și VI-26 au fost făcute în zona corespunzătoare propagării fisurii de oboseală.

Aspectele microfractografice din zona ruperii prin oboseală pun în evidență prezența striatiunilor, distanța dintre acestea reprezentând viteza de propagare a fisurii determinate de nivelul tensiunii maxime.

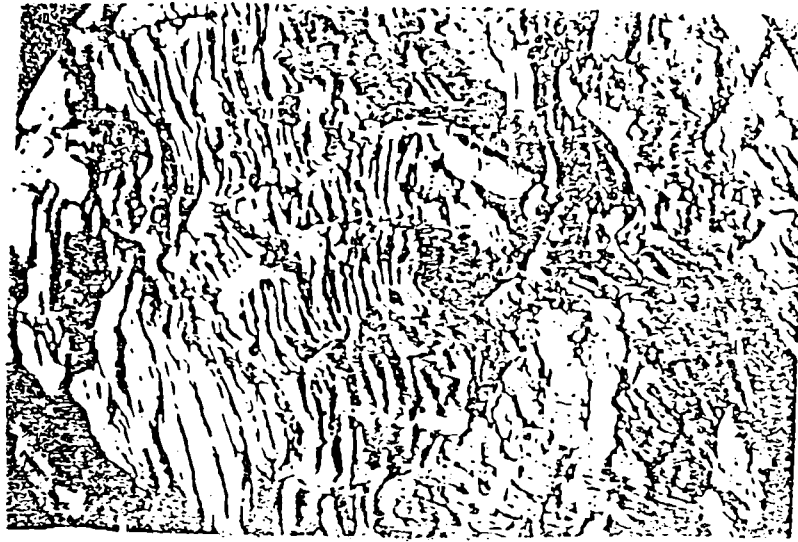


Fig. VI-25 [34]



Fig. VI-26 [34]

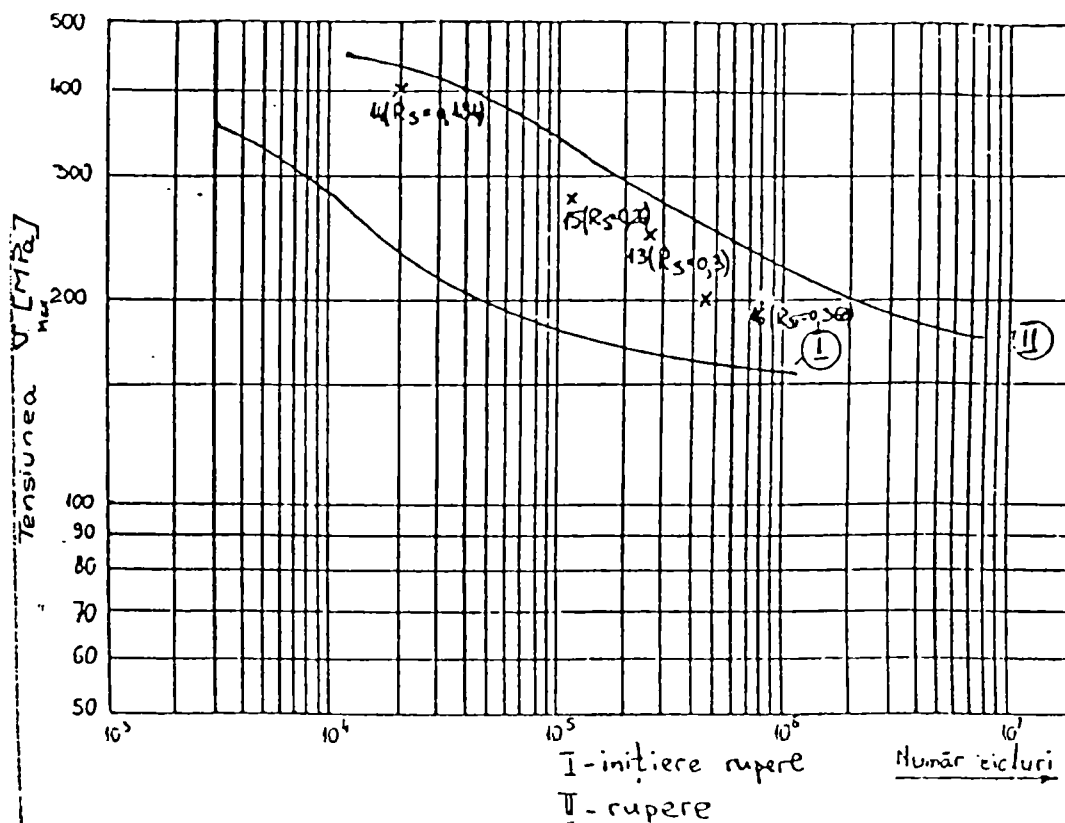


Fig. VI-27 [34]

Pentru a studia influența concentrării tensiunii asupra durabilității materialului s-au confecționat din oțelul St 52 epruvete de oboseală de forma celor indicate în fig. VI-23, în care s-a executat un orificiu circular cu diametrul de 5 mm. Coeficientul teoretic de concentrare a tensiunilor, corespunzător acestui caz, pentru $d/B = 5/20 = 0,25$, este $k_t = 3,24$. [187]. În tabelul VI-9 sunt prezentate rezultatele obținute în urma încercărilor, iar în fig. VI-27 rezultatele experimentale sunt comparate cu curbele de oboseală trasate pentru o epruvetă cu orificiu circular pentru care coeficientul de concentrare a tensiunilor a fost $k_t = 2,5$, iar coeficientul de asimetrie $R_s = 0,5$ [122].

Tabelul VI-9 [34]

Epruvetă	Material	Tensiune minimă	Tensiune maximă	Coeficient de asimetrie	Număr de cicluri până la rupere
		σ_{min} [Mpa]	σ_{max} [MPa]	$R_s = \sigma_{min} / \sigma_{max}$ [-]	N [cicluri]
O 13	St 52	73,6	245,3	0,300	268 000
O 14	St 52	73,6	400,0	0,184	21 800
O 15	St 52	73,6	283,0	0,260	135 000
O 16	St 52	73,6	200,0	0,368	452 800

Din fig. VI-27 se observă că numărul de cicluri până la rupere pentru epruvetele cu concentrator de tensiune se află sub curba de durabilitate dată în [122] pentru același material. Aceasta poate avea două explicații: coeficienții de asimetrie ai ciclurilor folosiți la încercările efectuate, ($R_s = 0,184 - 0,368$), au fost mai mici decât $R_s = 0,5$, considerat în [122], iar coeficientul de concentrare a tensiunilor k_t a fost mai mare în epruvetele încercate de autor (3,24, față de 2,5 în [122]).

VI.2.5 Încercări de reziliență

VI.2.5.1 Încercări de reziliență pe epruvete cu creștătura în U și în V

Epruvetele au avut creștătură în U, conform STAS 1400-75, respectiv în V, conform STAS 7511-81. Încercările s-au realizat pe un ciocan Charpy, la diferite temperaturi. Temperaturile scăzute s-au obținut prin imersarea și menținerea epruvetei într-un vas adiabatic de răcire, care a conținut un amestec de azot lichid și acetonă.

Rezultatele încercărilor la reziliență pentru oțelul St 52-3, la diferite temperaturi, sunt prezentate în tabelul VI-10 . Analizând rezultatele din tabelul VI-10 , se constată și se concluzionează:

- energia de rupere, la toate temperaturile de încercare, este mult superioară valorii de 27 J, ceea ce arată că materialul mai are rezervă pentru a-și păstra capacitatea de deformație;
- aspectul ruperii, în secțiunea de rupere, este mixt și nu apare fenomenul de fragilizare în intervalul de temperaturi studiate (- 40 ...+20°C).

Marcaj epruvetă	Temperatura de încercare	Energia la rupere [J]	
		Valori individuale	Media
V1 V2 V3	+20°	67 68 64	66,3
V4 V5 V6	0	66 68 69	67,6
V7 V8 V9	-20°	66 68 68	67,3
V10 V11 V12	-30°	66 66 69	67
V13 V14 V15	-40°	60 59 61	60

Tabelul VI-10 [34]

VI.2.5.2 Cercetări privind comportarea la solicitări axiale cu șoc

Deoarece în timpul funcționării excavatoarelor apar foarte des șocuri, s-a considerat că este necesar un studiu al comportării la solicitări axiale cu șoc a materialului din care este confecționat tirantul.

Aspectele legate de comportarea unor oțeluri la viteze mari de deformație în cazul șocurilor longitudinale sunt prezentate în [102].

Încercările la tracțiune prin șoc s-au efectuat pe un ciocan Charpy cu rezerva de energie maximă $W_0 = 750$ J, adaptat special pentru încercări la tracțiune dinamică (A se vedea fig. VI-28). Epruvetele folosite, de forma prezentată în fig. VI-29 , s-au confecționat din oțel St 52-3. Pe porțiunea calibrată a epruveteilor au fost marcate repere, la distanța $\Delta x = 2$ mm (Fig. VI-28 , detaliul A). Măsurând distanțele între repere, după rupere, s-a putut reprezenta variația deformațiilor specifice.

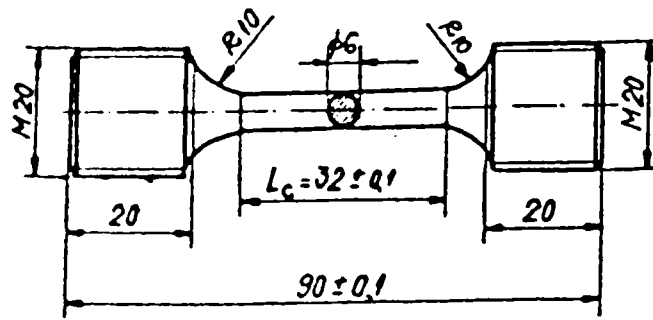


Fig. VI-28 [34]

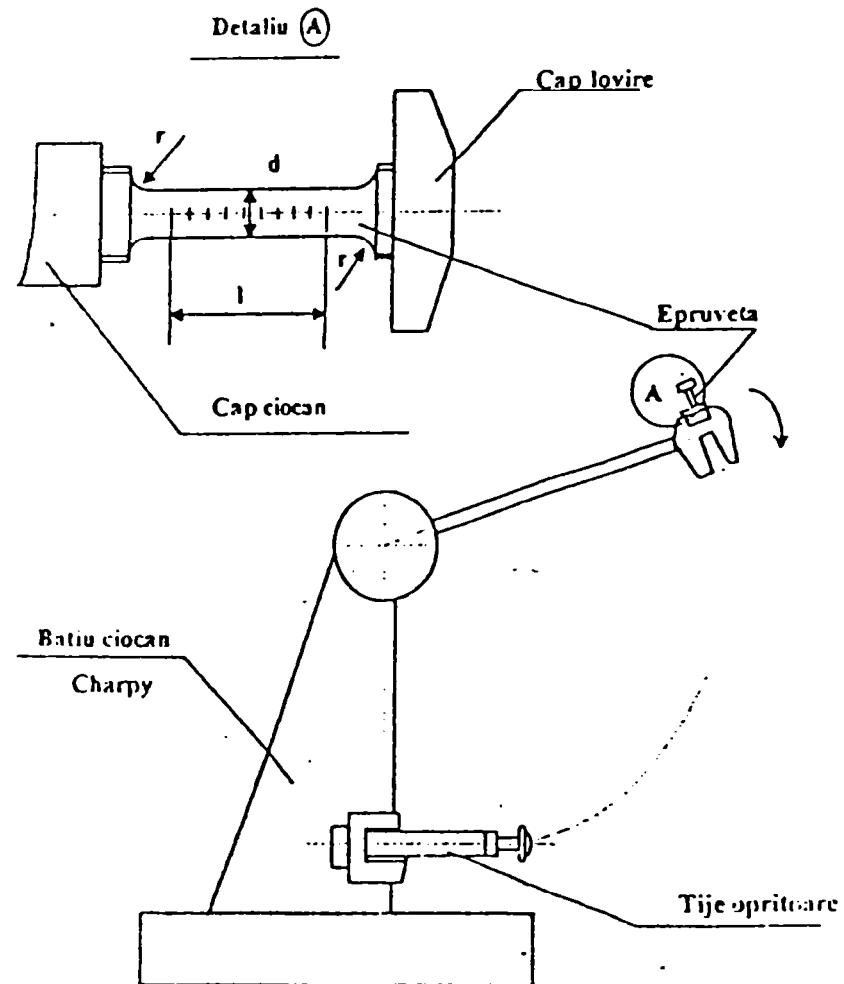


Fig. VI-29 [34]

S-au efectuat încercări la șase viteze de deformare diferite.

În figurile VI-30 și VI-31 este ilustrată variația energiei consumate pentru ruperea epruvetelor, W , în funcție de energia W_0 , respectiv în funcție de viteza de impact, "v".

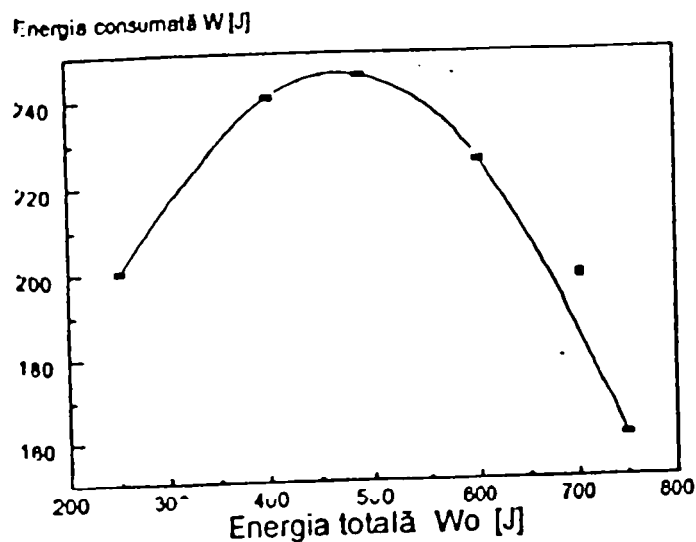


Fig. VI-30 [34]

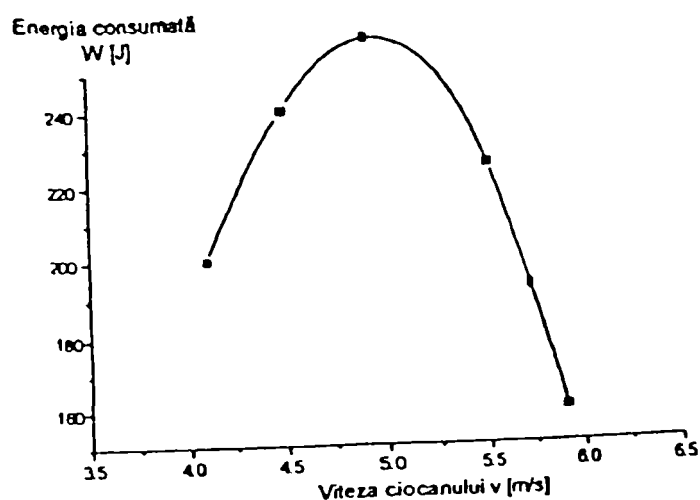


Fig. VI-31 [34]

Cercetările efectuate la viteze de impact cuprinse între 4...6 m/s au evidențiat că oțelul St 52-3 poate înmagazina o energie maximă la viteza de 4,85 m/s. După depășirea acestei viteze, energia de deformare înmagazinată scade simțitor.

Măsurând alungirile Δl_i ale fiecărui interval $l_i = 2$ mm marcat pe zona calibrată a epruvetei s-a calculat deformația specifică a fiecărui interval:

$$\varepsilon_i = \frac{\Delta l_i}{l_i} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (\text{VI.23})$$

Apoi s-au calculat deformațiile specifice cumulate:

$$\varepsilon_{cum} = \frac{\sum_i \Delta_i}{\sum_i l_i} \cdot 100 [\%] \quad (VI.24)$$

În figurile VI-32 și VI-33 s-au reprezentat variațiile deformațiilor specifice, ε , și variațiile deformațiilor specifice cumulate, ε_{cum} , corespunzătoare vitezei de impact $v=5.5$ m/sec. În ambele cazuri se remarcă tenacitatea ridicată a materialului la această viteză de impact. Repartiția deformațiilor specifice ε (Fig. VI-32 VI-33) și deformațiilor specifice cumulate ε_{cum} (Fig. VI-33), pe lungimea calibrată a epruvetei, este neuniformă. Această repartiție este influențată în principal de viteza de deformație, dar și de condițiile de rezemare ale epruvetei.

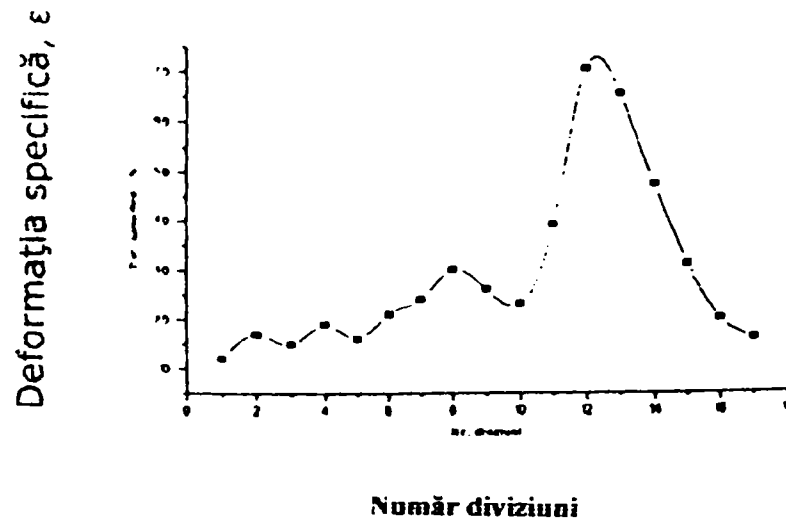


Fig. VI-32 [34]

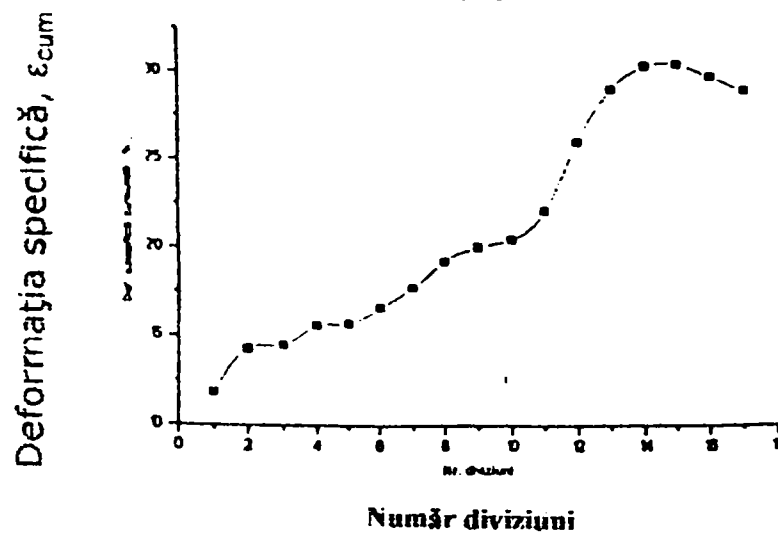


Fig. VI-33 [34]

VI.2.6 Determinarea tenacității la rupere

VI.2.6.1 Determinarea factorului critic de intensitate a tensiunii prin metoda Chevron

Aprecierea tenacității la rupere se poate face pe baza valorii critice a factorului de intensitate al tensiunii, K_{Ic} . Deoarece pentru materialul studiat grosimea minimă a epruvetei impusă de STAS 9760-84 [246] este mult mai mare decât grosimea plăcii debitată din tirant, s-a adoptat metoda Chevron pentru determinarea tenacității la rupere.

Valoarea critică a factorului de intensitate a tensiunii s-a obținut prin încercări pe epruvete de tip Chevron (Fig. VI-34). S-a procedat astfel deoarece metoda prezintă câteva avantaje notabile [221], [66] față de metoda K_{Ic} , precum:

- respectarea stării plane de deformație pe epruvete de dimensiuni mult mai mici față de metoda K_{Ic} , datorită formei epruvetei; epruvetele Chevron asigură menținerea fisurii în planul de rupere, ce conține creștătura;
- epruvetele nu necesită o prefisurare prin oboseală;
- cost redus față de metoda K_{Ic} ;
- bună repetabilitate și o precizie ridicată, evidențiată prin abaterea pătratică, care este mult mai mică decât la metoda K_{Ic} , [66].

În fig. VI-35 este prezentată, după [66], corelația dintre valoarea tenacității la rupere, determinată pe epruveta Chevron K_{Iv} , și valoarea tenacității determinată după metoda K_{Ic} .

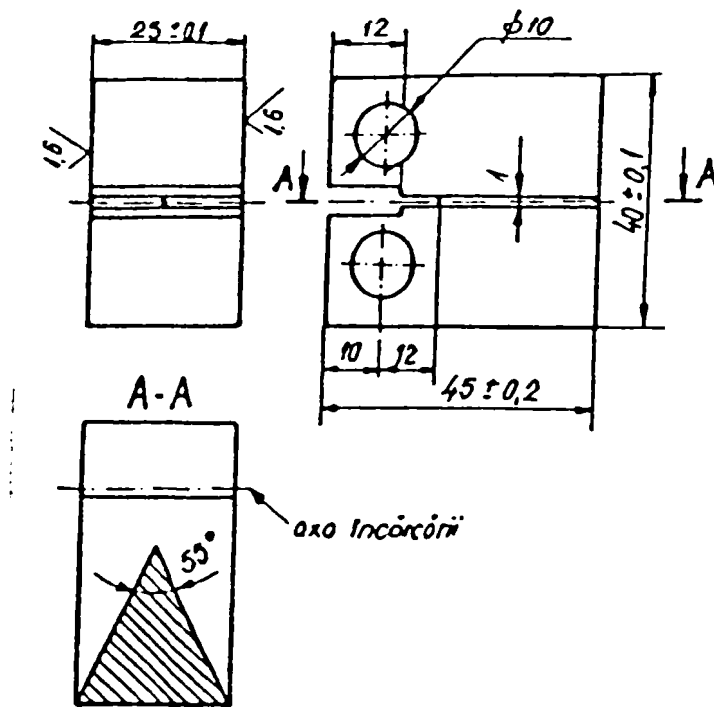


Fig. VI-34 [34]

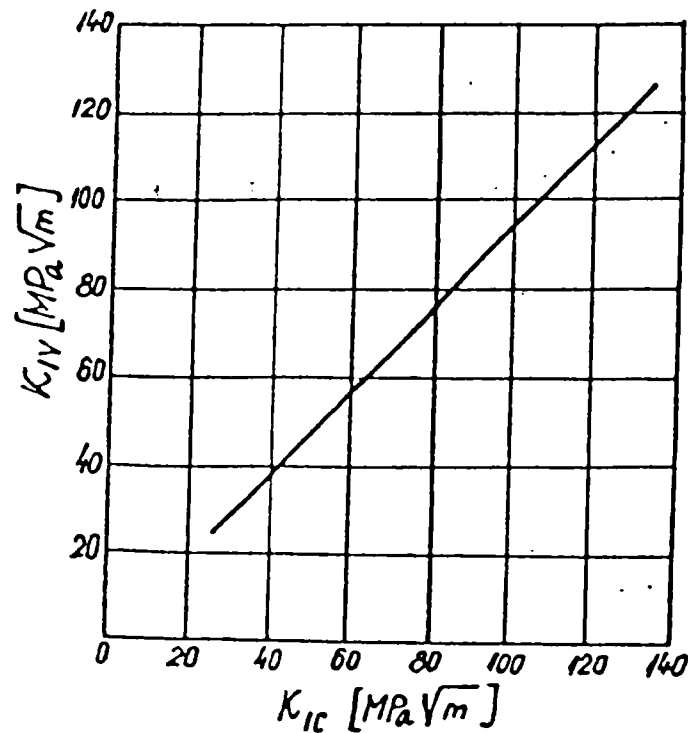


Fig. VI-35 [34]

Încercarea s-a realizat pe o mașină de încercat la tracțiune, adaptată pentru încercările de mecanică ruperii. Schița încercării este prezentă în fig. VI-36. Forța s-a măsurat prin intermediul unui tractor de forță (doză tensiometrică), iar deplasarea de deschidere a orificiului epruvetei, s-a măsurat cu ajutorul unui tractor de deplasare inductiv.

Sarcina s-a aplicat lent, continuu, progresiv și fără șocuri.

Tenacitatea la rupere pe epruvete Chevron, K_{IV} s-a determinat cu relația:

$$K_{IV} = A \cdot \frac{F_{\max}}{B^{3/2}} \quad [\text{N}/\text{mm}^{3/2}] \quad (\text{VI.25})$$

unde A – un coeficient în funcție de tipul epruvetei.

A = 22,0 pentru epruveta dreptunghiulară folosită, [267];

F_{\max} – forța maximă din înregistrarea forță - deplasare;

B – Grosimea epruvetei.

La toate epruvetele analizate inițierea fisurării s-a produs la vârful creștăturii, iar ruperea a rămas în planul creștăturii.

Una din diagramele forță – deplasare ridicată la încercarea epruvetei CV5 este prezentată în fig. VI-37 .

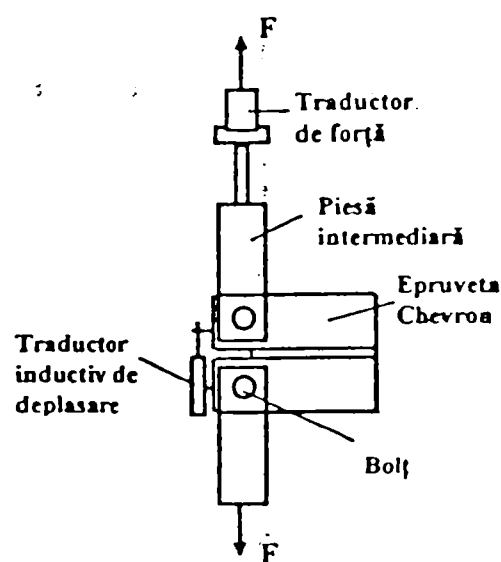


Fig. VI-36 [34]

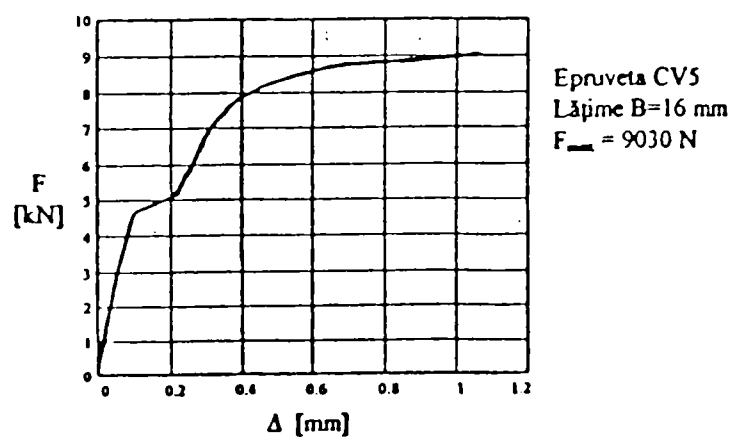


Fig. VI-37 [34]

S-a determinat experimental tenacitatea la rupere K_{IV} pe 3 epruvete din materialul St 52-3, al unui tirant care a fost supus solicitărilor, pe utilaj, timp de 12 ani, și pe 3 epruvete din OL 52-4K, construcție sudată.

Rezultatele obținute, la temperatura de 20°C, sunt prezentate în tabelul VI-11 .

Tabelul VI-11[34]

Materialul	Epruveta	Lățimea epruvetei B [mm]	Forța maximă F_{max} [N]	Tenacitatea la rupere K_{IV} [N/mm ^{3/2}]	Tenacitatea la rupere medie $\overline{K_{IV}}$ [N/mm ^{3/2}]
St 52-3	CV1	25	18710	3292,96	3297,65
St 52-3	CV2	25	19100	3361,60	
St 52-3	CV3	25	18400	3238,40	
OL 52-4K	CV4	16	8500	2921,87	3036,45
OL 52-4K	CV5	16	9030	3104,06	
OL 52-4K	CV6	16	8970	3083,44	

Valoarea medie obținută în urma încercării unui număr de 3 epruvete pentru fiecare material a fost:

- pentru oțelul St 52-3: $\overline{K_{IV}} = 3297,65 N / mm^{3/2}$

- pentru oțelul OL 52-4K:

$$\overline{K_{IV}} = 3036,45 N / mm^{3/2}$$

Conform corelației dată în fig. VI-35 6.20, din [66], se poate obține valoarea tenacității la rupere $K_{IC} = K_{IV} / 0,95$

În tabelul VI- 6.9 se prezintă comparativ valorile tenacității la rupere obținute experimental pentru cele două oțeluri și valorile indicate în bibliografie pentru oțelul St 52-3 și pentru oțelul american A533, care are compoziția chimică și caracteristicile mecanice apropiate de cele ale oțelurilor studiate.

Materialul	Tenacitatea la rupere K_{IV} [N/mm ^{3/2}]	Tenacitatea la rupere $K_{IC} = K_{IV} / 0,95$ [N/mm ^{3/2}] [MPa mm ^{1/2}]	Tenacitatea la rupere K_{IC} [MPa m ^{1/2}]
St 52 - 3 (analizat)	3297,65	3471,21	109,76
St 52 - 3 (bibliografie [S22])	-	-	100 - 110
OL 52 - 4K construcție sudată (analizat)	3036,45	3196,26	101,07
A533 (bibliografie [B4])	-	-	100

Tabelul VI-12 [34]

Pentru oțelul St 52-3 se observă că valoarea tenacității la rupere K_{IC} , determinată experimental, se încadrează în limitele prescrise în bibliografie, [214]. Valoarea

tenacității K_{IC} obținută pe epruvete prelevate din tirantul unui excavator care a funcționat 12 ani arată că nu apare fenomenul de fragilizare al oțelului din cauza exploatării.

VI.2.6.2 Determinarea factorului critic de intensitate a tensiunii, pe baza corelării cu celelalte caracteristici de material

În literatură există numeroase încercări privind corelarea tenacității la rupere K_{IC} cu celelalte caracteristici de material: limita de curgere a oțelului σ_c ($R_{p0,2}$), respectiv energia consumată la rupere, KV, determinată la încercarea de încovoiere prin șoc a epruvetelor cu creștătură în V.

Importanța acestor corelații este că *la ora actuală există un volum mare de date experimentale pentru caracteristicile de material clasice, valori estimate prin analize statistice complexe, dar mult mai puține valori ale tenacității la rupere.*

O astfel de corelație, propusă de Rolfe-Novak-Barsoum, pertinentă mărcii de oțel americane A533, care are compoziția chimică și caracteristicile statice apropiate de cele ale oțelurilor studiate, este prezentată în [35] sub forma:

$$\left(\frac{K_{IC}}{\sigma_c}\right)^2 = 4\left(\frac{KV}{\sigma_c} - 0,05\right) \quad (VI.26)$$

în care K_{IC} - factorul critic de intensitate a tensiunii, corespunzător stării plane de deformație, în $ksi\sqrt{inch}$

KV - energia consumată la rupere la încercarea de încovoiere prin șoc, pe epruvete cu creștătură în V, în m ft-lb

σ_c - limita de curgere a oțelului, în ksi

Ținând cont de conversia unităților de măsură:

1 Joule = 0,737 ft-lb; 1 MPa = 0,145 ksi; 1 MPa \sqrt{m} = 0,91 ksi \sqrt{inch}

și introducând valorile medii ale caracteristicilor de material obținute experimental pentru oțelul St 52-3, rezultă:

$$\sigma_c = 410 \text{ MPa} = 59,465 \text{ ksi}$$

$$KV - 66,3 \text{ J} = 48,9 \text{ ft-lb}$$

Din relația (VI 26) se obține valoarea factorului critic de intensitate a tensiunii:

$$K_{IC, cor} = 104,52 \text{ ksi} \sqrt{\text{inch}} = 114,86 [\text{MPa} \sqrt{\text{m}}]$$

Între valoarea factorului critic de intensitate a tensiunii obținută prin corelația cu celelalte caracteristici de material, $K_{IC, cor} = 114,86 [\text{MPa} \sqrt{\text{m}}]$, și cea obținută experimental prin încercările de mecanica ruperii pe epruvete Chevron, $K_{IC, exp} = 109,76 [\text{MPa} \sqrt{\text{m}}]$ (conform tabelului VI-12), există o bună concordanță. Abaterea relativă dintre valoarea obținută experimental și cea corelată fiind de:

$$\Delta = \frac{K_{IC, cor} - K_{IC, exp}}{K_{IC, cor}} 100 = 4,44\%$$

VI.2.6.3 Determinarea tenacității la rupere la temperaturi scăzute

Întrucât utilajele grele, de forma excavatoarelor lucrează și în condiții de temperaturi scăzute, s-a propus [34], punctul 6.7.3, determinarea tenacității la rupere la temperaturi scăzute și găsirea unei corelații între valoarea tenacității la rupere K_{IV} și temperatura de lucru T , în intervalul de temperaturi $[-30^\circ\text{C} \dots 20^\circ\text{C}]$.

În acest scop, răcirea epruvetelor s-a efectuat într-un vas adiabatic, cu un amestec de azot lichid și acetonă. Apoi metodologia de încercare și de interpretare a rezultatelor a fost identică cu cea de la încercarea de determinare a tenacității la rupere la temperatura ambiantă, utilizând epruvete Chevron. Epruvetele utilizate au fost prelevate dintr-un tirant aflat în exploatare timp de 12 ani, confecționat din oțel St 52-3. Forma și dimensiunile epruvetelor este cea din fig. VI-34 (grosimea epruvetelor - 25 mm).

Valorile experimentale ale tenacității la rupere obținute cu relația (VI.25) atât la temperaturi scăzute cât și la temperatura ambiantă sunt prezentate în tabelul VI-13

Tabelul VI-13 [34]

Epruveta	Temperatura T [°C]	Forța maximă F [kN]	Tenacitatea la rupere K _{IV} [MPa mm ^{1/2}]	Tenacitatea la rupere K _{IV} [MPa m ^{1/2}]	Tenacitatea la rupere medie $\overline{K_{IV}}$ [MPa m ^{1/2}]
CV1	20	18,71	3292,96	104,13	104,28
CV2	20	19,10	3361,60	106,30	
CV3	20	18,40	3238,40	102,41	
CV7	0	19,65	3458,40	109,36	110,88
CV8	0	20,80	3660,80	115,76	
CV9	0	19,32	3400,32	107,53	
CV10	-20	21,06	3706,56	117,21	120,45
CV11	-20	21,73	3824,48	120,94	
CV12	-20	22,14	3896,64	123,22	
CV13	-30	22,75	4004,00	126,61	127,69
CV14	-30	23,15	4074,40	128,84	
CV15	-30	22,93	4035,68	127,62	

Pentru a găsi o corelație între tenacitatea la rupere K_{IV} și temperatura T , variabilă în intervalul de temperaturi $[-30^{\circ}\text{C} \dots 20^{\circ}\text{C}]$, s-a trasat dreapta de regresie $K_{IV} = f(T)$, pe baza valorilor experimentale obținute (Fig. VI-38).

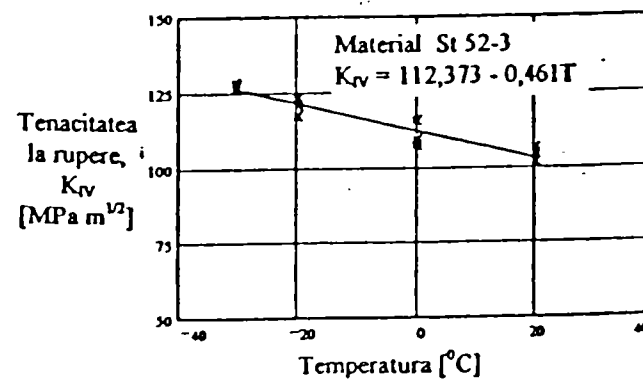


Fig. VI-38 [34]

Pentru intervalul de temperatură considerat $[-30^{\circ}\text{C} \dots 20^{\circ}\text{C}]$ s-a obținut următoarea corelație:

$$K_{IV} = 112,373 - 0,461 T \text{ [MPa} \cdot \text{m}^{1/2}] \quad (\text{VI.27})$$

Din tabelul VI-13 precum și din fig. VI-38 se constată că la temperaturi cuprinse în intervalul $[-30^{\circ}\text{C} \dots 20^{\circ}\text{C}]$ nu se produce fenomenul de fragilizare a oțelului St 52-3, respectiv temperatura de tranziție ductil-fragil nu este cuprinsă în intervalul de temperaturi considerat.

VI.2.7 Contribuții la estimarea durabilității tiranților excavatoarelor în ipoteza apariției unor fisuri

Presupunând că în tirant apare un defect de forma unei microfisuri, aceasta se poate dezvolta sub acțiunea solicitărilor variabile la care este supus tirantul.

Pomind de la acest aspect, s-a făcut un studiu asupra durabilității tirantului în diferite ipoteze corespunzătoare dispunerii fisurilor și dimensiunilor acestora.

Conform metodologiei privind evaluarea siguranței în exploatare a elementelor de rezistență, (Cap. V), o analiză a propagării prin oboseală a fisurii trebuie să se facă ținând seama de caracteristicile de material stabilite de autor prin încercări de materiale, de geometria structurii și de ciclurile de solicitare efective. Rezultatele obținute sunt exprimate în număr de cicluri până la rupere (Fig. VI-39).

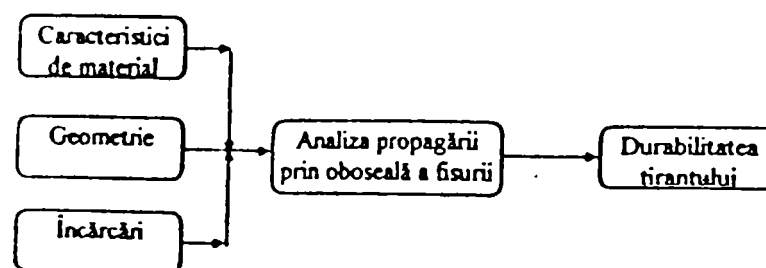


Fig. VI-39 [34]

Analiza propagării prin oboseală a fisurii s-a făcut pe baza conceptelor mecanicii ruperii liniar elastice. Ruperea tirantului se poate produce dacă:

- factorul de intensitate a tensiunii maxim $K_{I_{max}}$ atinge valoarea tenacității la rupere K_{Ic} , producându-se ruperea instabilă;
- fisura a străbătut întreaga lățime a tirantului.

Este cunoscută corelația dintre variația factorul de intensitate a tensiunii: $\Delta K_I = K_{I_{max}} - K_{I_{min}}$ și viteza de propagare a fisurii de oboseală da/dN pe baza legii lui Paris [35]:

$$\frac{da}{dN} = C \cdot \Delta K_I^n \text{ [mm/ciclu]} \quad (VI.28)$$

unde C - un coeficient, iar

n - un exponent, specifici fiecărui material, care se determină experimental, prin încercări de oboseală.

Pentru oțelul studiat St 52-3 și pentru coeficientul de asimetrie a ciclului, $R_s = \sigma_{\min}/\sigma_{\max} = 0,5$, în lucrarea [214] se dau:

$$C = 3,92 \cdot 10^{-10} \text{mm}^{2,5} / \text{nr. cicluri} \text{ și } n = 2,82$$

Întrucât spectrul de solicitare al tirantului în anumite regimuri se caracterizează prin coeficient de asimetrie $R_s \neq 0,5$, în calcule s-a analizat o formă corectată a relației VI.28, care să țină seama de coeficientul de asimetrie al ciclului;

$$\frac{da}{dN} = C \frac{\Delta K_I^n}{\sqrt{1/R_s}} \quad (\text{VI.29})$$

Calculul factorului de intensitate a tensiunii maxim $K_{I\max}$, respectiv minim $K_{I\min}$, s-a făcut cu relația:

$$K_{I\max,\min} = \sigma_{\max,\min} \sqrt{\pi} f(a/b) \text{ [N/mm}^{3,2}] \quad (\text{VI.30})$$

unde $\sigma_{\max,\min}$ - tensiunea maximă, respectiv minimă [MPa],

a - lungimea sau semilungimea fisurii [mm],

$f(a/b)$ - coeficient ce ține seama de modul de dispunere a fisurii;

b - lățimea sau semiînălțimea tirantului.

Pentru studiul durabilității tirantului au fost considerate trei ipoteze de calcul, în funcție de modul de dispunere a fisurii de oboseală.

A) Tirant cu fisură centrală (Fig. VI-40), [253], pentru care:

$$f(a/b) = \frac{1 - 0,5(a/b) + 0,37(a/b)^2 - 0,044(a/b)^3}{\sqrt{1 - (a/b)}} \quad (\text{VI.31})$$

B) Tirant cu fisură laterală (Fig. VI-41), [253], pentru care:

$$f(a/b) = 1,12 - 0,231\left(\frac{a}{b}\right) + 10,55\left(\frac{a}{b}\right)^2 - 21,72\left(\frac{a}{b}\right)^3 + 30,39\left(\frac{a}{b}\right)^4 \quad (\text{VI.32})$$

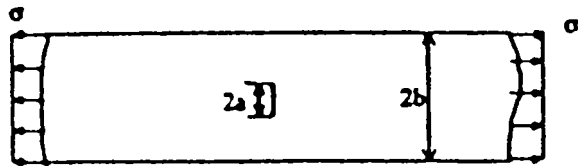


Fig. VI-40 [34], [253]

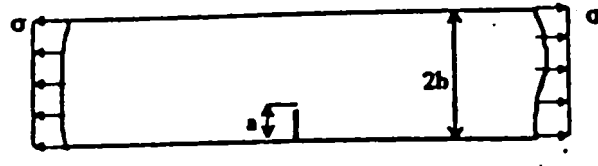


Fig. VI-41 [34][253]

C) Tirant cu două fisuri laterale, simetrice (Fig. VI-42), [253], pentru care:

$$f(a/b) = \frac{1,122 - 0,561(a/b) - 0,015(a/b)^2 - 0,091(a/b)^3}{\sqrt{1-(a/b)}} \quad (\text{VI.33})$$

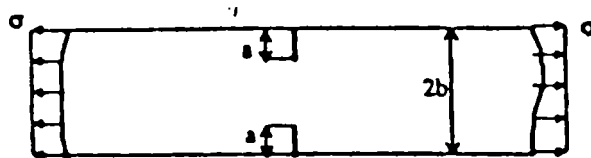


Fig. VI-42 [34], [253]

Deoarece oțelul St 52-3 prezintă o rupere mixtă precum și datorită nivelului încărcării, σ_{\max} , și concentrării puternice a tensiunii, în jurul vârfului fisurii se formează o zonă plastică limitată.

Pentru a lua în considerare enclava plastică ce se formează la vârful fisurii, s-a calculat, pe baza criteriului de plasticitate Von Mises, raza zonei plastice la vârful fisurii, r_p :

$$r_p = \frac{1}{6\pi} \left(\frac{K_{\max}}{\sigma_c} \right)^2 \quad (\text{VI.34})$$

Ținând cont de raza zonei plastice, s-au recalculat factorii de intensitate a tensiunii maxim $K_{I\max,cor}$ și minim $K_{I\min,cor}$, înlocuind lungimea fisurii cu o lungime corectată - egală cu lungimea fisurii plus raza zonei plastice:

$$= a + r_p \Rightarrow K_{I_{\max, \min}} = \sigma_{\max, \min} \sqrt{\pi(a + r_p)} f(a/b) \quad (\text{VI.35})$$

Pentru studiul propagării prin oboseală a fisurilor, care reprezintă un proces iterativ de integrare a relației (VI.29), la diferite creșteri ale lungimii fisurii "da" s-a realizat un program de calcul, numit **DURABIL**. Programul este scris în QBASIC și a fost rulat pe un calculator PC 586. Datele de intrare în program sunt:

- încărcările: tensiunile maximă σ_{\max} și minimă σ_{\min} , în [MPa]
- caracteristicile de material: limita de curgere σ_c , în [MPa]; tenacitatea la rupere, K_{Ic} [$\text{N}/\text{mm}^{3/2}$]; din legea lui Paris: constanta, C [$\text{mm}^{2.5}/\text{ciclu}$] și exponentul n;
- geometria tirantului: modul de dispunere a fisurii (centrală, 1 laterală, 2 laterale); lățimea tirantului, b [mm]; lungimea fisurii, a [mm]; creșterea fisurii, da [mm].

Programul calculează inițial: funcția de formă $f(a/b)$, factorii de intensitate ai tensiunii inițiali, $K_{I_{\max, ini}}$, $K_{I_{\min, ini}}$, variația inițială a factorului de intensitate a tensiunii $\Delta K_{I, ini}$, raza zonei plastice inițiale $r_{p, ini}$. Apoi, prin iterații: valorile funcției de formă, $f(ai/b)$; factorii de intensitate ai tensiunii, $K_{I_{\max, i}}$, $K_{I_{\min, i}}$; variația factorilor de intensitate ai tensiunii $\Delta K_{I, i}$; raza zonei plastice $r_{p, i}$; recalculează valorile corectate ale factorilor de intensitate a tensiunii $\Delta K_{I, \max, cor}$, $\Delta K_{I, \min, cor}$, ținând cont de zona plastică formată la vârful fisurii; numărul de cicluri N_i după care se realizează o creștere a fisurii "da" impusă.

Programul se oprește în momentul în care fisura de oboseală a străbătut întreaga lățime a tirantului, "b", sau când factorul de intensitate a tensiunii maxim $K_{I_{\max, fin}}$ a atins valoarea tenacității la rupere, K_{Ic} . Datele de ieșire din program sunt: raza zonei plastice finale $r_{p, fin}$; factorii de intensitate ai tensiunii, finali, $K_{I_{\max, fin}}$, $K_{I_{\min, fin}}$; variația finală a factorului de intensitate a tensiunii, $\Delta K_{I, fin}$; lungimea fisurii la care se produce ruperea tirantului, a_{fin} și numărul de cicluri la care se produce ruperea, N.

De asemenea, programul tratează:

- variația factorului maxim de intensitate a tensiunii în funcție de lungimea fisurii, $K_{I_{\max}} = f(a)$;

- variația lungimii fisurii în funcție de numărul total de cicluri, $a=f(N)$.

Schema logică a programului este prezentată în fig. VI-43 .



SCHEMA LOGICĂ A PROGRAMULUI DURABIL PENTRU DETERMINAREA NUMĂRULUI DE CICLURI PÂNĂ LA RUPERE, DATORATĂ PROPAGĂRII PRIN OBOSEALĂ A UNEI FISURI

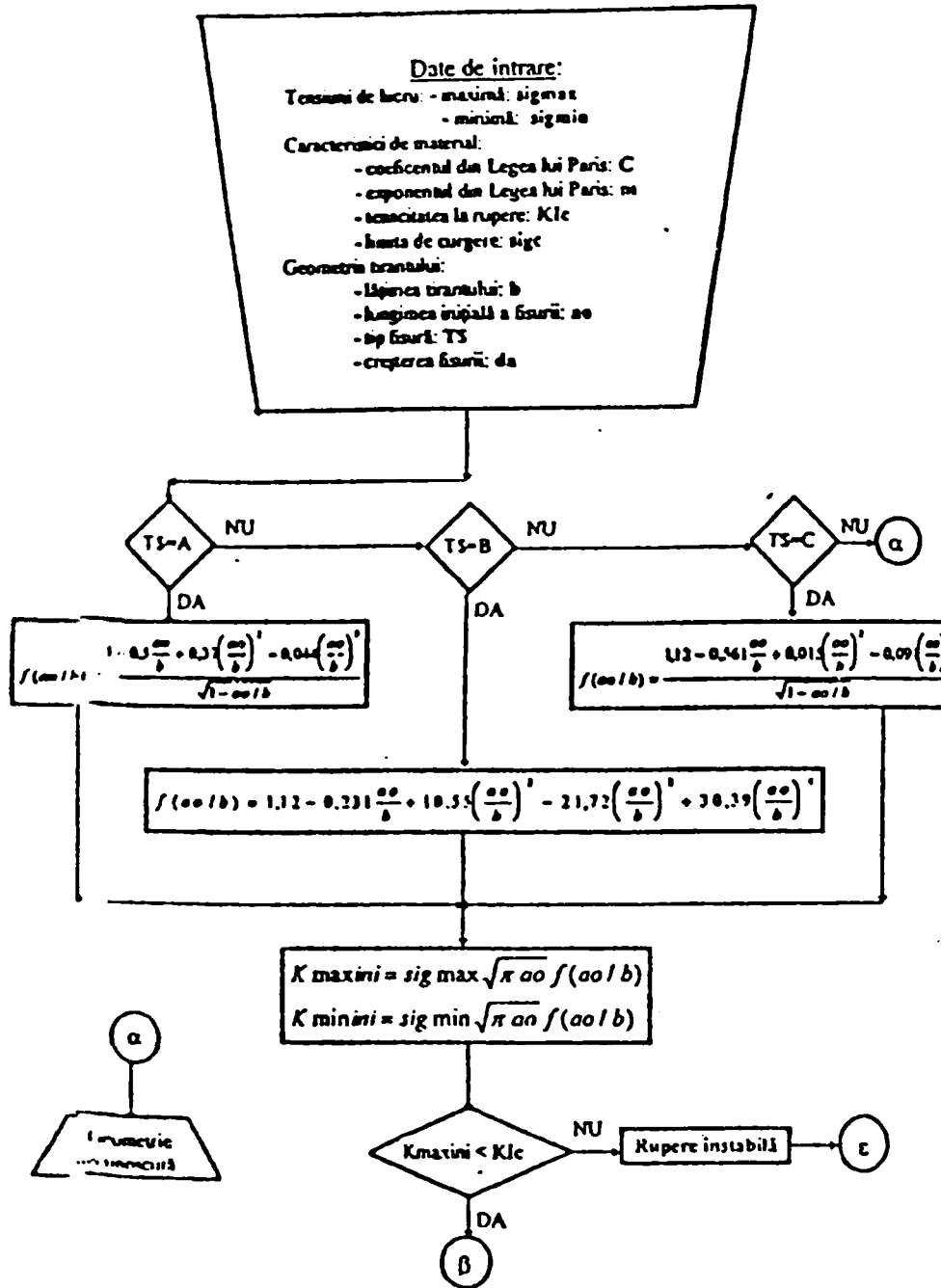


Fig VI-43 [34] / 1

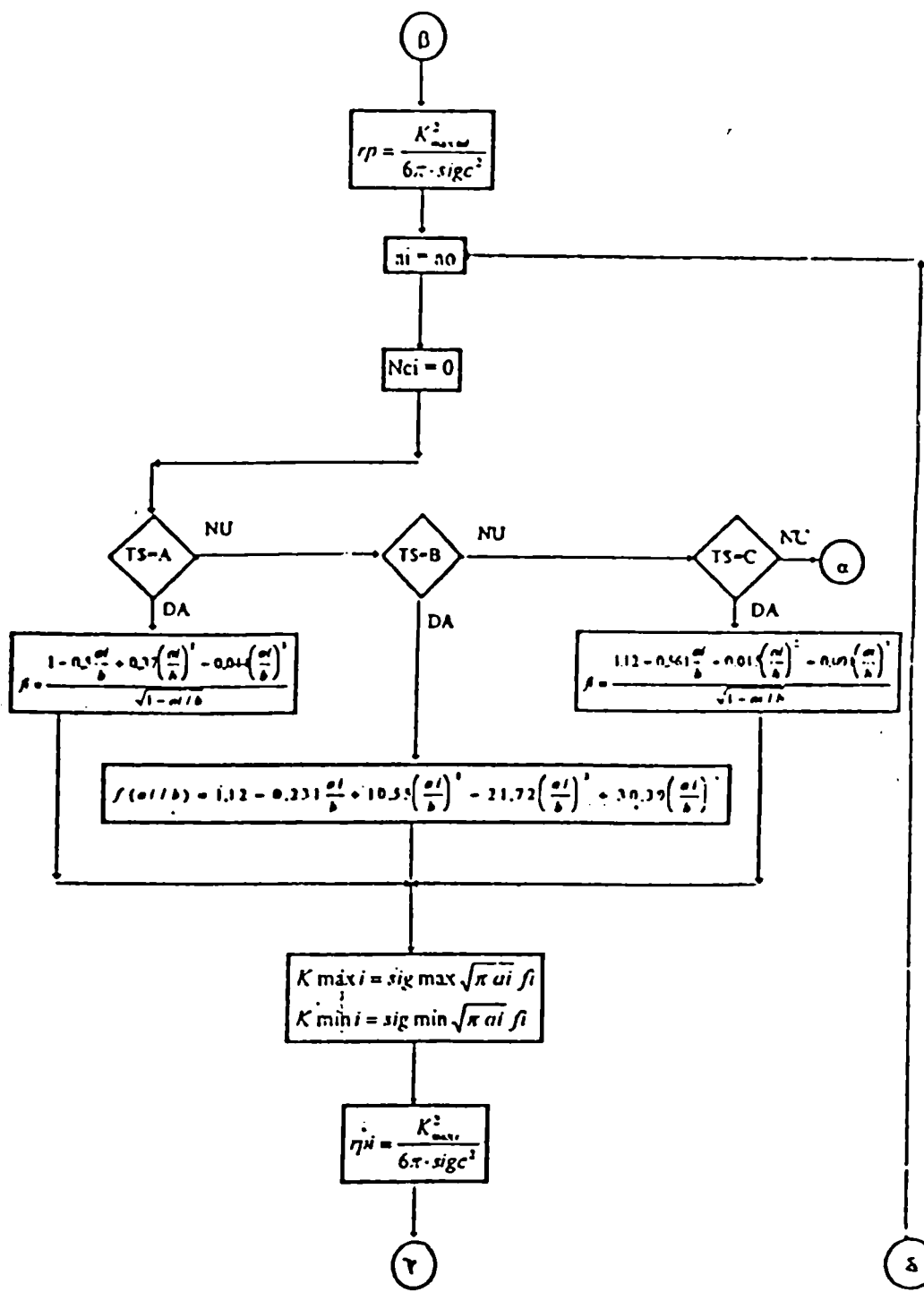


Fig. VI-43/2 [34]

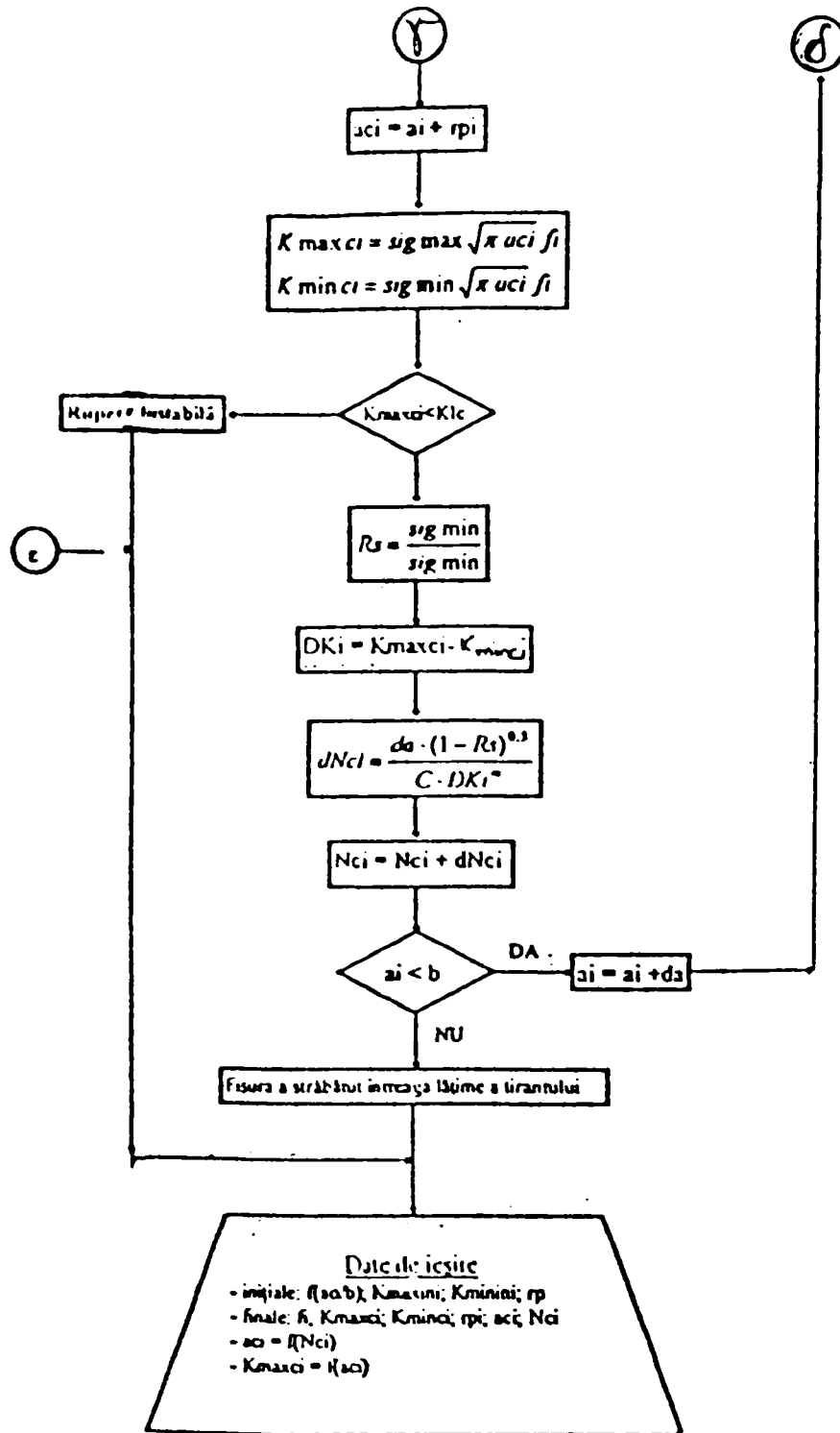


Fig. VI-43/3 [34]

Rezultatele obținute pentru câteva rulări sunt prezentate în tabelul VI-14[34] ; s-au considerat cele trei tipuri de dispunere (A,B și C) a fisurii și pentru fiecare din ele – câte patru lungimi diferite ale fisurii inițiale (2, 5,10 și 15 mm).

În figurile VI-44...VI-49 se prezintă variațiile $a = f(N)$ și $K_{I\max} = f(a)$ trasate pentru cele trei tipuri de fisuri (A – centrală, B – 1 laterală și C-2 laterale), pornind în fiecare caz de la o lungime inițială a fisurii $a = 2$ mm.

Programul DURABIL, și diagramele din figurile VI-44...VI-49 pot fi utilizate direct pentru evaluarea durabilității tiranților. Astfel, dacă printr-o anumită metodă se detectează în tirant o fisură, cu ajutorul diagramelor de mai sus se poate estima numărul de cicluri până la ruperea tirantului.

Tirant cu fisură centrală

Date de intrare

$$\sigma_{\max} = 99,3 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\min} = 73,6 \text{ MPa}$$

$$\sigma_C = 410 \text{ MPa}$$

$$K_{IC} = 3400 \text{ N/mm}^{3/2}$$

$$C = 3,92 \cdot 10^{-10}$$

$$N = 2,82$$

$$b = 150 \text{ mm}$$

$$a = 2 \text{ mm}$$

Fisura tip A

Date de ieșire:

- Inițiale:

$$f(a/b)_{\text{fin}} = 1,0001$$

$$K_{I\max, \text{fin}} = 184,50 \text{ N/mm}^{3/2}$$

$$K_{I\min, \text{fin}} = 184,50 \text{ N/mm}^{3/2}$$

$$r_p = 0,019 \text{ mm}$$

- finale:

$$f(a/b)_{\text{fin}} = 1,756$$

$$K_{I\max, \text{fin}} = 3400,06 \text{ N/mm}^{3/2}$$

$$K_{I\min, \text{fin}} = 2520,09 \text{ N/mm}^{3/2}$$

$$r_p = 3,541 \text{ mm}$$

$$a_c = 120,95$$

$$N = 37877,9 \text{ cicluri}$$

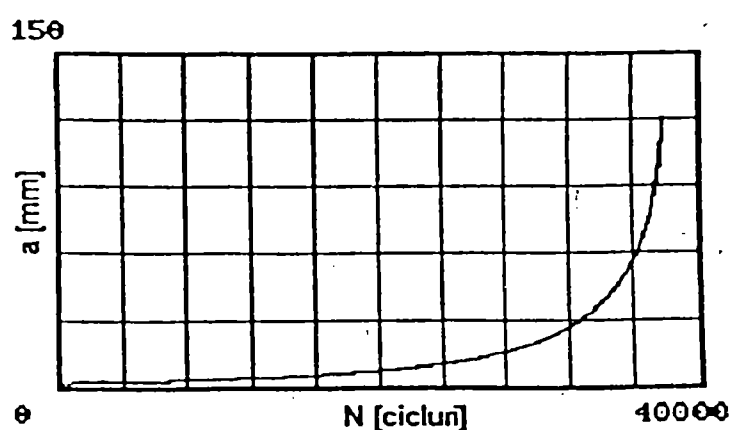


Fig. VI-44 [34]

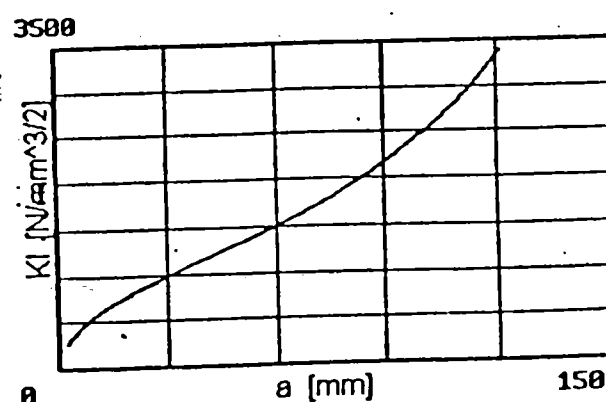


Fig. VI-45 [34]

Tirant cu fisură laterală

Date de intrare:

Date de ieșire:

$$\sigma_{\max} = 99,3 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\min} = 73,6 \text{ MPa}$$

$$\sigma_C = 410 \text{ MPa}$$

$$K_{IC} = 3400 \text{ N/mm}^{3/2}$$

$$C = 3,92 \cdot 10^{-10}$$

$$N = 2,82$$

$$b = 300 \text{ mm}$$

$$a = 2 \text{ mm}$$

Fisura tip B

- inițiale:

$$f(a/b)_{\text{fin}} = 1,1189$$

$$K_{I\max, \text{fin}} = 278,51 \text{ N/mm}^{3/2}$$

$$K_{I\min, \text{fin}} = 206,43 \text{ N/mm}^{3/2}$$

$$r_p = 0,024 \text{ mm}$$

- finale:

$$f(a/b)_{\text{fin}} = 1,855$$

$$K_{I\max, \text{fin}} = 3400,05 \text{ N/mm}^{3/2}$$

$$K_{I\min, \text{fin}} = 2520,08 \text{ N/mm}^{3/2}$$

$$r_p = 3,529 \text{ mm}$$

$$a_c = 108,44$$

$$N = 26517,9 \text{ cicluri}$$

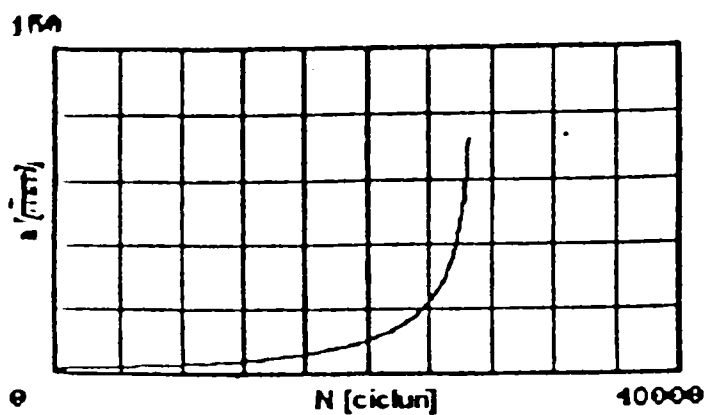


Fig. VI-46 [34]

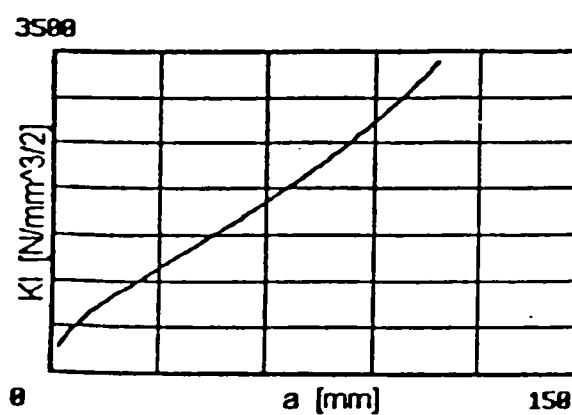


Fig. VI-47 [34]

Tirant cu 2 fisuri laterale

Date de intrare

$$\sigma_{\max} = 99,3 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\min} = 73,6 \text{ MPa}$$

$$\sigma_C = 410 \text{ MPa}$$

$$K_{IC} = 3400 \text{ N/mm}^{3/2}$$

$$C = 3,92 \cdot 10^{-10}$$

$$N = 2,82$$

$$b = 150 \text{ mm}$$

$$a = 2 \text{ mm}$$

Fisura tip C

Date de ieșire:

- inițiale:

$$f(a/b)_{\text{fin}} = 1,1220$$

$$K_{I\max, \text{fin}} = 279,51 \text{ N/mm}^{3/2}$$

$$K_{I\min, \text{fin}} = 206,99 \text{ N/mm}^{3/2}$$

$$r_p = 0,025 \text{ mm}$$

- finale:

$$f(a/b)_{\text{fin}} = 1,703$$

$$K_{I\max, \text{fin}} = 3400,11 \text{ N/mm}^{3/2}$$

$$K_{I\min, \text{fin}} = 2520,12 \text{ N/mm}^{3/2}$$

$$r_p = 3,548 \text{ mm}$$

$$a_c = 128,47 \text{ mm}$$

$$N = 28187,0 \text{ cicluri}$$

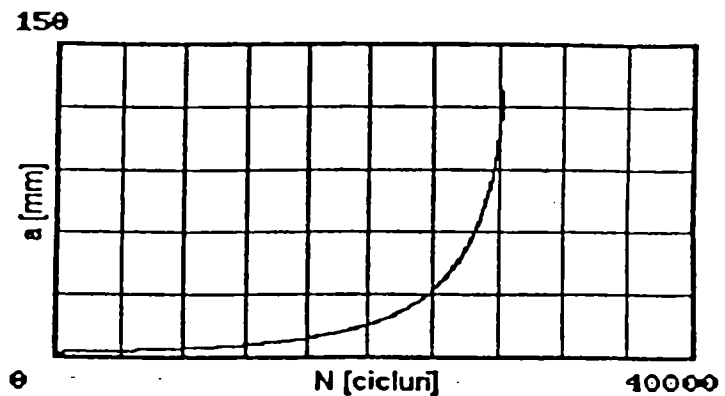


Fig. VI-48 [34]

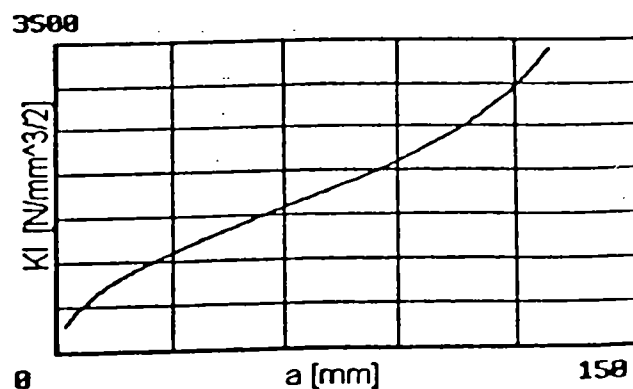


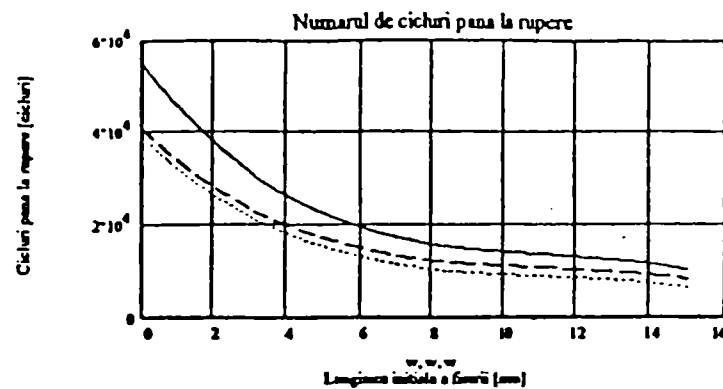
Fig. VI-49 [34]

Tabelul VI-14

Tip fisur	Lung maxim fisur a mm	$(a/b)_0$	Fit.	Raza	$(a/b)_0$	Fit.	Raza	$(a/b)_0$	Fit.	Raza	Lung maxim a fisur ac mm	Nr de cicluri la rupere N
			maxim inpal $K_{I,0}$ N/mm ^{3/2}	inpal $r_{p,0}$ mm		maxim final $K_{I,max}$ N/mm ^{3/2}	inpal final $r_{p,max}$ mm					
A	2	1,0001	184,50	0,019	1,756	3400,06	3,541	120,95	37877,9			
A	5	1,0006	393,78	0,049	1,756	3400,06	3,541	120,95	22442,9			
A	10	1,0023	557,85	0,092	1,756	3400,05	3,541	120,94	14080,7			
A	15	1,0052	685,23	0,148	1,756	3400,04	3,541	120,95	10208,3			
B	2	1,1189	278,51	0,024	1,855	3400,05	3,529	108,44	26317,9			
B	5	1,1198	440,38	0,061	1,855	3400,05	3,529	108,44	15301,6			
B	10	1,1232	625,17	0,123	1,855	3400,04	3,529	108,44	9233,1			
B	15	1,1323	771,85	0,188	1,855	3400,04	3,529	108,44	6451,1			
C	2	1,1220	279,27	0,025	1,703	3400,11	3,548	128,47	28187,0			
C	5	1,1221	441,63	0,061	1,704	3401,65	3,548	128,46	17064,9			
C	10	1,1226	624,83	0,123	1,704	3400,11	3,548	128,46	11076,4			
C	15	1,1235	765,84	0,185	1,703	3400,15	3,548	128,46	8216,2			

S-au considerat: - încărcările: $\sigma_{max} = 99,3$ MPa, $\sigma_{min} = 73,6$ MPa
- constantele de material: $K_{Ic} = 3400$ N/mm^{3/2}, $\sigma_c = 410$ MPa, $C = 3,92 \cdot 10^{-10}$, $n = 2,82$
- lăpimea tirantului: $b = 300$ mm
- creșterea fisurii $da = 0,01$ mm

În fig. VI-50 se prezintă, pentru cele trei cazuri considerate, variația numărului de cicluri până la rupere, în funcție de lungimea inițială a fisurii.



— Fisura tip A; --- Fisura Tip B; --- Fisura tip C

Fig. VI-50 [34]

Concluzii:

La acest punct s-a prezentat un model matematic de estimare a durabilității unui tirant în cazul în care după o anumită perioadă de funcționare apare o fisură. Această metodologie se bazează pe conceptele mecanicii ruperii materialelor.

La calculul durabilității tirantului s-a ținut cont și de enclava plastică care se formează la vârful fisurii.

Analizând cele trei cazuri studiate se pot trage următoarele concluzii:

- indiferent de lungimea inițială a fisurii, pentru un anumit mod de dispunere a acesteia, lungimea critică a fisurii de la care se produce ruperea instabilă este aceeași, a_c ;
- cea mai defavorabilă situație corespunde apariției în tirant a unei fisuri laterale (Fig. VI-41);
- apariția unor fisuri în tirant diminuează considerabil durata de viață în comparație cu numărul de cicluri până la rupere obținut prin încercările la oboseală, în care se include și perioada de incubație a fisurii;

-după un anumit număr de cicluri de funcționare, periodic, se recomandă efectuarea unor investigații nedistructive pe tirant, care împreună cu metodologia prezentată mai sus să poată furniza informații privind durabilitatea tirantului.

VI.2.8 Estimarea durabilității elementelor de îmbinare ale tirantului unui excavator

VI.2.8.1 Alcătuirea constructivă a îmbinărilor unui tirant

Tirantul unui excavator este realizat din mai multe tronsoane rigidizate prin elemente de îmbinare. Cercetările teoretice și experimentale au dovedit că în zonele de îmbinare apare un puternic efect de concentrare a tensiunilor, fapt ce poate conduce la apariția unor fisuri sau ruperi.

Un astfel de element de legătură, este urechea de prindere, reprezentată în fig. VI-51

Aplicarea metodei elementelor finite a permis modelarea stării de tensiune din urechile de prindere ale tirantului, unde solicitările de contact, asociate cu o serie de condiții de lucru specifice UG, favorizează apariția fisurilor, care au condus în unele cazuri la ruperea tiranților. S-a utilizat metoda elementelor finite și pentru determinarea factorului de intensitate a tensiunii, considerând o fisură care se dezvoltă din orificiul circular al urechii. În final, s-a efectuat, tot cu ajutorul metodei elementelor finite, un studiu al propagării fisurii, cauzată de solicitări variabile.

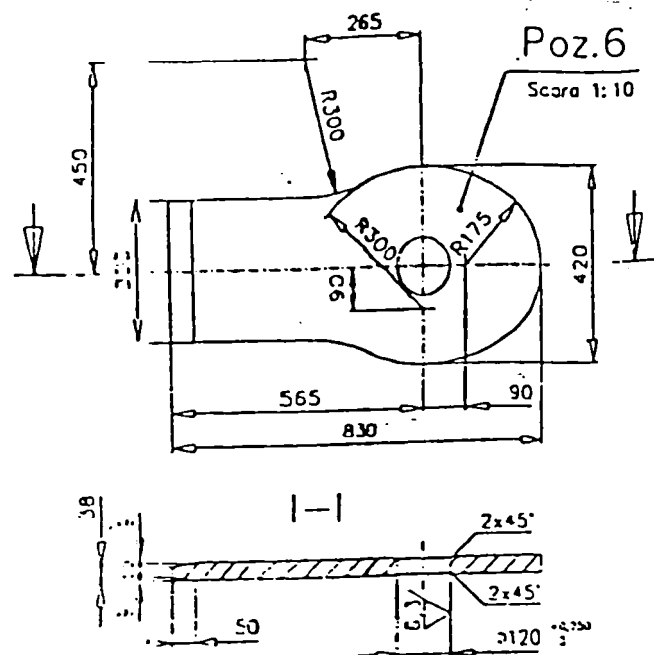


Fig. VI-51 [34]

VI.2.8.2 Determinarea prin analiză cu elemente finite a stării de tensiune din urechea tirantului de excavator

S-a efectuat analiza stării de tensiune la o ureche cu geometria din fig. VI-51, cu programul de calcul FRANC2D/L. Preprocesarea s-a realizat cu programul CASC. După definirea geometriei, a constantelor de material și a constantelor geometrice (în acest caz, grosimea urechii - 38 mm), s-a realizat discretizarea, utilizând elemente finite triunghiulare cu 6 noduri pe element de tip placă SHELL3. Discretizarea s-a făcut în 493 de elemente conectate în 1055 noduri, conform fig. VI-52

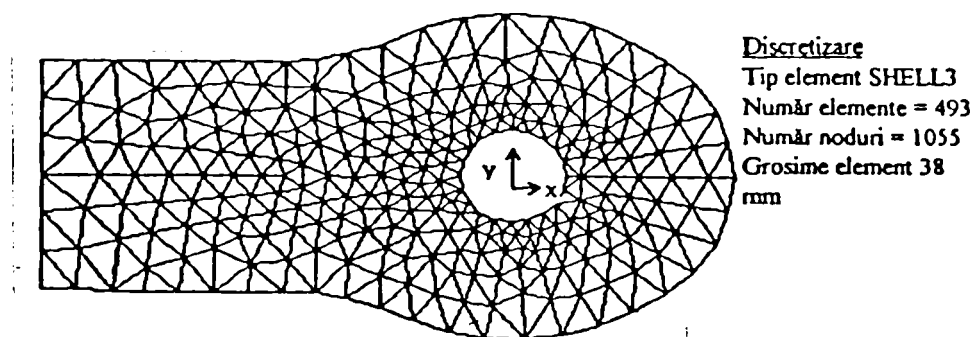


Fig. VI-52 [34]

După discretizare s-au definit rezemările și încărcările. Astfel s-au blocat deplasările pe direcțiile x și z ale nodurilor din partea stângă a urechii, partea rigidizată cu tirantul. Pentru a modela cât mai exact încărcarea care se transmite urechii, datorită îmbinării cu bolt, s-au adoptat următoarele ipoteze:

- calculul urechii s-a efectuat pe baza valorii maxime a încărcării tirantului în timpul exploatării, corespunzătoare tensiunii maxime $\sigma_{\max} = 99,3$ MPa. Ținând cont

că la capetele fiecărui tirant există două urechi de prindere,

rezultă $\sigma_{\max, \text{ureche}} = 49,65 \text{ Mpa}$;

-întrucât transmiterea sarcini se realizează prin intermediul unui bolț, s-a considerat că încărcarea se face cu sarcină distribuită, normală pe suprafața orificiului, iar variația acesteia este după o lege parabolică, fig. VI-53 ;

-definirea încărcării s-a făcut pe jumătate din suprafața orificiului, astfel: având valoarea 0 la extremități și valoarea P_{\max} la mijloc; expresia valorii maxime a încărcării P_{\max} , este dată în [251] de relația:

$$P_{\max} = \frac{F\pi^2}{16Rt} \quad (\text{VI.36})$$

unde:

F - forța axială transmisă de ureche

$$F = \sigma_{\max, \text{ureche}} A_{\text{ureche}} = 49,65 \times 300 \times 38 = 566010 [\text{N}]$$

R = 60 mm - raza orificiului urechii;

t = 38 mm - grosimea urechii;

$$\text{Rezultă: } P_{\max} = \frac{566010\pi^2}{16 \cdot 60 \cdot 38} = 153,13 \text{ MPa}$$

În fig. VI-54 se prezintă variația tensiunii σ_x obținută în urma rulării programului FRANC2D/L, iar în fig. VI-55 - variația tensiunii σ_y .

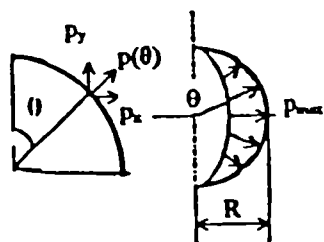


Fig. VI-53 [34]

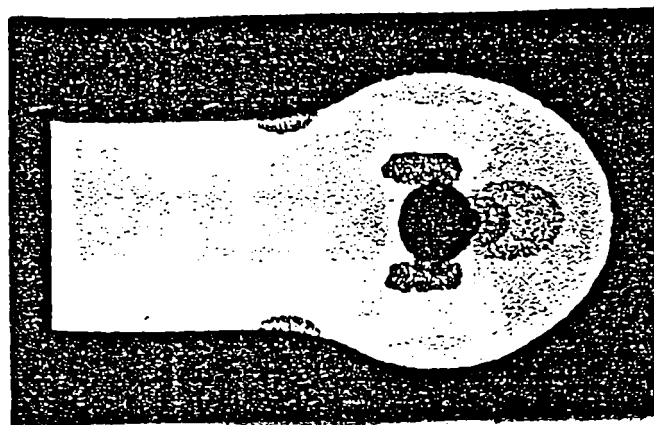


Fig. VI-54 [34]

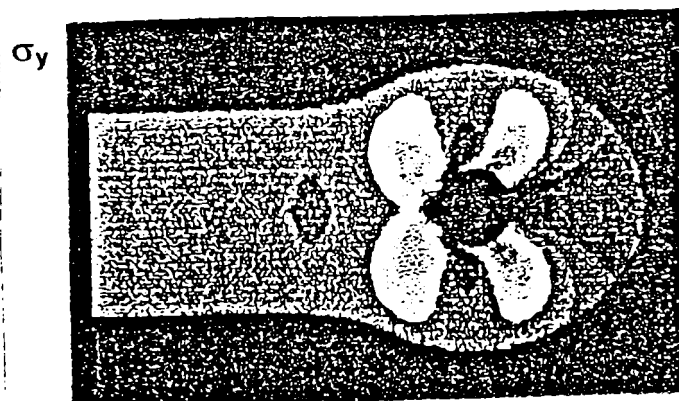
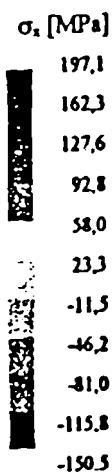
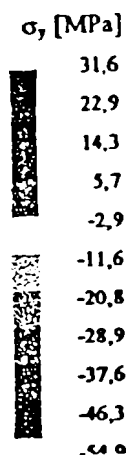


Fig. VI-55 [34]



Din figurile VI-54 și VI-55 se observă fenomenul de concentrare a tensiunilor, în jurul orificiului circular.

În tabelul VI-15 se prezintă variația tensiunilor σ_x și σ_y pe direcția x, pornind de la suprafața orificiului circular spre extremitatea urechii.

Tabelul VI-15 [34]

NOD	DIST. DE LA MARGINEA ORIFICIULUI x [mm]	TENSIUNEA	
		σ_x [MPa]	σ_y [MPa]
65	0,00	-147,89	27,24
1028	10,33	-119,47	30,84
70	18,60	-102,31	30,81
913	37,20	-72,51	27,98
71	53,73	-50,70	24,56
765	70,26	-38,87	22,70
72	86,80	-28,66	21,82
617	105,04	-20,89	21,00
73	126,07	-14,59	20,86
474	148,80	-9,19	20,86
74	171,53	-4,77	20,76
283	188,07	-2,45	20,85
1	205,00	-0,64	20,95

În tabelul VI-16 se prezintă variația tensiunilor σ_x și σ_y pe direcția y , pornind de la suprafața orificiului circular spre extremitatea urechii.

Tabelul VI-16 [34]

NOD	DIST. DE LA MARGINEA ORIFICIULUI y [mm]	TENSIUNEA	
		σ_x [MPa]	σ_y [MPa]
50	0,00	204,45	-3,31
934	10,81	118,44	9,19
104	21,62	87,19	12,18
642	35,52	58,91	10,72
640	47,88	52,15	8,93
499	63,33	42,19	5,69
497	80,32	34,53	3,23
316	98,86	26,58	1,62
314	126,66	15,22	0,20
50	150,00	3,91	0,07

În figurile VI-56 și VI 57 sunt reprezentate variațiile tensiunilor σ_x și σ_y , pe direcțiile x , respectiv y , care pornesc din orificiul circular.

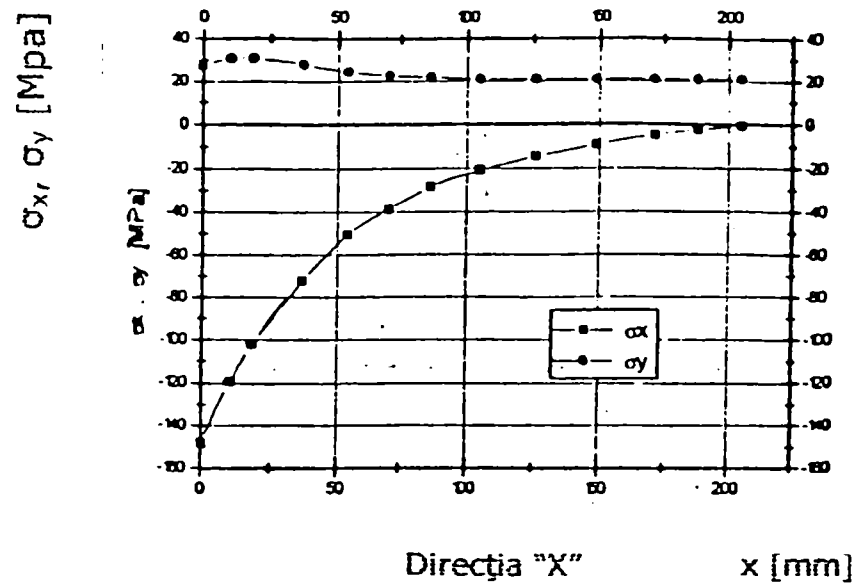


Fig. VI-56 [34]

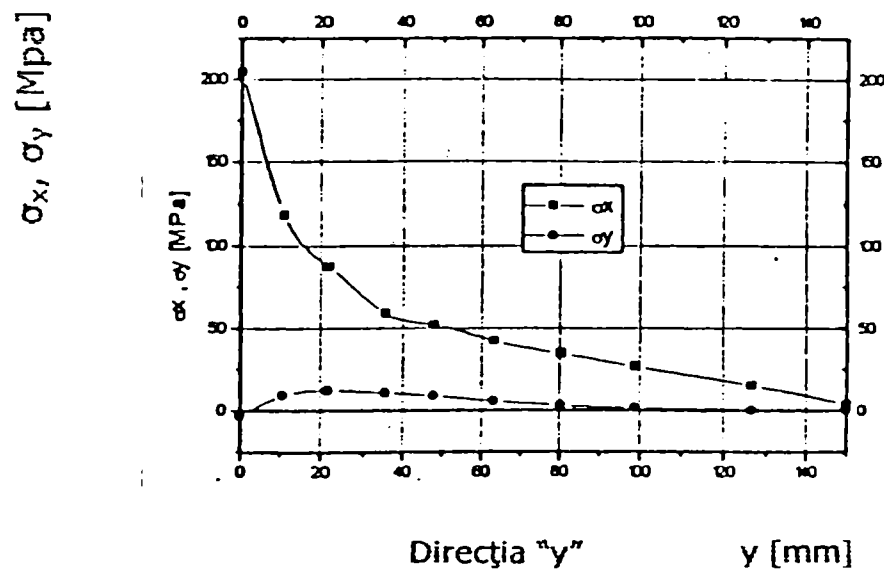


Fig. VI-57 [34]

Se observă că tensiunea maximă σ_x se obține pe conturul orificiului, pe direcția y :

$\sigma_x = 204,45$ Mpa. Cu această valoare s-a calculat coeficientul teoretic de concentrare a tensiunilor k_t , obținut în urma analizei cu elemente finite:

$$K_t = \frac{\sigma_{\max, \text{orificiu}}}{\sigma_{\max, \text{urcbe}}} = \frac{204,45}{49,65} = 4,118 \quad (\text{VI.37})$$

VI.2.8.3 Determinarea factorului de intensitate a tensiunii pentru o fisură ce se dezvoltă din orificiul circular

S-a determinat variația factorului de intensitate a tensiunii K_t , în funcție de lungimea unei fisuri, care se dezvoltă din orificiul circular.

Pentru a studia variația factorului de intensitate a tensiunii K_I în funcție de lungimea fisurii "a", s-au definit în programul FRANC2D/L fisuri cu lungimi de 10... 135 mm, conform tabelului VI-17. Programul a rediscretizat zona adiacentă fisurii, creând singularitatea la vârful acesteia, apoi pentru fiecare lungime a fisurii a fost rulat programul, înregistrând valoarea factorului de intensitate a tensiunii, obținut prin metoda extrapolării deplasărilor. Drept exemplu, în fig. VI-58 se prezintă zona adiacentă fisurii pentru lungimea fisurii $a = 15$ mm, iar în fig. VI-59 - distribuția tensiunii în vecinătatea fisurii. În fig. VI-60 se prezintă deformata zonei din vecinătatea fisurii pentru lungimea maximă a fisurii, $a = 135$ mm.

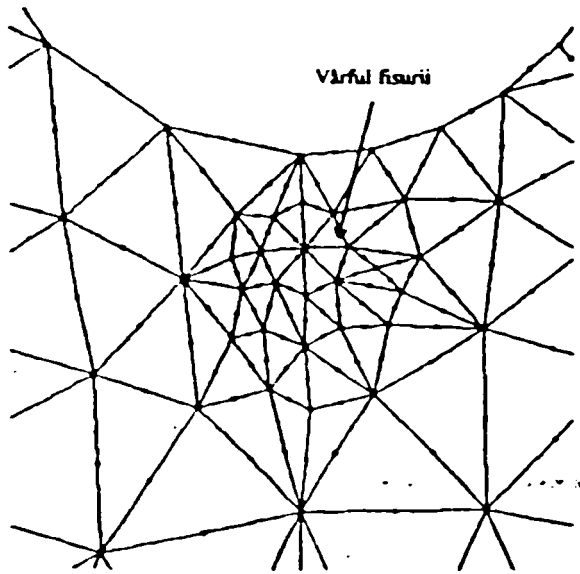


Fig. VI-58 [34]

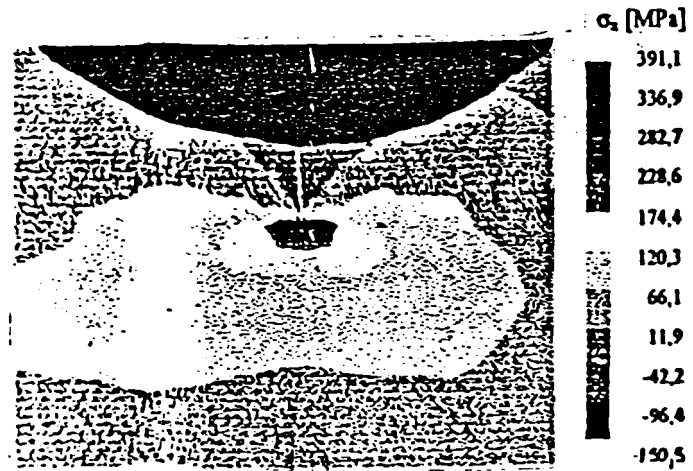
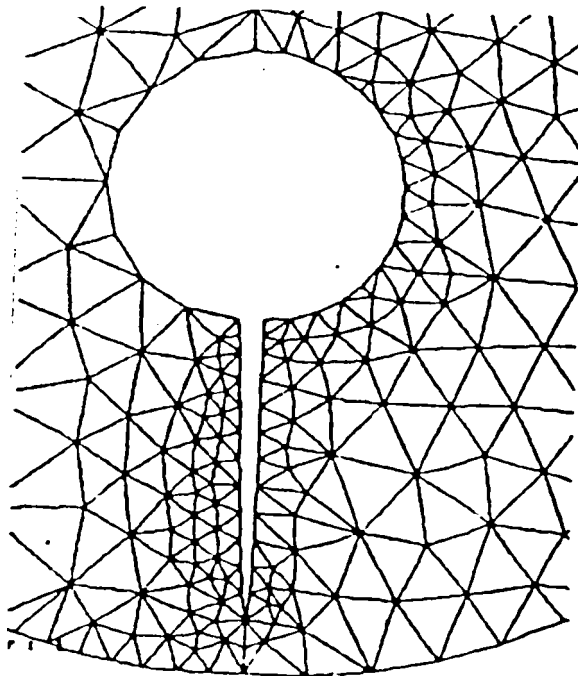


Fig. VI-59 [34]

Rezultatele obținute în urma rulărilor sunt prezentate în tabelul VI-17, iar variația factorului de intensitate a tensiunii K_I în funcție de lungimea fisurii "a" este prezentată în fig. VI-61

Fig. VI-60 [34]



Tabelul VI-17 [34]

Lungime fisură a [mm]	10	15	30	45	60	75	90	105	120	135
Fact. int. tensiunii K_I [N/mm ^{3/2}]	845,8	910,5	951,1	967,0	997,2	1029	1087	1175	1326	1615

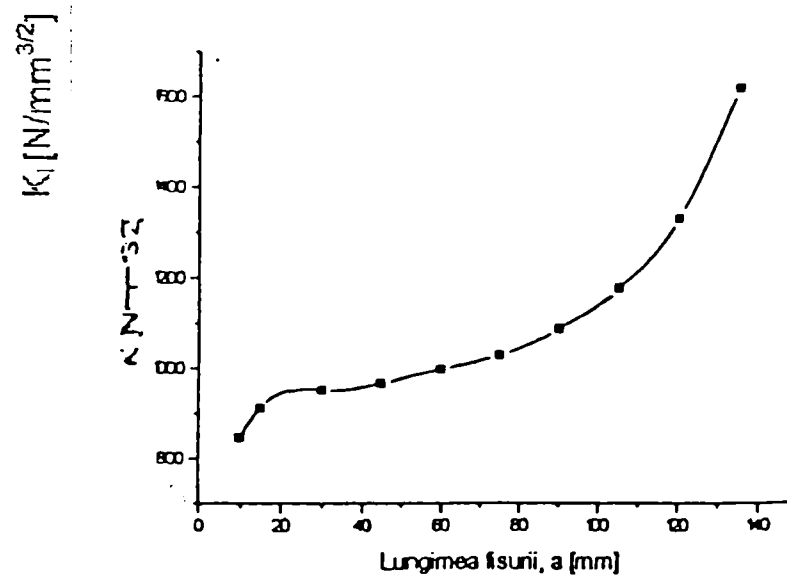


Fig. VI-61 [34]

Comparând:

- valorile factorului de intensitate a tensiunii K_I pentru fisura ce se dezvoltă din orificiul circular al urechii de prindere cu
- valoarea tenacității la rupere pentru oțelul St 52-3, din care este confecționată urechea, $K_{IC} = 3400 \text{ N/mm}^{3/2}$ - determinată experimental (punctul VI.2.6.1),

se poate aprecia că pentru toate lungimile fisurii $K_I < K_{IC}$, adică factorul de intensitate a tensiunii nu atinge valoarea tenacității la rupere, deci nu apare pericolul ruperii instabile a urechii datorită dezvoltării unei fisuri din orificiul circular.

VI.2.8.4 Determinarea durabilității urechii sub acțiunea sarcinilor variabile

Problema pusă a fost de a se determina creșterea lungimii unei fisuri dezvoltate din orificiul circular al urechii de prindere sub acțiunea ciclurilor de oboseală și care este numărul de cicluri până la rupere.

Determinarea numărului de cicluri în funcție de lungimea fisurii s-a efectuat cu programul FRANC2DL, opțiunea PROPAGATE. Pentru studiul propagării fisurii cu ajutorul metodei elementelor finite, programul rediscretizează și rezolvă sistemul de

ecuații pentru fiecare creștere a fisurii. Rularea a durat 73 minute, pentru efectuarea întregii analize

Programul FRANC2DL calculează, pentru fiecare creștere a fisurii, direcția de propagare a acesteia. În cazul studiat, direcția de propagare a fost perpendiculară pe axa longitudinală.

Deoarece studiul propagării fisurii se realizează pe baza legii lui Paris, relația (VI.28, VI.29), trebuie introduse ca și constante de material: coeficientul "C" și exponentul "n", din legea lui Paris, și tenacitatea la rupere, K_{IC} . Urechea fiind din același material ca și tirantul, adică St 52-3, s-au folosit valorile:

$$C = 3,92 \cdot 10^{-10} \text{ mm}^{2,5}/\text{nr. de cicluri} \text{ și } n = 2,82$$

Analiza propagării fisurii s-a efectuat începând de la o lungime a fisurii $a_0 = 10 \text{ mm}$, iar propagarea s-a realizat în 70 de pași, pentru fiecare pas considerându-se o creștere a fisurii $da = 2 \text{ mm}$. Variația tensiunii care produce solicitarea variabilă s-a considerat:

$$\Delta\sigma = \sigma_{\text{max, ureche}} - \sigma_{\text{min, ureche}} = 49,65 - 36,8 = 12,85 \text{ MPa.}$$

Rularea (73 minute) a furnizat variația numărului de cicluri N în funcție de lungimea fisurii "a", fig. VI-62

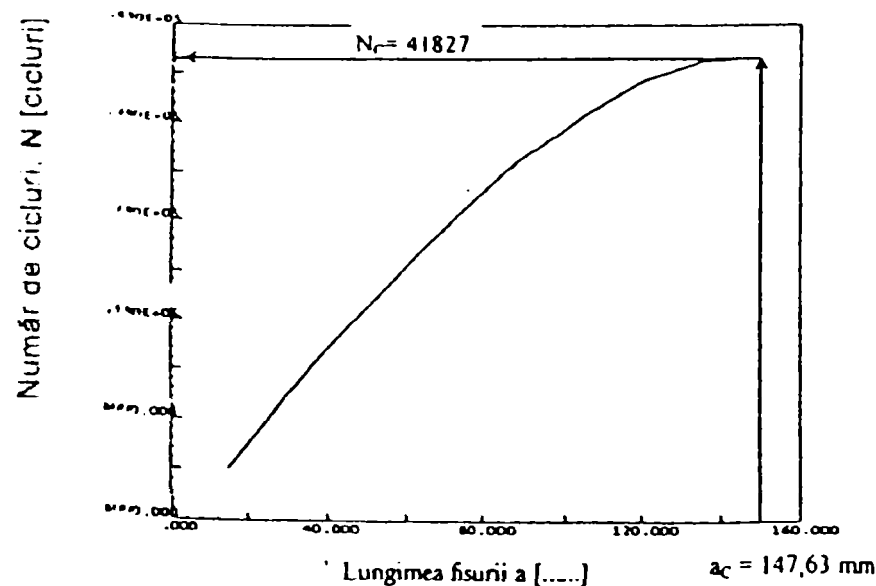


Fig. VI-62 [34]

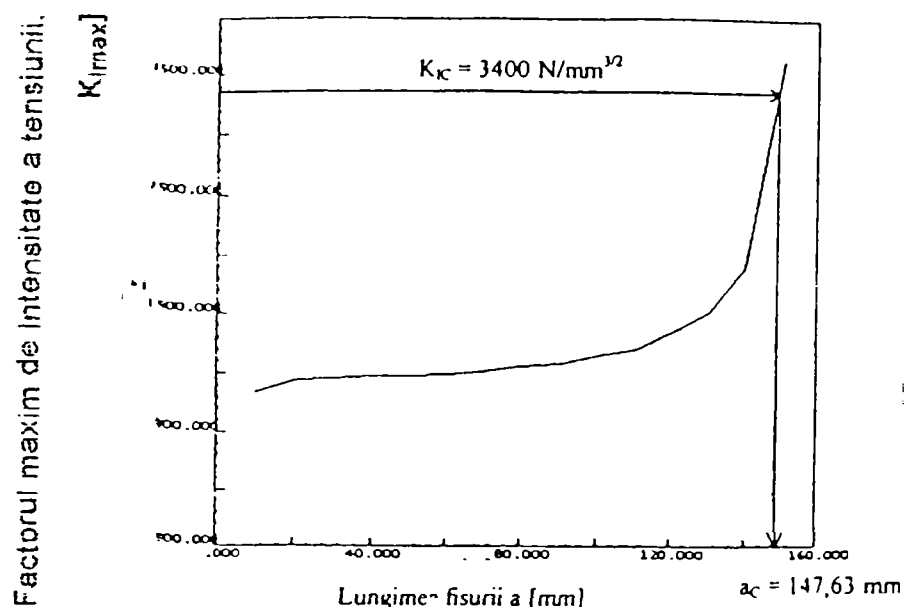


Fig. VI-63 [34]

În fig. VI-63 este reprezentată curba variației factorului maxim de intensitate a tensiunii $K_{I,max}$ în funcție de lungimea fisurii "a" la propagarea prin oboseală a fisurii; se constatăm că ea are aceeași alură ca și curba variației factorului de intensitate a tensiunii trasată în urma analizei cu elemente finite, fig. VI-61 .

Comparând valoarea tenacității la rupere $K_{Ic} = 3400 \text{ N-mm}^{3/2}$, determinată experimental, pentru oțelul St 52-3, cu curba de variație a factorului maxim de intensitate a tensiunii, se poate determina lungimea critică a fisurii a_c la care $K_{I,max} = K_{Ic}$, rezultând $a_c = 147,63 \text{ mm}$.

Cunoscând lungimea critică a fisurii, a_c , din fig. VI-62 se poate determina numărul de cicluri până la rupere. Astfel, pentru ca fisura inițială (de lungime $a = 15 \text{ mm}$) să ajungă la lungimea critică $a_c = 147,63 \text{ mm}$, sunt necesare un număr de $N_c = 41827$ cicluri.

VI.3 CONCLUZII PRIVIND APLICAREA CONCEPTELOR MECANICII RUPERII LA EVALUAREA DURATEI DE VIAȚĂ A UTILAJELOR GRELE

Din studiul efectuat asupra durabilității tiranților excavatoarelor se pot trage următoarelor concluzii:

1. În încercările descrise valorile caracteristicile mecanice la tracțiune determinate pentru oțelul St 52-3 sunt foarte apropiate de cele obținute pe aceeași marcă de oțel

în institute de prestigiu străine [214] oțelul St 52-3, prin caracteristici, poate fi considerat echivalent cu oțelul românesc OL 52-4k.

2. Încercările la oboseală la diferite grade de asimetrie ale ciclurilor, caracterizate prin $\sigma_{min} = 73,6 \text{ N/mm}^2$ au evidențiat următoarele:

- la epruvetele din oțel St 52-3, pentru tensiuni $\sigma_{max} > 150 \text{ MPa}$, rezultatele experimentale se situează în jurul curbei de rupere prin oboseală obținute la $R = 0,5$, ceea ce este satisfăcător, deoarece la grade de asimetrie $R < 0,5$ rezistența la oboseală scade [Tab VI-8];

- la tensiuni maxime, $\sigma_{max} < 150 \text{ MPa}$, durabilitatea epruvetelor a depășit pe cea corespunzătoare gradului de asimetrie $R = 0,5$, încercările fiind oprite înainte de rupere;

- încercările pe epruvete sudate din oțel OL 52-4K au dovedit o comportare bună la solicitări variabile, pentru gradul de asimetrie $R=0,184$ și $R=0,26$. Deși epruvetele au suduri și gradele de asimetrie au fost mai mici decât $R=0,5$, punctele s-au plasat foarte aproape de curba de rupere la oboseală a oțelului St 52-3 nesudat [Fig. VI-22];

- încercările pe epruvete cu concentrator de tensiune de forma orificiului circular au evidențiat o scădere a durabilității. Astfel, durabilitatea tuturor epruvetelor încercate, la diferite grade de asimetrie ale ciclurilor, s-a situat sub curba de rupere prin oboseală. [Fig. VI-23, VI-27] [Tab. VI-9]

Comportarea la solicitări variabile relevă faptul că ruperea epruvetelor s-a făcut în jurul curbei de durabilitate, atât la epruvetele confecționate din oțelul tirantului, St 52-3, cât și la cele sudate, executate din OL 52-4k. De exemplu, pentru un ciclu de solicitare având $\sigma_{max}=245 \text{ MPa}$ și $R_s=0,3$, rezultatele experimentale sunt prezentate, pentru comparație, în tabelul VI-18, respectiv în fig. VI-64

Tabelul VI-18 [34]

Tip epruvetă	Material	Număr cicluri		
		inițiere rupere, [122]	rupere, [122]	rupere (experimental)
Plată	St 52-3	24.000	500.000	376.200
Cu orif. circular	St 52-3			268.000
Sudată	OL 52-4K			432.000

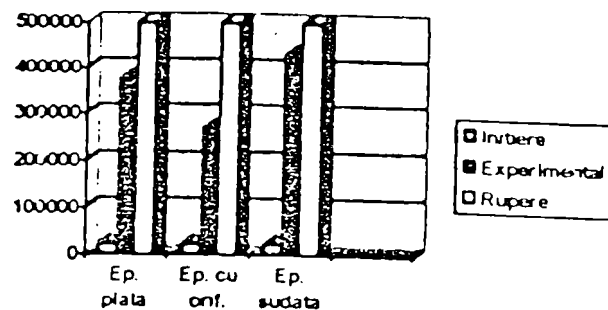


Fig. VI-64 [34]

3. Încercările de reziliență pentru oțelul St 52-3 au evidențiat, pentru toate temperaturile, că energia de rupere este mult superioară valorii limită de 27 J, ceea ce arată că acest oțel mai are rezervă pentru a-și păstra capacitatea de deformare.

4. Încercările la întindere dinamică au dovedit existența unui punct de maxim în ceea ce privește energia consumată la rupere corespunzătoare vitezei de șoc $v_0 = 4,85$ m/sec. La depășirea acestei viteze de impact, scade capacitatea de absorbție a energiei de rupere la tracțiunea prin șoc.

5. Încercările de mecanica ruperii pentru determinarea lui K_{IC} au evidențiat următoarele:

- valoarea tenacității la rupere a oțelului St 52-3, determinată la temperatura ambiantă, s-a situat în limitele prevăzute în literatură pentru oțeluri cu compoziție chimică și caracteristici mecanice statice apropiate;
- tenacitatea la rupere a oțelului St 52-3, determinată în condiții de temperaturi scăzute, până la -30°C nu a evidențiat fenomenul de fragilizare. În legătură cu aceasta s-a propus, pentru intervalul de temperaturi studiat $[-30^{\circ}\text{C} \dots +20^{\circ}\text{C}]$, o corelație între tenacitatea la rupere și temperatură (relația VI.27 [34]).

6. Pe baza tenacității la rupere determinată experimental, se propune un model de calcul al durabilității la oboseală a unui tirant, cu utilizarea conceptelor mecanicii ruperii. Modelul de calcul folosește legea lui Paris - care corelează viteza de propagare a fisurii de oboseală da/dN cu variația factorului de intensitate a tensiunii ΔK_I - , dar ține seama și de coeficienții de asimetrie ai ciclurilor. De asemenea,

modelul propus ia în considerare raza unei zone plastice care se formează la vârful fisurii, pe baza criteriului de plasticitate Von Mises.

Calculul durabilității tiranților se face cu ajutorul unui program elaborat de unul din autorii lucrării [34], fiind luate în considerare trei moduri de dispunere a fisurilor în tirant

Prezența unor fisuri detectate prin metode nedistructive asociate acestei metode de calcul permite estimarea durabilității la solicitări variabile.

7 Studiul cu elemente finite a urechii de prindere a tirantului a evidențiat:

- efectul de concentrare a tensiunilor cauzat de orificiul circular, exprimat prin coeficientul teoretic de concentrare a tensiunilor, cu valoarea $k_t=4,118$;
- variația factorului de intensitate a tensiunii maxime $K_{I,max}$, în funcție de lungimea unei fisuri ce se dezvoltă din orificiul circular;
- studiul propagării prin oboseală a fisurii a permis determinarea lungimii critice a fisurii la care urechea tirantului se rupe, $a_c=147,63$ mm, și numărul de cicluri până la rupere, $N_c=41827$. Comparând acest N_c cu valorile durabilității tirantului cu fisură, înscrise în tabelul VI-14, se constată că durabilitatea urechii este mai mare decât cea a tirantului. În fig. VI-65 se prezintă comparativ durabilitățile tirantului, respectiv a urechii, în ipoteza existenței unei fisuri inițiale de lungime $a_0 = 10$ mm.

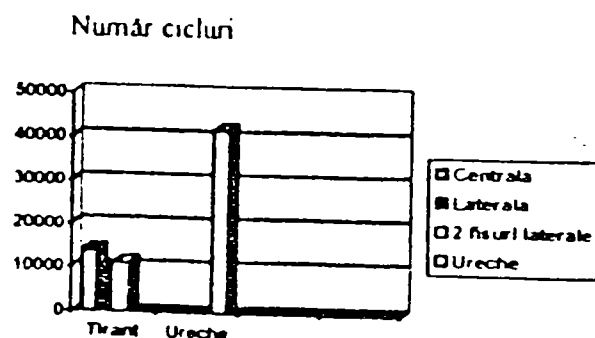


Fig. VI-65 [34]

VII. CONCLUZII

1. Punctul de plecare al prezentei lucrări l-au constituit realitățile economice expuse la cap. I, care reclamă folosirea unor IR și UG peste durata de viață normată. În lipsa unor documente normative (standarde, reglementări tehnice etc.), Prompt SA Timișoara, prin cercetări proprii și prin folosirea unor rezultate ale colaborărilor cu Universitatea "Politehnica" Timișoara, a elaborat între anii 1991... 1995 o primă metodologie de expertizare a instalațiilor de ridicat. Teza de față, vizând structura portantă (SP) a acestor utilaje – adică ansamblul de bază, purtător de identitate, "scheletul", pe care se amplasează celelalte componente – este inițiată și s-a dezvoltat din necesitatea găsirii unei soluții la problema evaluării stării tehnice (degradării) a unei SP care a fost supusă la solicitări variabile aleatorii în timp, concentrându-se pe aspecte mai puțin aprofundate sau neabordate în metodologia referită mai sus (precum: aspecte legate de mecanica ruperii; probleme specifice UG; calcule tipice, interpretate, pentru a servi în practică drept modele de calcul; calcule de durabilitate cu programe pe calculator etc.).

2. Stadiul actual în evaluarea capacității ER ale SP de a mai suporta sarcini variabile în timp poate fi considerat a fi reprezentat de metodologia "Prompt SA", aplicată în numeroase expertizări. Din prezentarea metodologiei (cap. II) rezultă:

- STAS 8290 [244], de calcul a SP, are prevederi de verificare la oboseală cu aplicabilitate limitată la faza de proiectare a SP, după un spectru convențional tip de solicitări;

- prestandardul Eurocode 3 (EC3) [107] are, în plus față de [244] prevederi explicite de cumulare a degradărilor pentru ER cu istoric de solicitare real; de asemenea, tot în plus față de [244], are prevederi de determinare a temperaturii minime peste care nu apare ruperea fragilă; pentru aceste considerente, este oportună prezența [107] în metodologie;

- metodologia a fost dezvoltată, pentru a cuprinde specificul UG, prin lucrări ale autorului tezei [179], în care este elaborat un "Program de desfășurare a unei expertize"; ca elemente de particularizare se menționează: - "Fișa utilajului", care culege informații despre istoricul de solicitare; - operațiuni de constatare la fața locului, cu modele de "Fișe de verificări și măsurări", pentru ansamblurile reprezentative; - măsurări "in situ", pentru

determinarea sarcinilor statice și dinamice; modul de abordare a acestor investigații în [179] are similitudini cu prevederile [264]

3. Cunoașterea defectărilor sistematice ale SP deschide calea unei alegeri corecte a procedurilor de expertizare. Pentru a obține informații cât mai obiective despre defectări, s-a apelat la surse diferite ca spațiu geografic și organizare; pe acest criteriu s-au utilizat statistici din România, Germania, Suedia. Statisticile defectărilor grave la SP (cap. III) ale IR din România, făcute pe 983 de cazuri, pe perioada 1970...1990, dezvăluie că peste jumătate (53 %) se produc în exploatare. Din descrierea a 19 avarii deosebit de grave, rezultă că 30 % sunt cauzate de suprasarcini, iar 30 % de suduri necorespunzătoare. La UG, sudurile sunt cauza a 17 % din defectiunile grave. Statisticile din alte țări indică ponderi asemănătoare. În Germania (fosta RDG), în perioada 1945...1984, la SP ale IR s-au produs 39 % din totalul avariilor, iar la SP ale UG (17 +23) %. În exploatare, având drept cauză neîndeplinirea îndatoririlor, fără precizarea ansamblului, procentul avariilor a fost de 69 %- la macarale și de 50 %-la UG. În Suedia, în anul 1999, 30 % din avarii au avut loc la SP; din totalul defectărilor IR, fără numirea ansamblurilor, 50 % au fost determinate de greșeli de manipulare. Din cifrele citate și din diagramele de la cap. III, chiar dacă statisticile nu utilizează criterii de clasificare identice, se poate constata că defectiunile au cauze multiple, dar că pot fi semnalate și cauze preponderente. Astfel, din statistici rezultă că **în exploatare se manifestă cei mai mulți factori perturbatori**: exploatarea nerațională (regimuri dure, blocarea unor limitatoare de sarcină sau de moment), nerespectarea perioadelor de revizii sau de reparații capitale, personal operator care nu întotdeauna respectă funcționarea în regim de lucru normal al utilajelor, suprasarcini, vibrații necontrolate. Toți acești factori induc solicitări care adesea depășesc solicitările estimate la proiectare. Ca urmare, se produc degradări premature, în unele cazuri ajungându-se la avarii. Este deci de așteptat ca un utilaj care a lucrat o un anumit timp să fi fost solicitat la un alt spectru de încărcări decât cel (convențional-tip) estimat la proiectare. Rezultă că, de regulă, situația este complexă. Se impune cunoașterea cât mai exactă a acestui istoric de încărcare. Dar, din motive subiective, de comportament uman, la expertizări beneficiarul nu dezvăluie toate aspectele de suprasolicitare. De aceea:

metodele de evaluare a degradării ER trebuie să implice un complex de proceduri, care să poată evidenția caracteristicilor în care au ajuns ER;

- se justifică efortul de studii și cercetări în domeniul evaluării duratei de viață consumate /disponibile; rezultatele unor proceduri trebuie corelate și interpretate; se cere experiență și profesionalism desăvârșit în efectuarea expertizelor.

4. Analizându-se (la cap. IV) modul în care se aplică prevederile [107] privind calculul la stări limită se subliniază:

– necesitatea includerii în metodologiile de expertizare a [107], care are prevederi atât pentru calculul de verificare la oboseală la proiectarea unei SP noi, pe baza unui spectru de solicitare teoretic convențional, cât și pentru evaluarea degradării unei SP cu istoric de solicitare real; [244] nu are prevederi decât pentru faza de proiectare; de asemenea [107] are prevederi pentru calculul temperaturii minime peste care nu există riscul ruperii fragile, iar [244] nu are asemenea prescripții; prin urmare [107] acoperă complet domeniile de calcul la 2 stări limită care intervin primordial în calcularea duratei de viață: oboseala și ruperea fragilă;

– conceptul de siguranță modern al [107], semiprobabilist, și , corespunzător, metoda de calcul semiprobabilistică, metoda stărilor limită–MSL; prin metoda semiprobabilistă a stărilor limită (a coeficienților diferențiați) efectul încărcărilor și al caracteristicilor de material sunt prinse mai bine în calcule, prin afectarea încărcărilor și a caracteristicilor de material de coeficienți aleși judicios, pe baze statistice; la baza calculelor din [244] stă metoda rezistențelor admisibile –MRA, mai puțin judicioasă;

– posibilitatea de corelare a documentațiilor existente cu prevederile [107]

– încreștările din [244] au fost identificate la detaliile constructive prezentate în [107], stabilindu-se tabele cu detalii modificate (reproduse după [107], cu o coloană în plus în care s-au notat simbolurile încreștărilor (A se vedea [179] a autorului tezei.);

– ER tipice ale IR au fost încadrate în "categoriile de detalii" ale [107] (întocmindu-se planșe utilizabile în practica de expertizare; A se vedea cap II.)

– aplicabilitatea [107] în practica de expertizare; s-a demonstrat prin numeroase lucrări, exemplificate prin:

– lucrări de evaluare a duratei de viață, prin calcularea și cumularea degradărilor;

– stabilirea temperaturii minime peste care nu mai are loc ruperea fragilă, într-o lucrare complexă de expertizare [201], a unei avarii de SP a unui pod rulant, autorul tezei fiind coordonator tehnic al expertizării. Temperatura au fost calculată conform [107], iar rezultatul a fost confirmat de celelalte analize și investigații asociate (metalografice, de

studiere a istoricului de încărcare, de verificare a calculelor de rezistență din faza de proiectare, confruntarea cu condițiile de ambianță);

- [107] este elaborat pornind la un înalt nivel de cunoștințe în domeniu, în UE fiind inclus în sistemul de standarde de calculul al SP, "Eurocoduri structurale". Competența elaboratorilor, recunoașterea [107] într-un spațiu economic și geografic extrem de larg, piederă pentru implementarea lui, care constituie o premisă de acces și de integrare pe piața acestui teritoriu. Lucrările prezentate mai sus au demonstrat aplicabilitatea [107] pentru evaluarea duratei de viață a unui utilaj cu istoric de încărcare real.

5 Pentru dezvoltarea stadiului actual de evaluare a degradării ER ale SP solicitate de spectre aleatorii de sarcini variabile, în baza unor lucrări publicate anterior [30] [31] [34], în cap. V sunt sistematizate și prezentate:

metodologii (5) aplicabile succesiv, prin care se evaluează nivelul de degradare și durata de viață a unei SP (verificări experimentale ale SP, încercări pe epruvete, activități de laborator):

- încercările de materiale, de rezistență sau de mecanica ruperii, insistându-se asupra acestora din urmă, fiind foarte puțin abordate în metodologia actuală; se descriu particularitățile și se fac recomandări de utilizare; programul de încercări trebuie să cuprindă probe din ER cel mai solicitat și din material identic, dar nesolicitat; trebuie corelări și cu alte procedee: studii microfractografic, care să evidențieze stadiile de evoluție a fisurii și de microduritate, măsurată "in situ" pe ER cel mai solicitat, exploatarea agregatului cu ultrasunete sau raze X, pulberi magnetice, lichide penetrante etc.;

- încercările la oboseală cu amplitudine constantă;

- se citează cercetări care demonstrează că fiecare ciclu produce o degradare;

se constată dispersia mare a rezultatelor, unele situându-se la nivelul abaterilor metalului nesolicitat; de aici – necesitatea unei analize ample și coroborarea mai multor proceduri de investigare;

- încercările la oboseală cu amplitudine variabilă; se semnalează metodele moderne de realizare a unor spectre cât mai aproape de cele aleatoare din realitate:

- metode care folosesc tehnica digitală, cu blocuri programabile; se realizează cel mai simplu și pot exprima rezultatele prin curbe Wöhler;

- metode care utilizează tehnica analogică,
 - reguli de cumulare a degradărilor sub acțiunea spectrelor cu amplitudine variabilă;
 - schematizarea unui mod de determinare a duratei de viață, bazat pe rezultatele obținute prin încercări la oboseală, pentru brațul roții cu cupe al unui excavator.

6. Studiile de estimare a durabilității, prin analiza propagării fisurilor la ER caracteristice din SP, ale UG prezentate la cap. VI, sunt utile în expertizări, prin modelele de calcul și de interpretare. Se menționează:

- durabilitatea unei grinzi cu fisură [31]; se utilizează program FRANC2D/L de modelare cu elemente finite; în final rezultă numărul de cicluri până la rupere;

- încercări de material și de mecanica ruperii asupra tiranților de excavator [34], lucrare vastă și complexă;

- Încercările de material (tracțiune, oboseală, reziliență) au dat rezultate care concordă cu cele efectuate în străinătate, confirmând competența laboratoarelor autohtone;

- s-a prezentat și realizat determinarea tenacității la rupere, prin metoda Chevron, adecvată din cauza grosimii mici a tirantului;

- s-au prezentat, din literatură, formule de calcul a K_{Ic} , cu ajutorul mărimilor pentru care există numeroase date experimentale; se vizează realizarea economică a expertizărilor și variante de corelare a rezultatelor;

- se prezintă o corelație între K_{Iv} și temperatură, pentru intervalul de temperatură $[-30^{\circ}\text{C}...20^{\circ}\text{C}]$, așa cum a rezultat din analiza încercărilor pe epruvete tip Chevron, în [34];

- durabilitatea tiranților excavatoarelor, în ipoteza apariției unor fisuri [34]

Pe baza tenacității la rupere, determinată experimental, se prezintă, după [34], modelul de calcul al durabilității la oboseală a unui tirant, model care utilizează concepte din mecanica ruperii. Studiul fenomenelor a fost aprofundat și în calcule s-a introdus o corecție a relației lui Paris, care ține seama de coeficientul de asimetrie al ciclului. S-a realizat programul de calcul **DURABIL**. Una din datele de ieșire semnificative, care interesează în practica expertizării, este numărul de cicluri la care se produce ruperea, N .

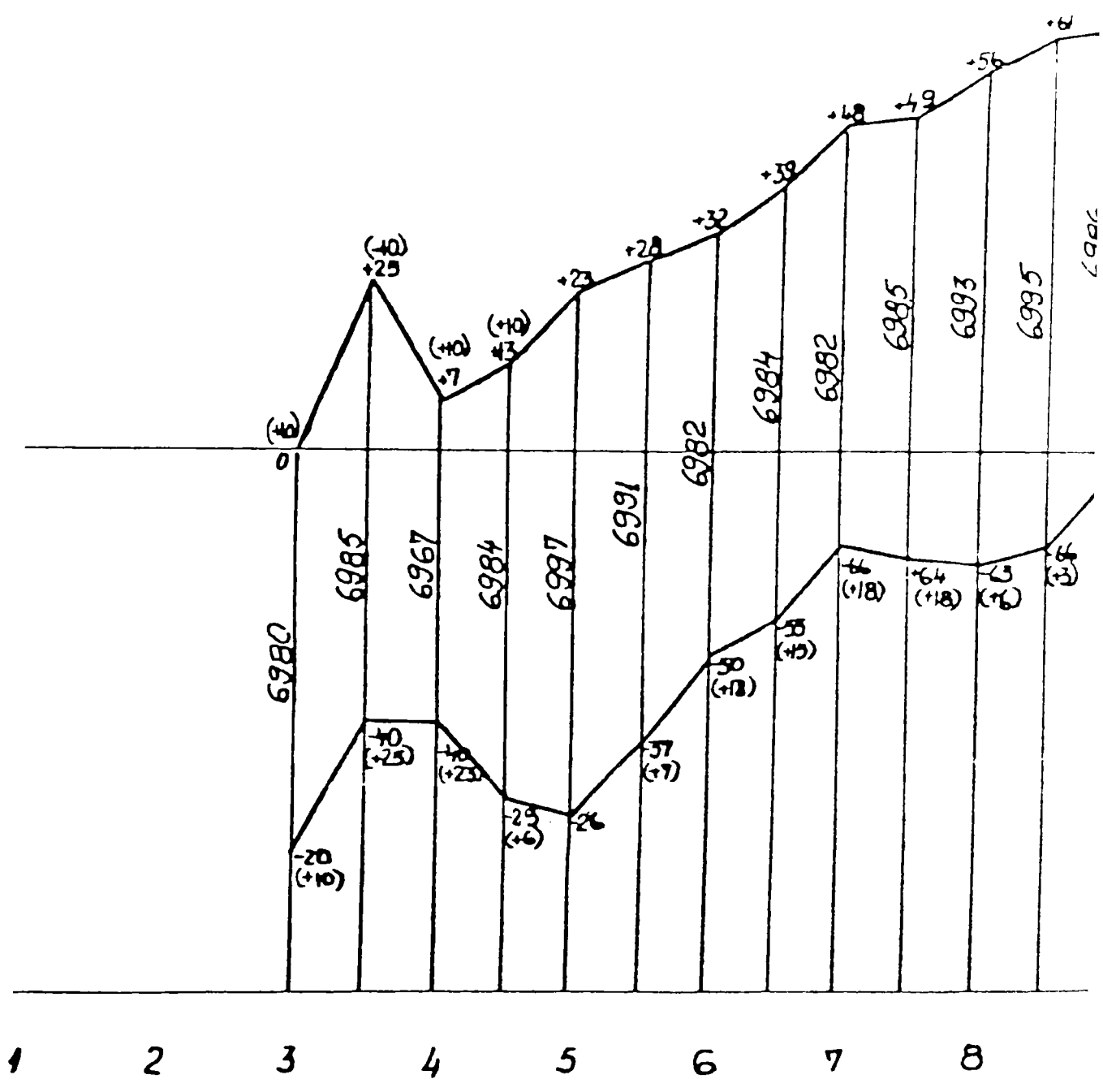
Un avantaj deosebit al programului DURABIL, pentru practica expertizării, este că diagramele aferente obținute pot fi utilizate direct pentru estimarea numărului de cicluri până la ruperea tirantului.

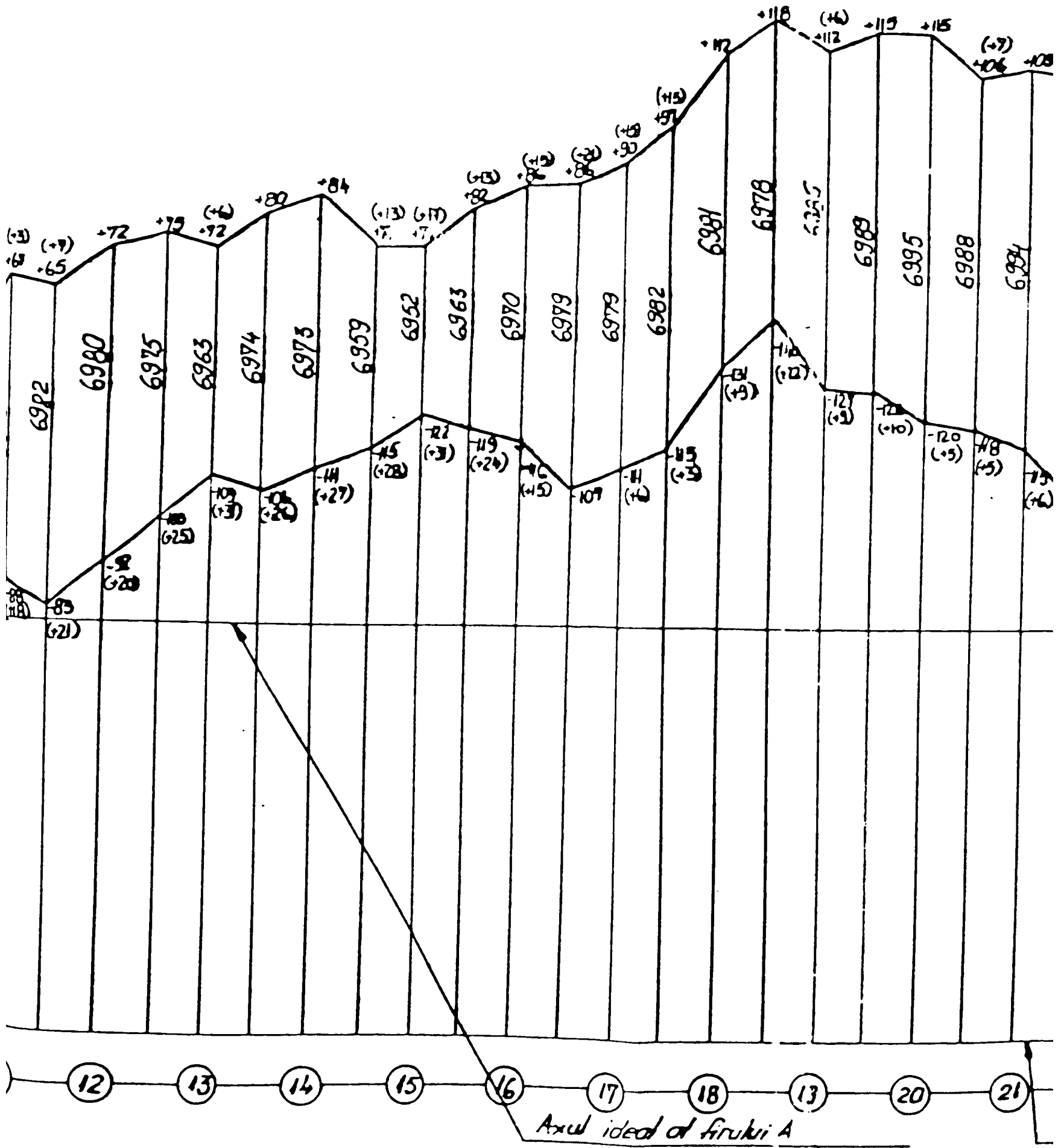
- determinarea durabilității urechii tirantului sub acțiunea sarcinilor variabile;

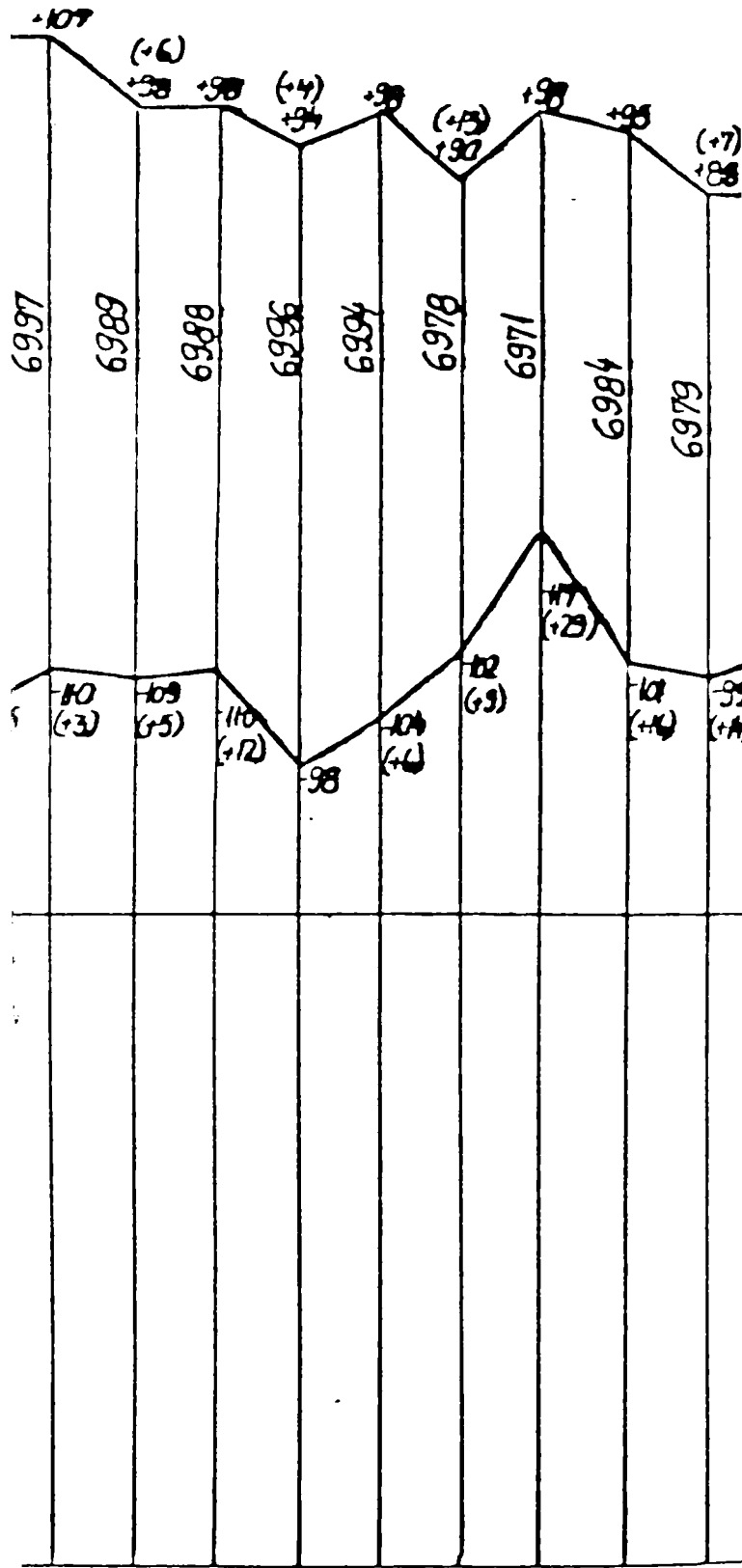
Se utilizează programul FRANC2D/L . Una din datele de ieșire caracteristice este numărul de cicluri la care se produce ruperea, N.

Exemplele de calcul, însoțite de observații și concluzii, pot constitui un îndreptar pentru inginerii experți care apreciază degradarea unei SP și trebuie să decidă continuarea sau oprirea funcționării. Acest ultim capitol, împreună cu unele părți din cap. IV și V, pot constitui un ghid de principii metodologice în activitatea de expertizare a SP.

Afirmația lui Hertel că "proiectarea unei piese care lucrează în condiții de solicitări variabile este mai mult o artă decât o știință" se potrivește și mai mult în cazul evaluării degradării unei SP sudate care a suportat încărcări ciclice aleatorii. Lucrarea evidențiază complexitatea activității de evaluare a degradării provocată de solicitări variabile. Scopul ei – prin prezentarea rezultatelor studiilor, a analizelor și a cercetărilor experimentale, este de a oferi indicații metodologice cu caracter de aplicabilitate în evaluarea degradării unei SP, evaluare care înseamnă în ultimă instanță luarea deciziei de a permite funcționarea, în siguranță, sau de a opri funcționarea unui utilaj complex.



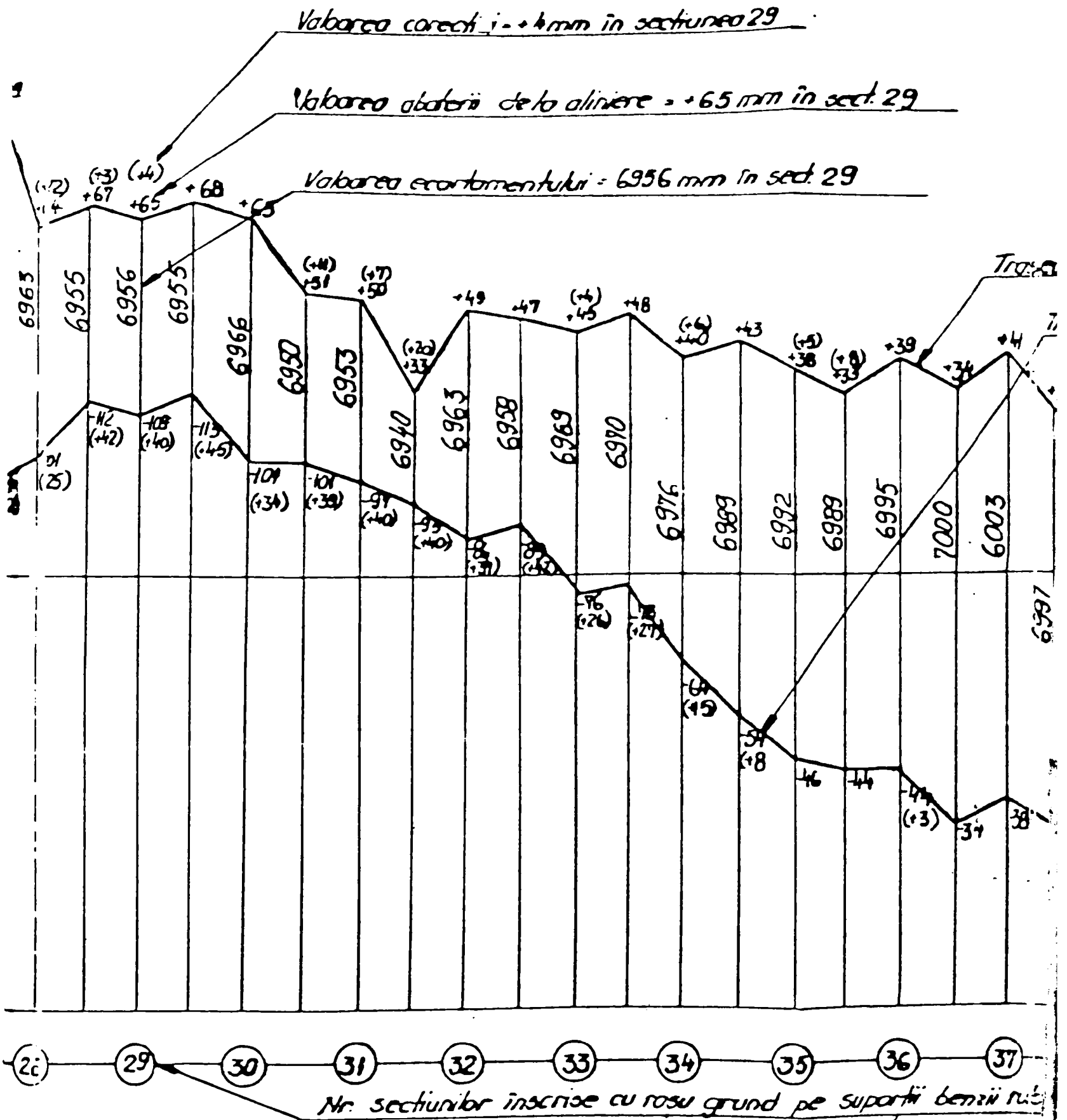




ideal al frukii B

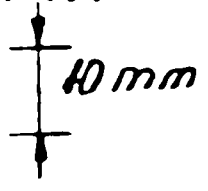
ECARTAMENT SI ALINIAM

Scara 1:



A CALE DE RULARE NR.1

abateri de la ecarterment si aliniere



5
2
017

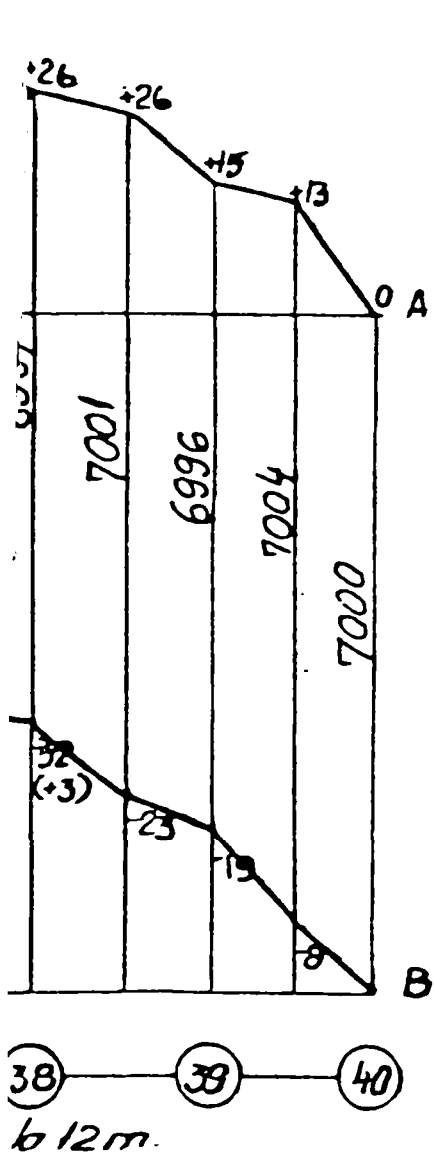
CALE RULARE NR.1 DEPOZIT CARBUNE CET II CRAIOVA

al firului A

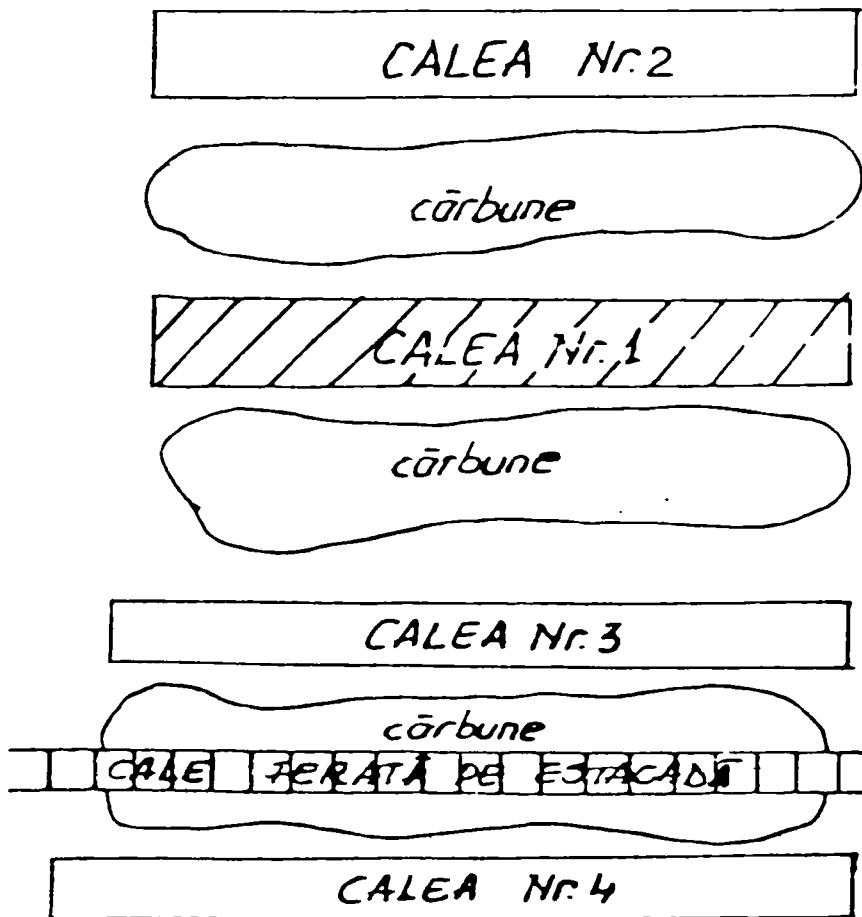
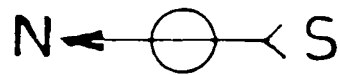
cul real al firului B

PLAN DE SITUATIE

1950



UZINA



idã,
tie
re:
le-
are

Observatii:

- Semnul +(plus) al abaterilor de aliniere indicã o abatere spre exteriorul cãii de rulare
- Semnul -(minus) al abaterilor de aliniere indicã o abatere spre interiorul cãii de rulare.
- Corectiile recomandate a fi realizate la aliniere sunt trecute în paranteze, având aceeași regulã de semne (+ spre exterior, - spre interiorul cãii)
- Corectiile recomandate a fi realizate la nivelment sunt trecute în paranteze, având ca regulã de semne +ridicare iar - coborãre a cãii.

FISA UTILAJULUI

A. Date generale despre utilaj

I. Identitatea utilajului

1. Firma Electroputere SA.2. Utilajul Pod rulant 30t-20mProiect nr. T 826Adresa CraiovaLoc montaj _____ Nr. inv. 6-218Furnizor ICM Bocsa Nr. fabr. _____

Nr. telex _____

An fabric. 1949 An pun. în funct. 1950

II. Condiții de lucru :

In exterior Mediu necoroziv Mediu uscat In interior (hală) Mediu coroziv Mediu umed

2. Destinația (uz general, forjare, trat. term., etc.) _____

III. Date tehnice:

1. Grupa de funcționare macara : (vezi cartea macaralaj) B. 3. IV

2. Vitezele de lucru : viteze ridicare nominală/reducă

-mecanica principal _____

-mecanica auxiliar _____

-viteza deplasare cărucior _____

-viteza deplasare macara _____

3. Structura de rezistență : (tip cheson, zăbrele, mono, rindă, bigrindă, etc.) bigrindă tip cheson4. Căile de rulare: Înălțimea căii 4,5mLungimea căii 120mNr. utilaje pe cale 3Dacă este circulabilă da. Pasarele de circulațiela ambele fire

IV. Starea tehnică actuală a utilajului și căilor aferente de rulare:

1. Starea tehnică a mecanismelor (Alinierea reductoare, starea călajelor și a frinelor, limitator sarcină) Mecanisme corespunzătoare normelor mai puțin frina translație cărucior care trebuie reparată

2. Starea construcției metalice (coroziuni, deformații, fisurări, etc.):

Construcția metalică a podului bună. Nu s-au găsit fisuri
fisuri nici deformații3. Starea căilor de rulare (derivelări, abeteri de aliniere, starea joantelor, uzuri, etc.) Căile de rulare acceptabile la nivelment.unele abeteri la aliniament corectabile. Joante bune

75141/693
Pag 6/162

C. Intreținere și reparații

I. Ritmul de efectuare a lucrărilor de întreținere și reparații

1. Foarte rar (niciodată), pt. că funcț. bine

2. Numai când apar defecțiuni

3. Numai la termenele de revizie și reparații.

4. Deseori, utilajul este necorespunzător

5. Alt caz.

6. Câte roți de rulare se schimbă în medie pe an.

SUBANS. UTILAJ			CALE RULARE
ELECTR.	MEC.	C.MET	
		✓	
			✓
×	×		
	0,5		

7. Evenimente deosebite care au apărut pe durata de funcționare a utilajului și modul de remediere al acestora:

Utilajul nu a suferit evenimente deosebite

B. REGIMUL DE FUNCTIONARE A UTILAJULUI

Perioade distincte de lucru	Nr. de schimburi	Nr. de cicluri pe schimb	Încărcarea medie estimată pe schimb în %											
			La cîrligul auxiliar		La cîrligul principal						Peste Q _N			
			min.	max.	0-1/3 Q _N	1/3-2/3 Q _N	2/3-1 Q _N	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.
1	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
Motor auxiliare RUV 5	XII - 1950	XI - 1952	XI - 1952	-	-	-	10	-	40	-	-	-	10	
Motori CC I 500 R R.	XII - 1952	XII - 1964	2	80	-	-	10	-	90	-	-	-	-	
Motor DEH 3500. A.	XII - 1964	XII - 1982	3	80	-	-	0	-	30	-	65	-	5	
Motor Metr. 300	XII - 1982	XII - 1989	2	75	-	-	5	-	80	-	15	-	-	
Motor diverse	XII - 1984	XII - 1992	1	70	-	-	15	-	60	-	25	-	-	

Anexa II-2
[201

S.C. PROMPT S.A.
TUNISQARA

Anexa 9.1

FISA UTILAJULUI pentru excavatorul.....

1. DATE GENERALE

Numărul de fabricație al excavatorului:.....
 Anul de fabricație:.....
 Etapa de integrare:.....
 Locul de funcționare: Sucursala.....
 Expl. minieră..... nr. tel.....
 Cariera.....
 Factori decizionali.....
 Anul și luna punerii în funcțiune a excavatorului.....
 Nr. de ore de funcționare (estimativ).....
 Avarii suferite și modul remedierii.....

 Dacă a avut loc un BK.....
 Modificări față de documentația de execuție introduse cu ocazia BK.....
 Câte ore de funcționare are excavatorul de la BK.....
 Câți ani vechime are excavatorul..... pe excavatoare de
 tipul.....
 De cât timp se află excavatorul pe acest utilaj.....

2. DATE DESPRE FRONTUL DE LUCRU ȘI LOCUL DE LUCRU

Felul materialului excavat (omogen, neomogen).....
 Felul materialului (lignit, argilă, nisip, pământ, marnă).....

 Rezistența specifică de tăiere a materialului..... daN/cm.
 Date despre starea carierei.....

3. DATE DESPRE MODUL (HIDROLOGIA) DE LUCRU

Felul excavării: (excavare înaltă, joasă, sub senilă).....
 Viteza de tăiere: (mare sau mică).....
 Adâncimea spanului: (umplerea cupei).....
 Debitul:.....
 Numărul de cupe care sapă concomitent:.....
 Înălțimea spanului (saibe).....
 Poziția suprastructurii față de infrastructură (coaxial, perpen-
 dicular).....

4. DATE DESPRE STAREA TEHNICĂ A UTILAJULUI

4.1 Roata cu cupe:

starea cupelor și dinților.....
 dacă sunt cupe lipsă.....
 dacă sunt dinți lipsă.....
 starea de uzură a cuțitelor.....
 starea de uzură a dinților.....
 pe care parte sunt uzuri mai accentuate sau dinți lipsă.....

 balanta radială la vârful dinților.....

4.2 Mecanismul de acționare a roții cu cupe:

- motorul electric; dacă protecția a declansat.....
cât de frecvent.....
- dacă oscilațiile se mențin la trecerea pe turatie mică....
- reductorul roții cu cupe:
tip și fabricație.....
greutatea.....
- cuplajul cu bile:
dacă a patinat vreodată.....
cât de frecvent.....
nr. de ore de funcționare.....
ultima dată de schimbare a uleiului.....

4.3 Mecanismul de roting suprastructură:

- care este domeniul de viteze în care lucrează:.....
- starea cuplajelor cu lemele a reductorului.....
- dacă cuplajele de suprastructură au patinat.....
- care este starea de uzură a căii cu bile.....
pe care parte sunt uzurile mai mari.....
dacă s-a înlocuit calea cu bile.....când.....

4.4 Mecanismul de ridicare a cilindri:

- tipul dozelor hidraulice.....
- dacă dinamometrul hidraulic a deconectat vreodată.....
- frecvența de deconectări.....
- verificarea tensiunii în cabluri la doze.....

4.5 Mecanismul de deplasare pe senile:

- motoarele electrice: dacă protecția a declansat.....
cât de frecvent.....
- starea elementelor de senilă:
dacă senilele prezintă deformatii pronunțate.....
dacă s-au rupt zale de senilă.....
frecvența ruperii zalelor de senilă.....
- starea roților stelate de acționare.....
dacă s-au recondiționat pintenii.....
frecvența recondiționării sau înlocuirii pintenilor.....
- starea balansierilor
dacă prezintă deformatii, crăpături, ruperi.....
dacă s-au înlocuit balansierii.....
- starea lonjeroanelor.....
- reductorul de mars
tip și fabricație.....
dacă au avut loc avarii la reductor.....
- starea angrenajelor.....
- starea carcasi și a fixării.....

4.6 Sen. ile transportate

- starea reductorilor.....
- starea tamburilor și a lagărelor.....
- starea covorului de cauciuc.....
- starea roților și a dispozitivelor de siguranță.....

4.7 Construcția metalică

- starea construcției metalice (dacă prezintă fisuri, sălbătăciuni, dacă s-a fisurat, în ce punct.....

4.8 Echilibrarea excavatorului:

- dacă s-a făcut lestarea (echilibrarea) excavatorului.....
- cantitatea de lest în cutia de lest.....t.

4.9 Instalația electrică:.....

5. DATE LEGATE DE OSCILAȚIA SUPRASTRUCTURII ȘI VIBRAȚIILE
CONSTRUCȚIEI METALICE

Dacă excavatorul are vibrații puternice în timpul excavării (cum se manifestă)

Dacă suprastructura balansează în plan vertical (dacă a balansat vreodată? când? în ce condiții?).....

Amplitudinea balansului (se poate măsura la capătul cutiei de lest) (valori orientative).....

Dacă amplitudinea oscilațiilor crește în anumite situații (care sunt ele?).....

a) Sensul de rotație al suprastructurii (stânga sau dreapta)....

b) Suprastructura în prelungirea infrastructurii sau perpendicular pe ea

c) Poziția brațului rotor (rotor sus, braț la orizontală, rotor la sol, excavare sub seșile).....

Când s-au înlocuit cupele ultima dată? dacă se observă o legătură între schimbarea cupelor și mărirea oscilațiilor.....

Dacă se produce torsionarea elindei în timpul excavării, ce efect are asupra mărimii oscilațiilor.....

Se va măsura frecvența și mărirea oscilațiilor în gol (prin oprirea brațului la coborâre).....

Diverse considerații ale personalului de exploatare.....

Observații ale colectivului ce efectuează expertizarea

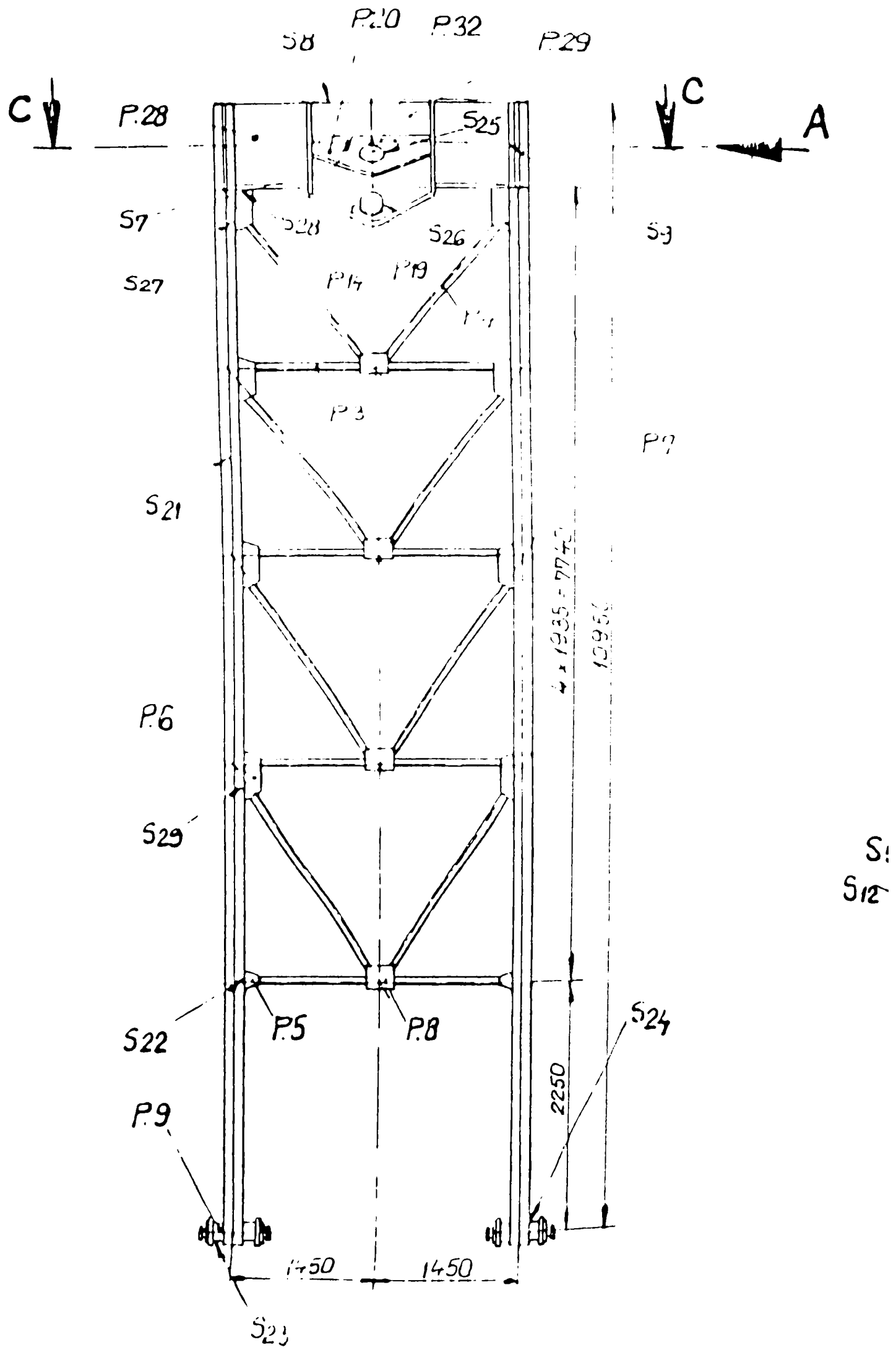
6. INTRETINERE SI REPARATII

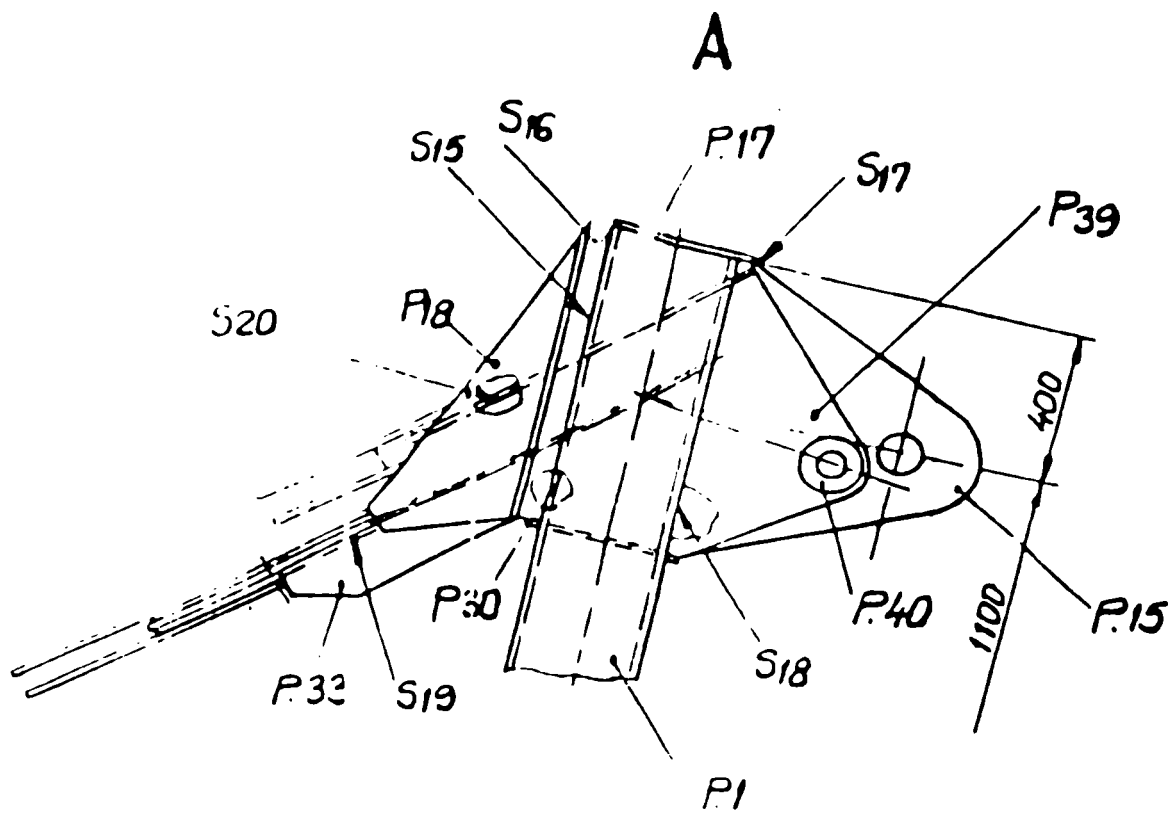
I. Ritmul de efectuare a lucrărilor de intretinere si reparatii

	Subansamble utilaj		
	Inst.elec	Mecanisme	Costr.met.
1.Foarte rar pentru că funcționează bine			
2.Numai când apar defect.			
3.Numai la termenele de revizie si reparatie			
4.Deseori ,utilaj necorespunzător			
5.Cazuri excepționale, independente de utilaj			

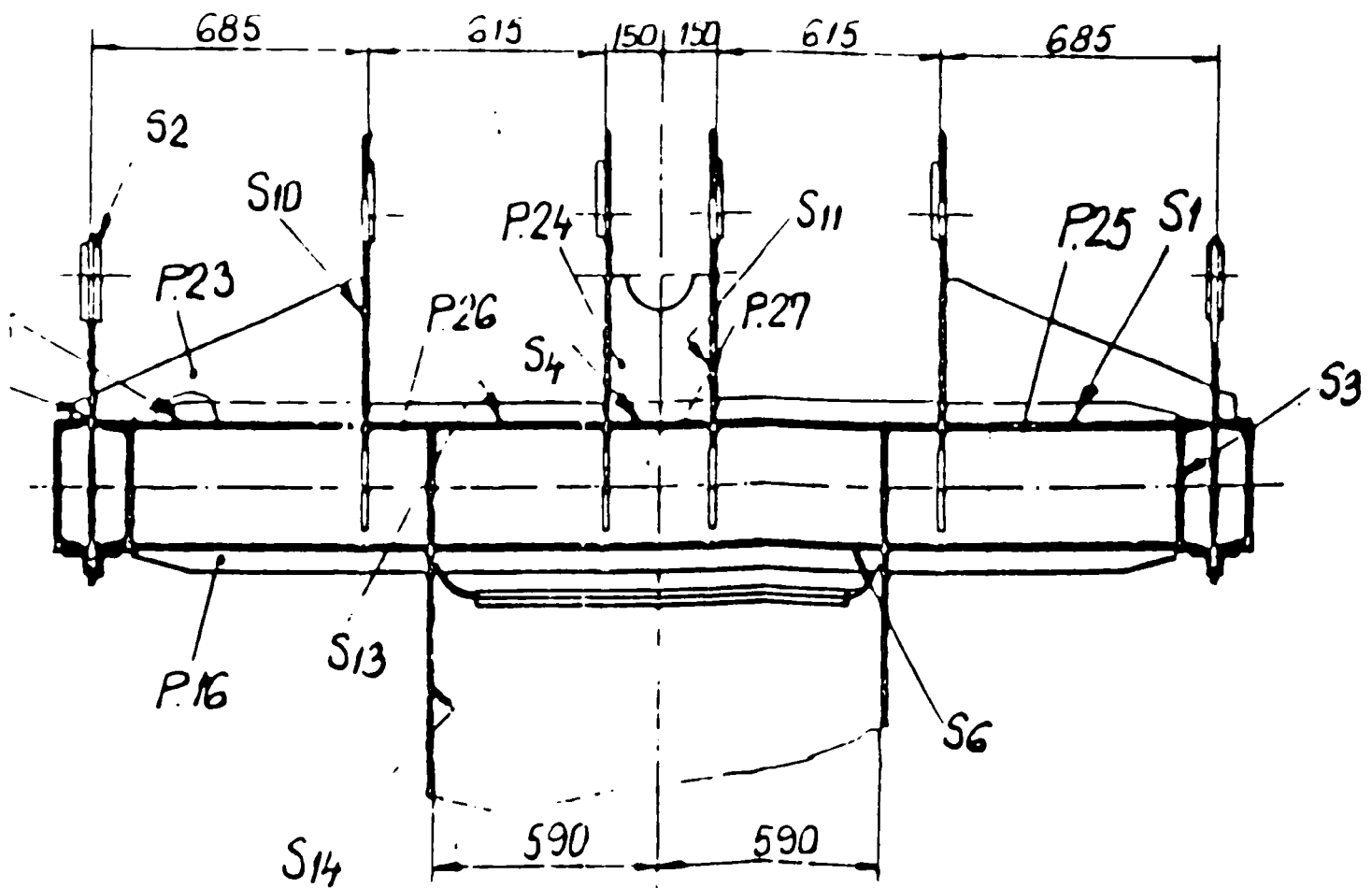
II. Evenimente deosebite care au apărut pe durata de funcționare a utilajului si modul de remediere.....

Tros in tus: A Varga Bhu.





C-C



FIȘA DE VERIFICĂRI SI MĂSURĂTORI

ANEXA II-4 [179]

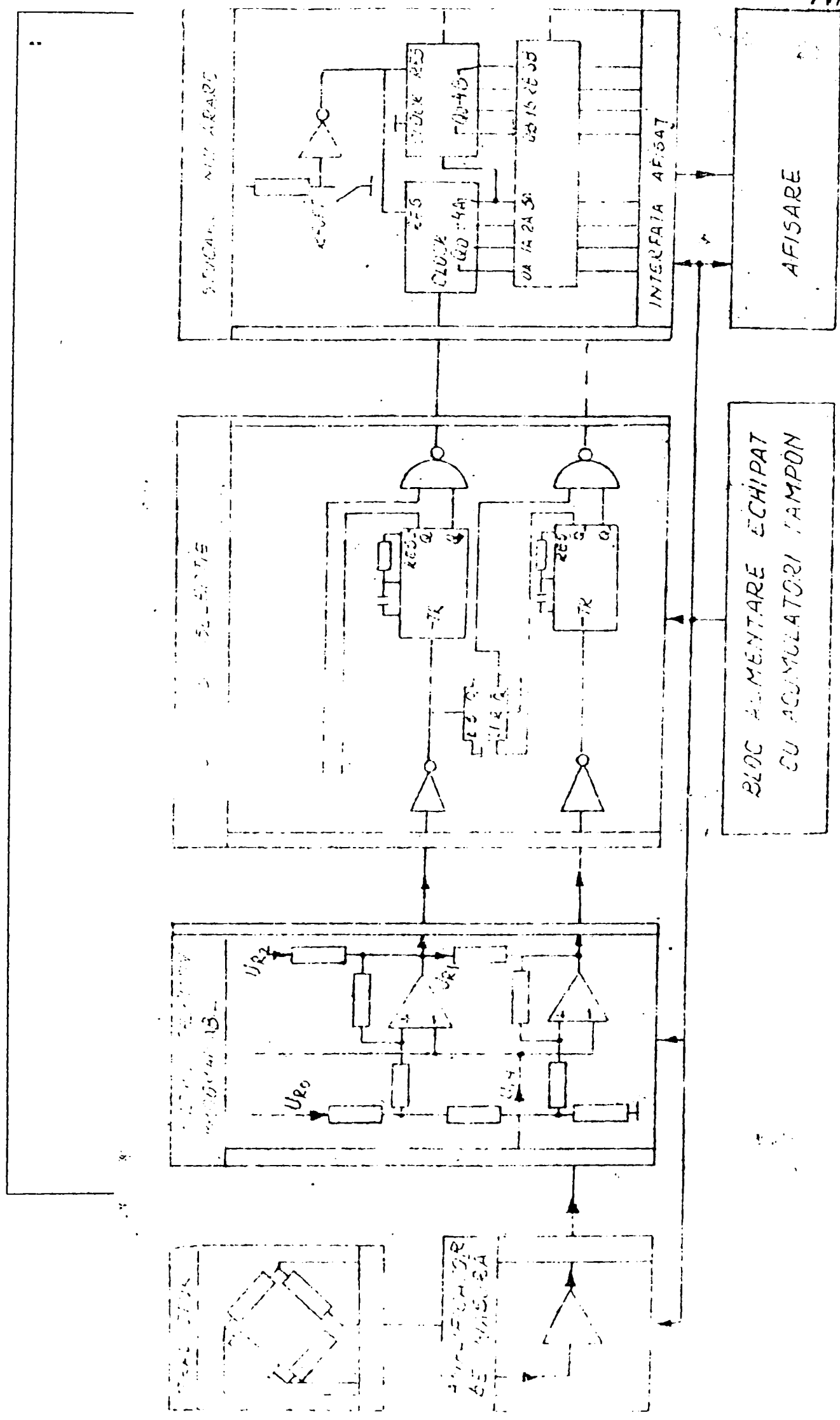
Denumire ansamblu CATARG	Nr. desen:	Nr. comandă	pag. 1/3
		Nr. fabric. ansamblu	
		Nr. fabric. produs	

REZULTATELE VERIFICĂRILOR

Nr. crt.	Poz.	Buc	Grosimi tablă fără oriz.	Sachune sudural și integrate	Descrierea defectelor pe cauze și localizarea lor (eventual schițe anexate)			
			Dimensiuni măsurate					
12	17	1						
11	16	1						
10	15	4						
9	14	1						
8	9	2						
7	8	8						
6	7	4						
5	6	12						
4	5	4						
3	4	16						
2	3	8						
1	1	4						

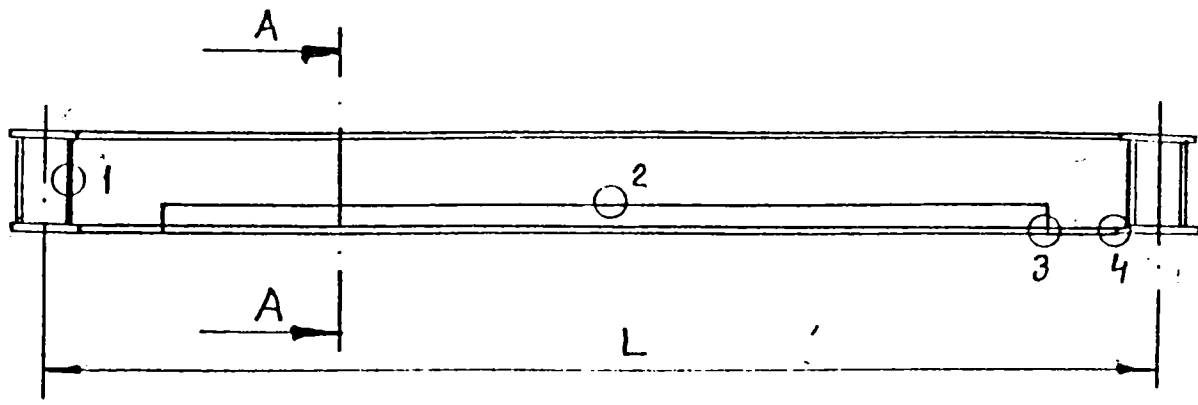
12	17	Placă	1	400x20-3120	OL.52.4	Da				Vizual pe toată lungimea
11	16	Placă	1	400x20-2700	OL.52.4	Da				Vizual pe toată lungimea
10	15	Ureche	4	800x22-940	OL.52.4		Da			Control US în zona lungimi sudurii
9	14	Placă	1	1165x20-1180	OL.52.4		Da			Control US în zona lungimi sudurii
8	9	Bucșă	2	Teavă 194x12-400	OL.37.35	Da				Vizual pe contur
7	8	Guseu	8	210x8-290	OL.37.4	Da				Control vizual
6	7	Guseu	4	135x8-310	OL.37.4	Da				Control vizual
5	6	Guseu	12	135x8-480	OL.37.4	Da				Control vizual
4	5	Guseu	4	120x8-150	OL.37.4	Da				Control vizual
3	4	Diagonală	16	L60x60x8-2111	OL.37.3	Da				Vizual în zona lungimi sudurii
2	3	Traversă	8	L60x60x8-2260	OL.37.3	Da				Vizual în zona lungimi sudurii
1	1	Grindă	4	U30-10930	OL.37.3	Da				Vizual în zona sudurii și bucșelor

Nr. crt.	Poz.	Denumire	Buc	Dimensiune	Material	Control				Observatii
						Lupa	L.P.	U.S.	R.P.	
Proiectant		Data		Numele		Semnatura		Numele		Semn. uic.
PRUMPY-S.A.				Intocmit				Verificat		
TIMISOARA				Măsurat				Verificat		
Executant										

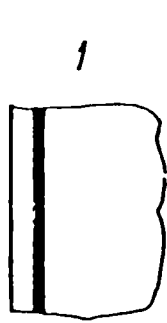
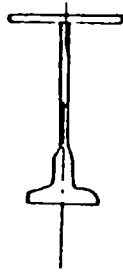


Anexa II-5 Γ 1991 Dispozitivul electronic de clasare

T5141/6-93
pag-36/62



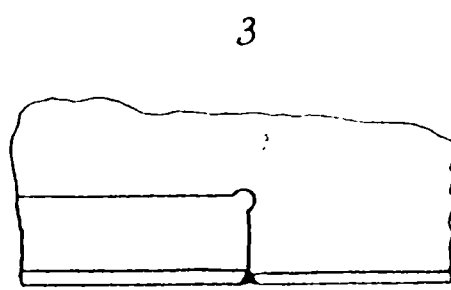
A-A



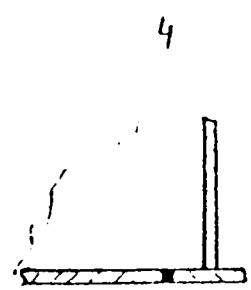
$\Delta \varnothing = 125$



$\Delta \varnothing = 112$



$\Delta \varnothing = 90$

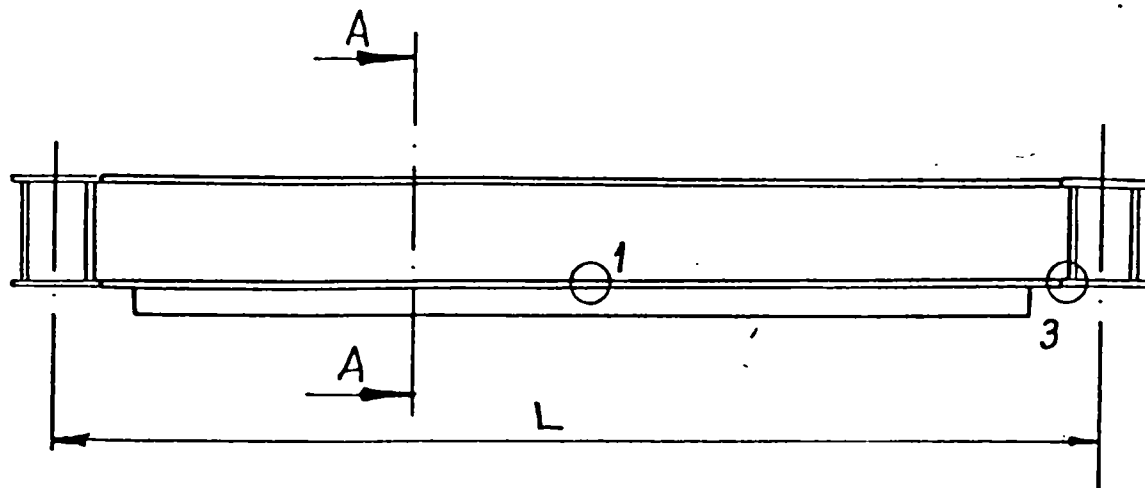


$\Delta \varnothing = 112$

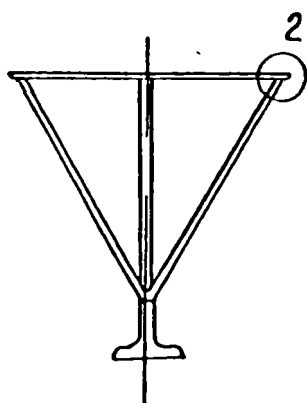
Fig. 5.1.

Pod rulãnt monogrindã cu inimã plinã

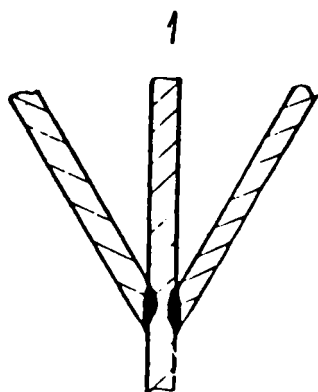
T 5141/6-93
pag. 37/62



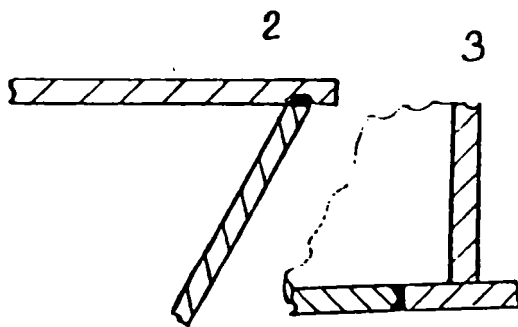
A-A



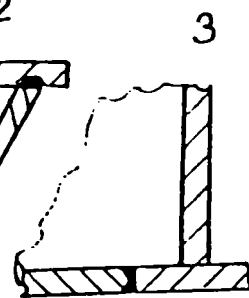
$\Delta C = 112$



$\Delta C = 50$



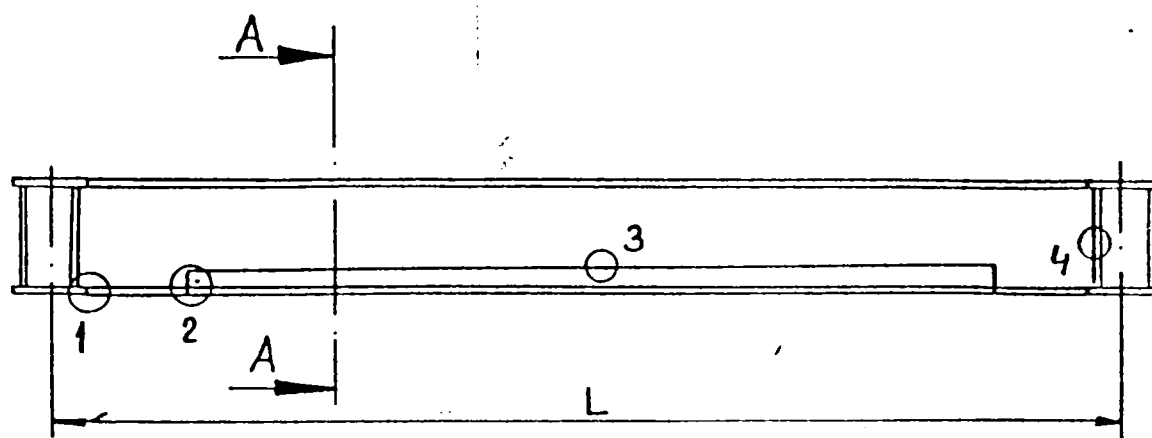
$\Delta C = 71$



$\Delta C = 112$

Fig. 5.2.

Pod rulanti monogrindă cheson triunghiular



A-A

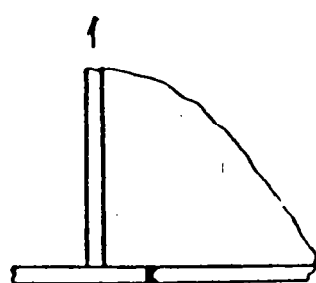
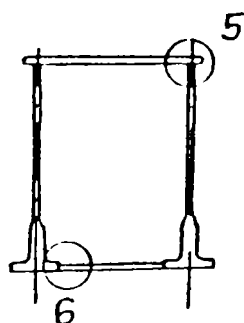
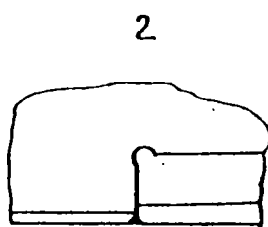
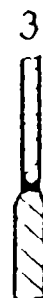
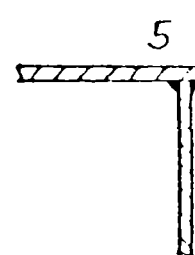
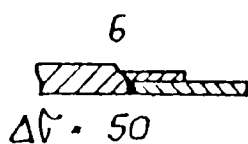
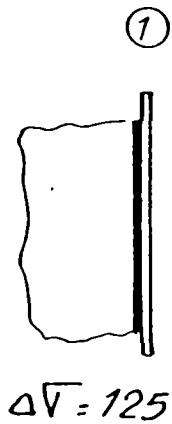
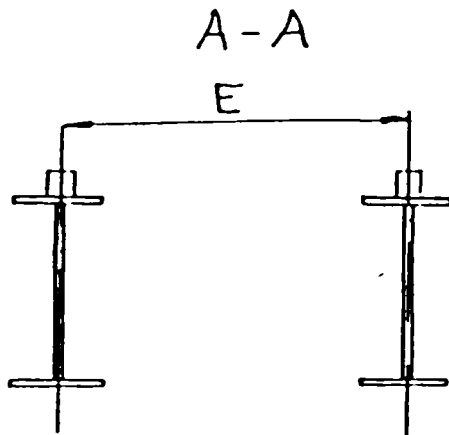
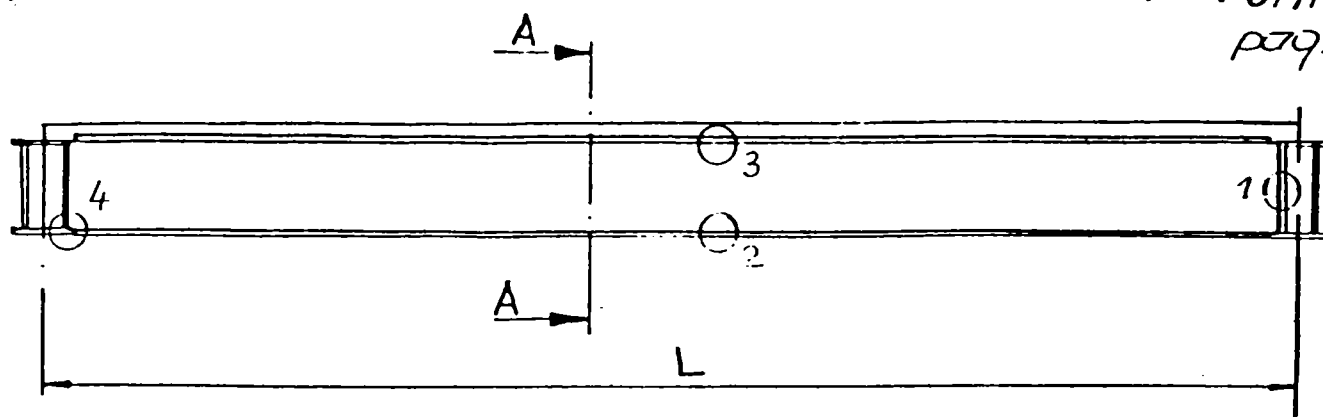
 $\Delta b = 112$  $\Delta b = 90$  $\Delta b = 112$  $\Delta b = 125$  $\Delta b = 125$  $\Delta b = 50$

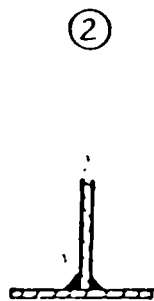
Fig. 5.3.

Pod rulant monogrindă cheson cu secțiune dreptunghiulară

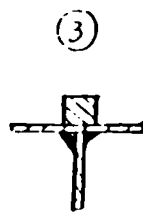
T 5141/6-93
 pag. 32/62



$\Delta V = 125$



$\Delta V = 125$



$\Delta V = 125$



$\Delta V = 112$

Fig. 5.4.

Pod rulanti biqrindă cu inimă plină

T 5141/6
D.T. 40/6

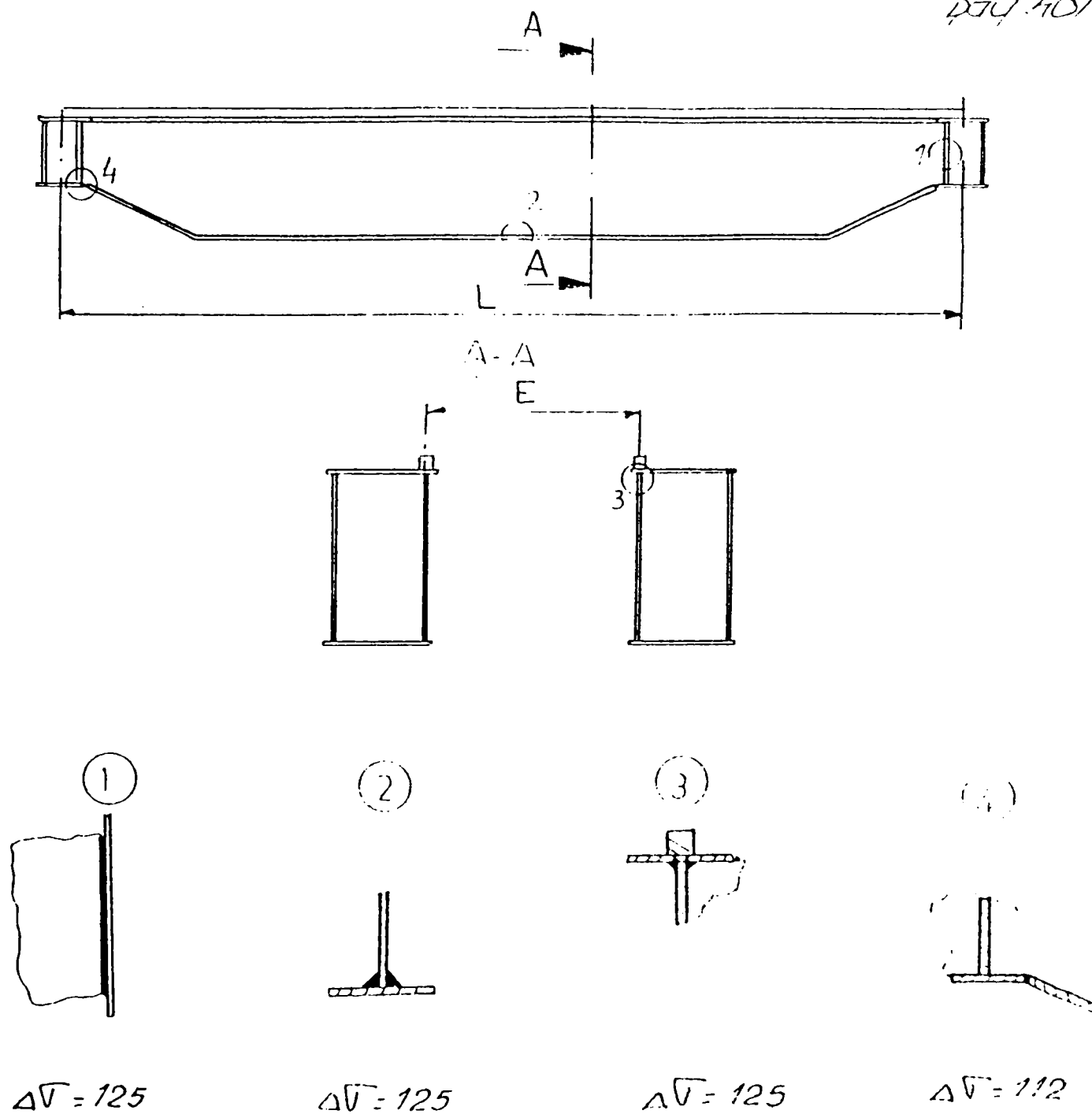


Fig. 5.5

Pod rulanti bigrindā cheson

T5141/6-93
pag. 46/6

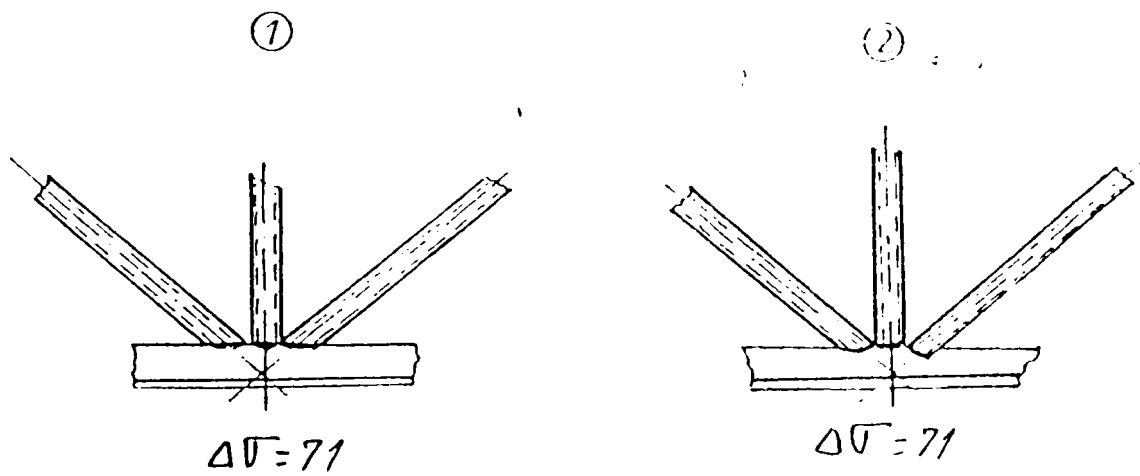
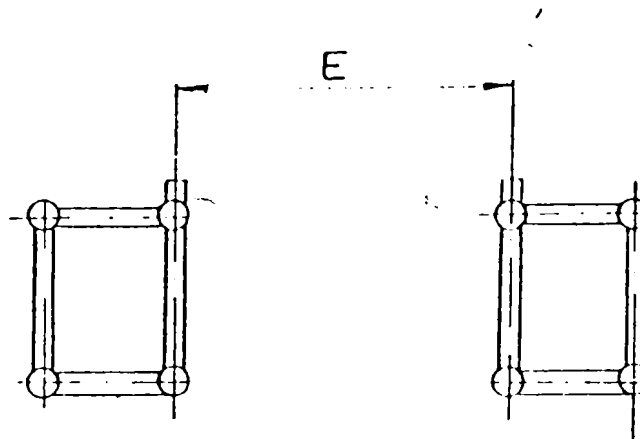
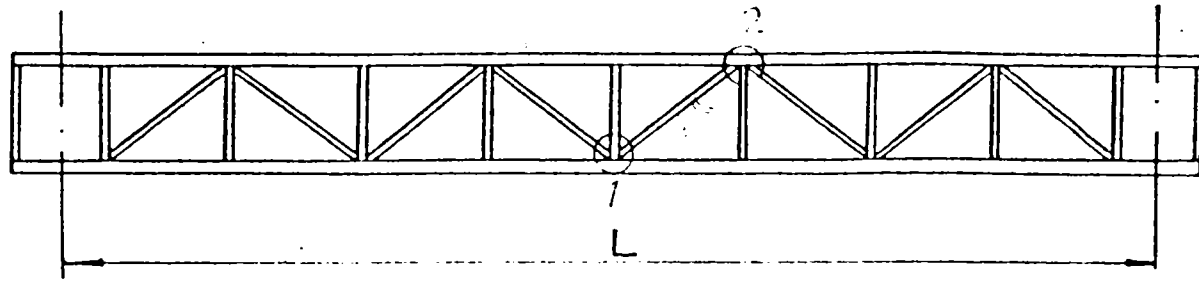
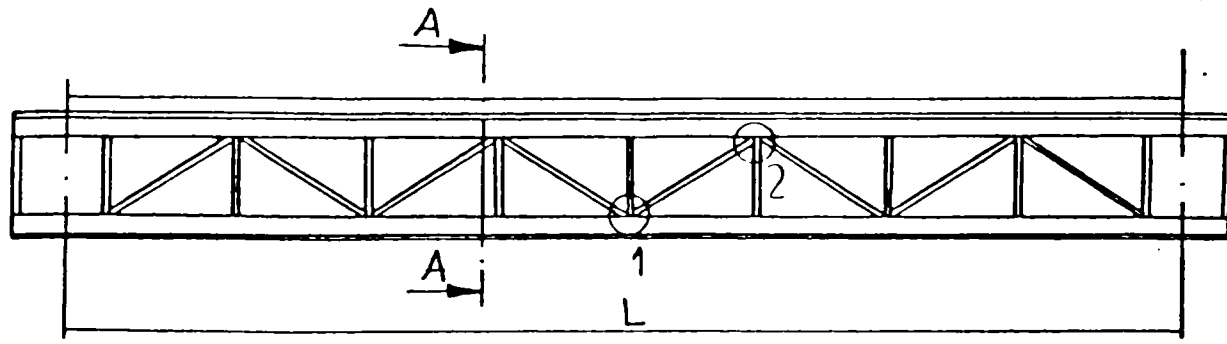


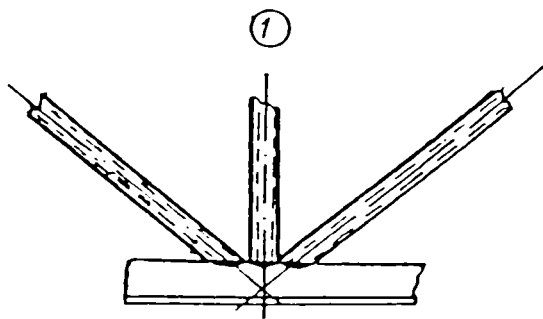
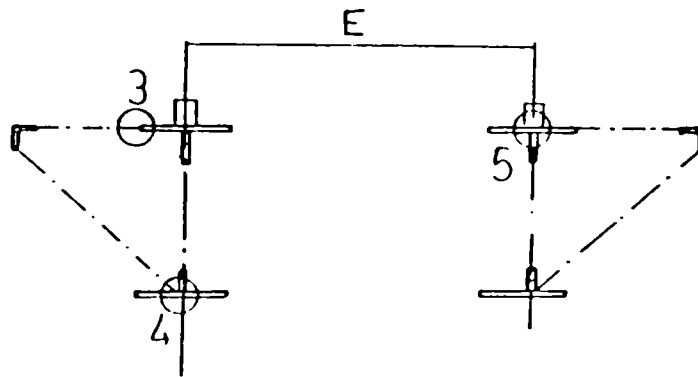
Fig. 5.9.

Pod rulant biqrindā în zābrele cu secțiune dreptunghiulară

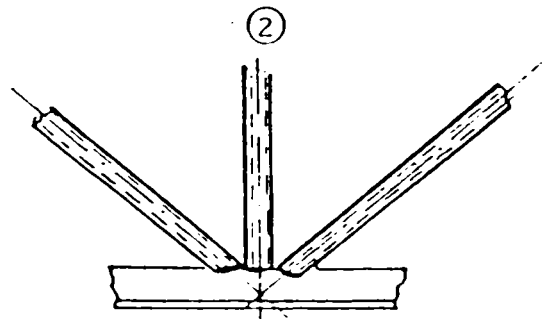
T5141/6-93
p27.47/62



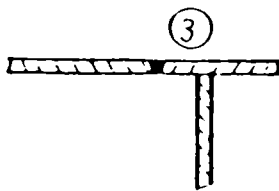
A - A



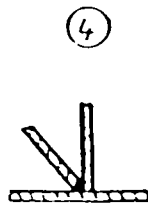
$$\Delta \sigma = 71$$



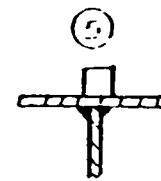
$$\Delta \sigma = 71$$



$$\Delta \sigma = 80$$



$$\Delta \sigma = 71$$

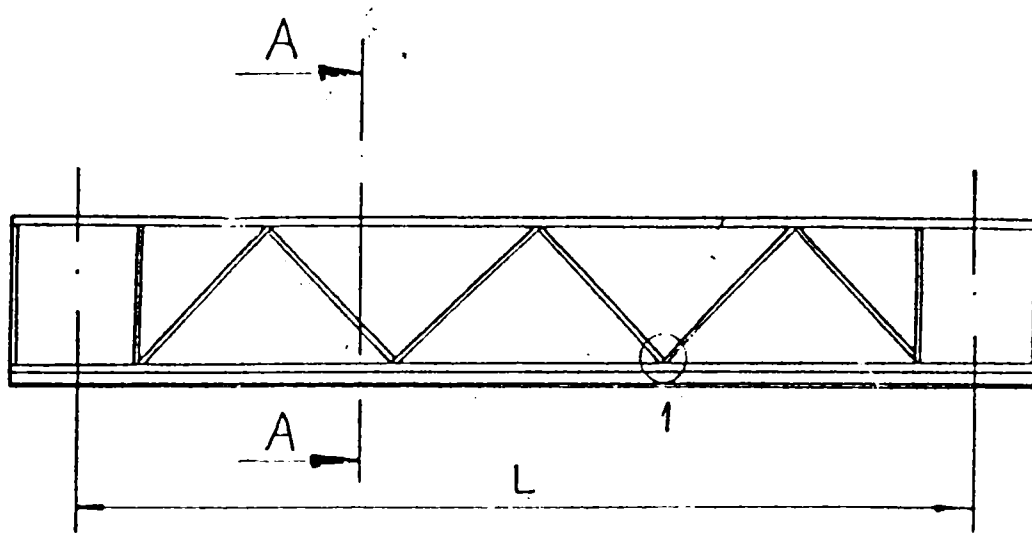


$$\Delta \sigma = 125$$

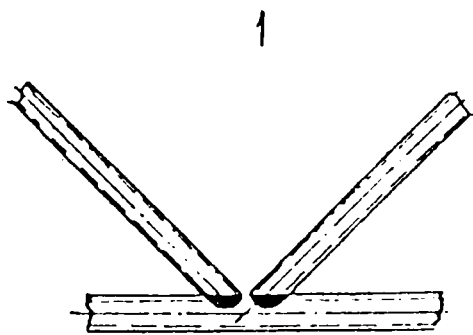
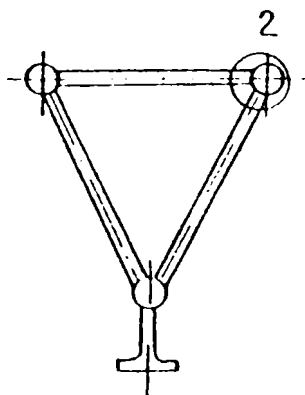
Fig. 5.10.

șd rulant bigrindă în zăbrele

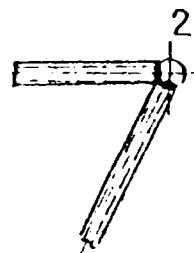
T5141/6-9
p09.48/6



A-A



$\Delta \sigma = 71$

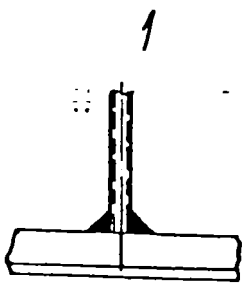
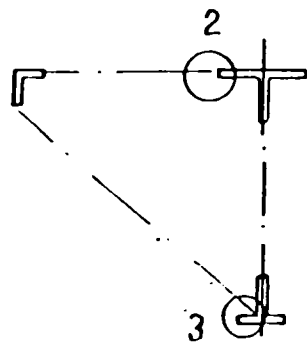
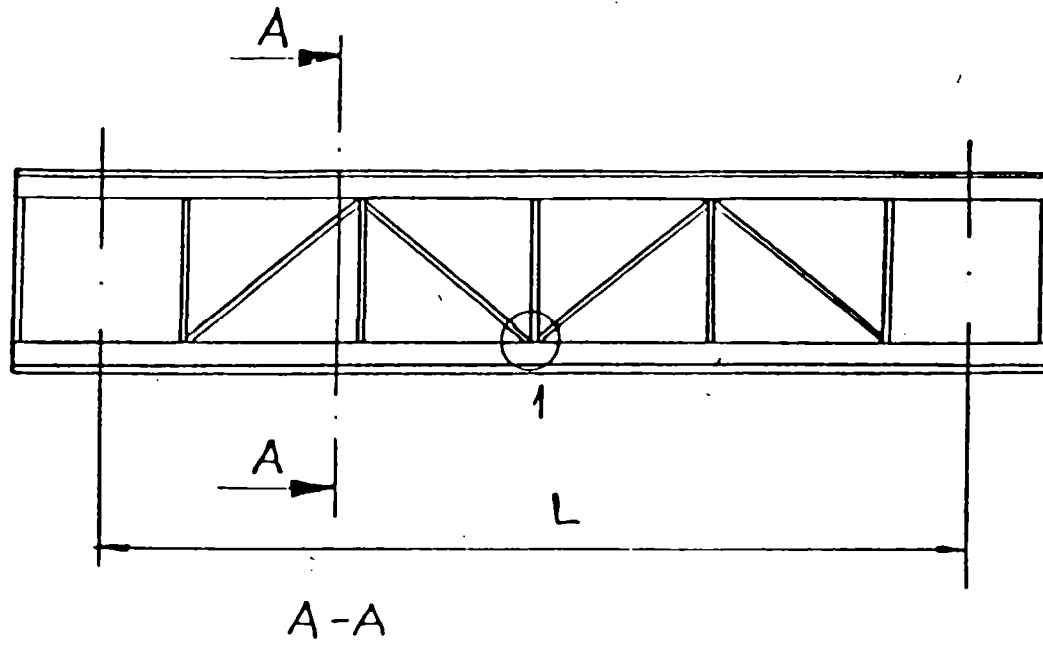


$\Delta \sigma = 71$

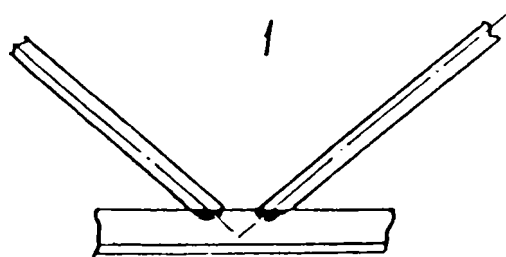
Fig. 5.41.

Pod rulant monoqrindă în zăbrele cu secțiune triunghiulară

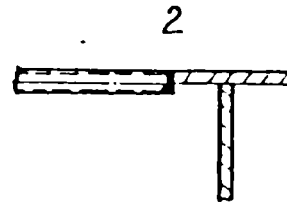
T5141/6-93
pag. 49/62



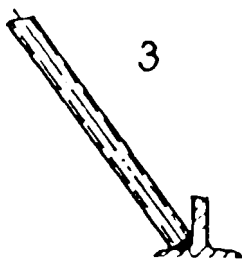
$\Delta b = 125$



$\Delta b = 71$



$\Delta b = 80$



$\Delta b = 71$

Fig. 5.92.

Pod rulanti monogriindă în zăbrele

T5141/6-93
pag. 50/6.

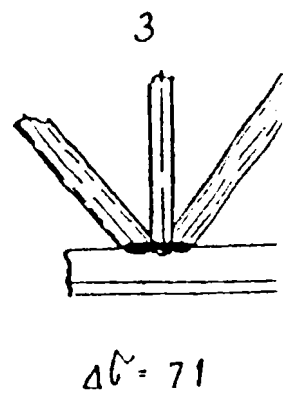
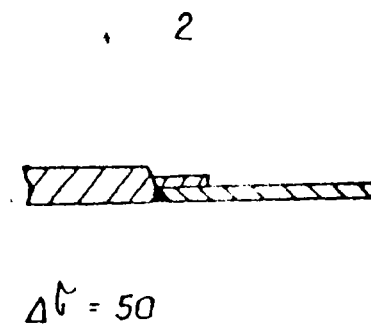
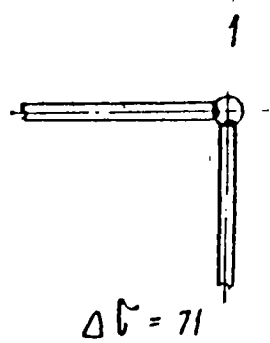
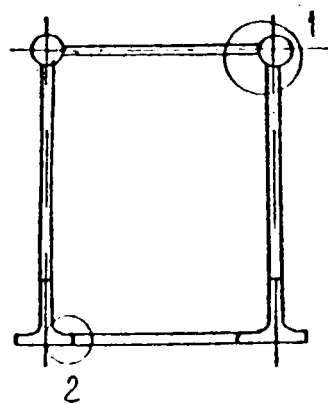
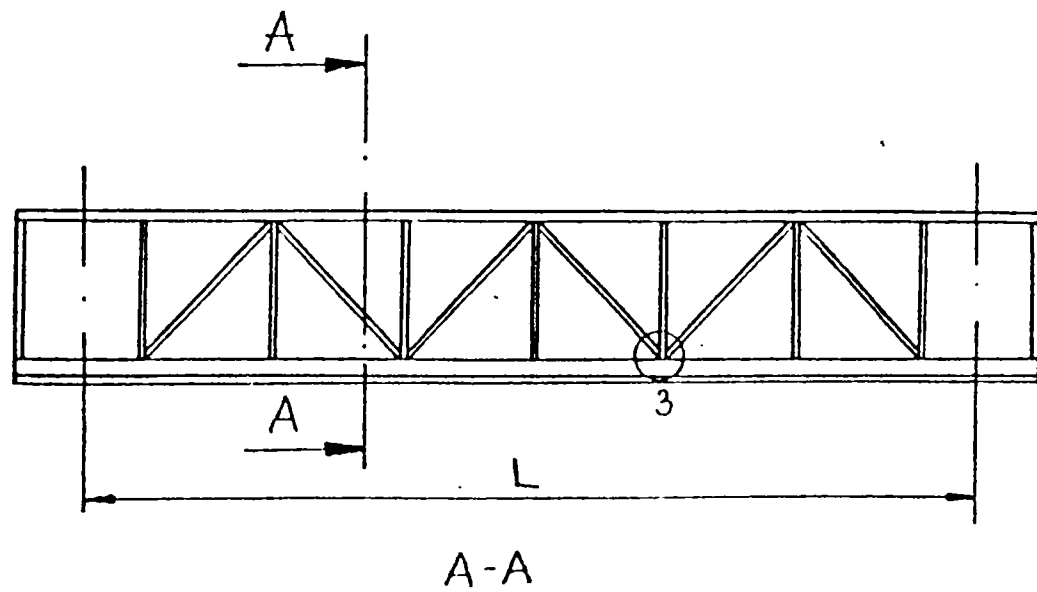


Fig. 5.B.

Pod rulant monoqrindă în zăbrele cu secțiune dreptunghiulară.

BIBLIOGRAFIE

- [1] *** ASME BOILER AND PRESSURE VESSEL CODE, SECTION XI, Rules- for Inservice Inspection of nuclear Power Plant Components, New York, 1995 Edition
- [2] *** Crack Test, Cranes Today, August, 1999
- [3] *** Hütte, Manualul inginerului. Fundamente. Ediția 29-a.Ed. Tehnică, București
- [4] *** Laboratorium fur Betriebfestigkeit, Technische Mitteilungen nr. 15/65; Verwendung eines Einheits-Kollektiv bei Betriebfestigkeits-Versuchen, Darmstadt, 1996
- [5] *** Recommendations for use of FEM in fracture mechanics", ESIS Newsletter, Technical Committee 8 for Numerical Methods, Nr.15.1991
- [6] Akin, J. Computer – Assisted Mechanical Design Prentice Hall New Jersey 1990
- [7] Alămoreanu, M.; Tișea, T. Mașini de ridicat, vol.I, Ed. Tehnică, București 2000
- [8] Aleksandrov, M.P. Podimno-transportniie, Moskva, 1960
- [9] Altpeter, Hormann Cabluri de sârmă. Construcția, fabricația și aprecierea calităților. București, I.D.T., 1959.
- [10] Anderson, T.L. Fracture Mechanics, Fundamentals and Applications, CRC Press, Boca Raton, 1991
- [11] Anderson, T.L. Fracture Mechanics. Fundamentals and Applications CRC Press, Boca Raton 1991
- [12] Argyris, J.H. Energy Theorems and Structural Analysis Butterworth 1960
- [13] ASTM Impact Testing of Metals, 1969
- [14] ASTM E 1290-89 "Standard Test Method for CrackTip Opening Displacement (CTOD) Fracture Toughness Measurement"
- [15] ASTM E 616-89* –"Standard Terminology relating to Fracture Testing
- [16] ASTM E 647-86 –"Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates"
- [17] ASTM E 813-87 "Standard Test Method for JIC a Measure of Fracture Toughness"
- [18] ASTM E 922-84
- [19] Atanasiu, Costică ș.a., Încercarea materialelor 1. Încercări distructive ale metalelor, Ed. Tehnică, București, 1982
- [20] Babeu, T. Considerații asupra durabilității unei tije de servomotor. Conferința de Acționări Hidropneumatice, Timisoara, 1995.
- [21] Babeu, T. Considerations about wire ropes fatigue testing, OIPEEC, Round Table, Conference Delft, 1993, p.14/19
- [22] Babeu, T. Considerations concernant la resistance en exploitation des chaines miners et navales. A XVIII-a Conf. de Mecanica solidelor. Buletin, vol.II, Constanta 1994, p.159-192
- [23] Babeu, T. Considerations Concerning the service Life of wire ropes, OIPEEC Technical Meeting, 1995, Stuttgart, p.9-1/7
- [24] Babeu, T. Culegere de probleme de rezistența materialelor, II.I.P."TV" Timișoara, 1984
- [25] Babeu, T. Instalatii de transport uzinal. Îndrumător I.P. "TV" Timișoara, 1988
- [26] Babeu, T. L'evaluation et la confirmation experimentale de rupture par fatigue d'une construction metalique. Bul. șt. și tehn., U.T.Timișoara, Mecanică, Tom 39(53); F1-2, 1994, p.49/52
- [27] Babau, T. Rezistența lanțurilor din oțel rotund, Monografii REZMAT, Ed.MIRTON, Timișoara, 1994.
- [28] Babau, T. Rezistența materialelor. Partea 2-a, I.P."Traian Vuia" Timișoara, 1982
- [29] Babau, T. Safety achieved by Quality of the Welded Joints Tested in fracture. Bul.șt.și tehn., U.T. Timișoara, Mecanică, Tom 40(54), p.1/4 1994

- [30] Babeu, T.; Olariu, M. Aspecte privind estimarea siguranței în exploatare a utilajelor grele-Lucrările Simpozionului "O jumătate de secol de la înființarea PROMPT", 25/26 noiembrie 1999, p5/14
- [31] Babeu, T.; Olariu, M. ș.a. Metodologii de expertizare și cercetări privind durata de utilizare în condiții de siguranță la temperaturi de până la -20°C a utilajelor de manipulat cărbune și a excavatoarelor de suprafață, Premiu AGiR 1997
- [32] Babeu, T.; Boleanțu, L.; Dumitru, I.; Marșavina, L. . Eiaborarea unor metode de analiză a stării de îmbătrânire, oboseală și rupere fragilă a elementelor de rezistență critice din construcția utilajelor grele, Contract. Beneficiar S.C. PROMPT SA, 1995
- [33] Babeu, T.; Marșavina, L.; Stroia, M. Studiul propagării fisurilor în erclisele de lanț prin Metoda Elementelor finite, Buletin Științific, Vol.II, Lucrările sesiunii Altexim-I Sibiu 1998 pag 269-274
- [34] Babeu, T.; Dumitru, I.; Babeu, S.; Marșavină, L.; Olariu, M., Analize și încercări de rezistență pentru evaluarea duratei de viață a utilajelor grele - Ed. Mirton, Timișoara, 1999
- [35] Barsom, J.M.; Rolfe, S.T. Fracture and Fatigue Control in Structures, Applications of Fracture Mechanics, Prentice - Hall Inc, New Jersey, 1987.
- [36] Barson, W. Fracture and Fatigue Control in Structures, Applications of Fracture Mechanics, 1987.
- [37] Barthelemi, B. Notions pratiques de la rupture, Paris, 1980.
- [38] Bass, B.R.; Bryson, J.W. ORNL analysis Method and Computer Codes NRC Vessel Integrity Review Group Meeting, Fracture Models and Analysis Methods, Oak Ridge 1986
- [39] Bathias, C.; Bailon, J. La Fatigue des Materiaux et des Structures. Montreal 1980
- [40] Bathias, C.; Pelloux, R.M. Metallurgical Trans. vol.3, 1972.
- [41] Bia, C.; Ille, V.; Soare, M.V., Rezistența materialelor și teoria elasticității, Ed. DP, București, 1953.
- [42] Blumenauer, H.; Pusch, G. Bruckmechanick Verlag Leipzig 1973
- [43] Blumenfeld, M. Introducere în metoda elementelor finite Editura Tehnică București 1995
- [44] Boleanțu, L ; Babeu T. Die Entwicklung einiger statischen Parameter bei der periodischen Prufung von Drahtsellen, in die Arbeiten der V-ten Konferenz fur Schewisstechnik? und Metall prufung, Metallprufung, Timișoara, 1985, p.591/606
- [45] Boieantu, L ; Dobre, I. Aplicații ale mecanicii solidului deformabil în construcția de mașini, Ed. Facla, 1978
- [46] Boleanțu, L, Babeu, T. Culegere de materiale pentru documentare la mașini de ridicat , I.P. "TV" Timișoara, 1969
- [47] Boleanțu, L. O definiție statistică a coeficientului de siguranță al cablurilor de tracțiune. Lucrările sesiunii ICPMRT, Timișoara, 1968.
- [48] Boleanțu, L. Rezistența materialelor, IV, IPTV Timișoara, 1974.
- [49] Boleanțu, L. Studii asupra cablurilor de tracțiune și sârmelor de oțel. Rezumatul tezei de doctorat, Timisoara , 1969, p.33/34
- [50] Boleanțu, L. Studii asupra cablurilor din oțel. Teză de doctorat, Timișoara, 1969
- [51] Boleanțu, L. ș.a. Efectul lubrificării asupra durabilității unor cabluri de tracțiune în studii șicercetări de metalurgie. Ed.Acad.R.S.România, Tom 16 nr.2, 1972, p.209/216.
- [52] Boleanțu, L., Babeu, T. Culegere de materiale pentru documentare la mașini de ridicat. IP"TV" Timișoara, 1985.
- [53] Boleanțu, L., Babeu, T. Îndrumător de proiectare la mașini de ridicat, IP"TV" Timișoara, 1968

- [54] Boleanțu, L., Babeu, T. Instalații de transport uzinal, I.P. "TV" Timișoara, 1976
- [55] Boleanțu, L., Babeu, T. Probleme de mașini de ridicat, IP "TV", Timișoara, 1969
- [56] Boleanțu, L., Dobre, I. Aplicații ale mecanicii solidului deformabil în construcția de mașini, Ed. Facia, Timișoara, 1978
- [57] Boleanțu, L.; Babeu, T. Îndrumător de proiectare la mașini de ridicat, I.P. "TV" Timișoara, 1968
- [58] Boleanțu, L.; Dobre, I. Aplicații ale mecanicii solidului deformabil în construcția de mașini. Ed. Facia, Timișoara, 1978.
- [59] Boleanțu, L.; Marșavina, L. Tipuri de elemente finite pentru modelarea singularităților câmpului de tensiune și deformație Acta Universitatis Cibiniensis, Vol. XIII, seria Tehnică, Mecanică aplicată Sibiu 1995 pag. 1-6
- [60] Boleanțu, L.; Marșavina, L. Considerații privind raza zonei plastice de la vârful fisurii, Al VII-lea Simpozion Național de TENSOMETRE cu participare internațională, Vol. III, Suceava, 1996, pag 125-132
- [61] Boleanțu, L.; Babeu, T. Considerations on the low temperature strength of wire ropes. Bull. OIPEEC, Torino, 45, 1983, p.114/120, 11-th General Assembly in Vail-Colorado
- [62] Borges, F.J.; Castanheta, M. Siguranța structurilor. Ed. Tehnică, București, 1974.
- [63] Boukharouba, T.; Tamine, T.; Niu, L.; Chehimi, C.; Pluvinage, G. "The Use of Notch Stress Intensity Factor as a Fatigue Crack Initiation Parameter" Engineering Fracture Mechanics, Vol. 52, Nr.3, 1995, pag. 503-512
- [64] Brebbia, C.A.; Walker, S. Boundary Element Techniques in Engineering, Newness –Butterworths, 1980
- [65] Broek, D. Elementary engineering Fracture Mechanics, Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht 1986
- [66] Brown, K.R. The Chevron Notched Fracture Toughness Test, ASTM Standardization News. November 1968, pag.66-69
- [67] BS 5762-1979
- [68] BS 7488: Part I:1991 Fracture Mechanics Toughness Tests; Part I. Method for determination of K_{IC} , critical CTOD and critical J values of metallic materials
- [69] Bucci, R.J.; Paris, P.C.; Landes, J.C.; Rice, J.D. J – Integral Estimation Procedures, ASTM STP 514, 1972, pag.40-69
- [70] Bucur, C.M Metode numerice, Ed. Facia, Timișoara 1983
- [71] Burada, C.; Buga, M.; Crăsnean, A., Elemente și structuri portante ale vehiculelor de cale ferată, Ed. Tehnică, București, 1982
- [72] Buzdugan, Gh. Calculul de rezistență la solicitări variabile Ed. Tehnică București, 1963.
- [73] Buzdugan, Gh. Calculul de rezistență la solicitări variabile Rezumatul tezei de doctorat IP Timișoara, 1968.
- [74] Buzdugan, Gh., Rezistența materialelor, Ed. Tehnică, 1974
- [75] Buzdugan, Gh.; Blumenfeld, M. Calculul de rezistență al pieselor de mașini. Ed. Tehnică. București, 1979.
- [76] Buzdugan, Gh.; Fetcu, L.; Radeș, M., Probleme actuale ale calculului la oboseală în rezistența materialelor, ICDT, București, 1972
- [77] C.S.I.M. Încercări mecanice ale materialelor. Încercări de rezistență, vol.II, MICM, 1984
- [78] Carpinteri, A. Size and Scale Effects in Fracture Parameters, Lecture Notes, CISM Course – Fracture Mechanics in Structural Concrete, Udine, Italy 1997
- [79] Cazaud, R.; Pomey, Y. La Fatigue des metaux Dunod Paris 1969

- [80] Cioclov, D. Mecanica ruperii materialelor. Ed. Acad. București, 1977.
- [81] Cioclov, D.; Analiza calității materialelor și a îmbinărilor sudate prelevate din excavatorul
Pascu, R. ERC 1403 CCISIM, 1993
- [82] Cioclov, D.D. Rezistența și fiabilitatea la solicitări variabile. Ed. Facla, Timișoara, 1975.
- [83] Cireș I.; Cioară, T Experimental Researches on Vibration Movements of Mobile Heavy
; Bereteu, L. Equipments. Lucrările Seminarului Științific MDRVUGM 96, First Edition.
- [84] Constantinescu, A., Date cheie pentru alegerea oțelurilor în construcția de mașini, OI-D-ATMCGFF,
București, 1987
- [85] Constantinescu, A.; Îndreptar de Fonte și Oțeluri. Ed. Tehnică, București, 1969.
col.
- [86] Constantinescu, On How Easy It is To Calculate a Wrong Value of Stress Intensity Factor,
D.M.; Pastramă, Lucrările celei de a 3-a Conferințe Internaționale de Elemente Finite și de
Șt.; Stoica, M.O. Frontieră, Secțiunea 1, Constanța, 1995, pag.85-92.
- [87] Cuteanu, E Metoda elementelor finite în proiectarea structurilor. Ed. Facla, Timișoara, 1980
- [88] DIN 15018 Krane, Blatt 1, Grundsätze für Stahltragwerke. Berechnung. April, 1974
- [89] DIN 50035 Begriffe auf dem Gebiet der Alterung von Materialien; Grundbegriffe
- [90] Directive 89/106/EEC
- [91] Directive Public Works [Directiva Lucrărilor Publice]
89/440/EEC
- [92] Ditlevsen, O. Decision Rules in Re-evaluation of Existing Structures. DAB Symposium, Iuni
1988.
- [93] Dobre, I.; col. Rezistența materialelor, IV, Probleme, U.T. Timișoara, 1992, p.172/173
- [94] Dowd, N.P. "Applications of two parameter approaches in elastic – plastic fracture
mechanics", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 52, No.3, 1995, pag. 445-
446
- [95] Dubină, D; Rondal Tempus Phare C.Measures Project 01198. Implementing of Structural
Eurocodes in Romanian. Civil Engineering Standards – Calculul structurilor
metalice. Exemple de calcul / Design of steel structures.E 3.. Worked
Examples, Ed. Dubină, Rondal & Vayas, 1997:
- [96] Dukelski, A.I. Sbornic po ktanam. Tom 1, Leningrad, 1971.
- [97] Dumitru, I. Oboseala la șoc a materialelor. Ed. Mirton 1998
- [98] Dumitru, I.; Faur, Bazele teoretice în oboseala metodelor mecanica ruperii, materiale compozite
N. și metode numerice. Lit. UPT 1997
- [99] Dumitru, I.; Considerații asupra durabilității tirantului unui excavator aplicând conceptele
Marșavina, L. mecanicii ruperii, A VIII Conferință de Vibrații Mecanice, Timișoara, 1996,
pag.59-64
- [100] Dumitru, I.; "Considerații asupra durabilității tirantului unui excavator aplicând conceptele
Marșavina, L. mecanicii ruperii", Simpozion Național de Mecanică aplicată și vibrații,
Timișoara, 1996, pag. 60-65
- [101] Dumitru, I.; Faur, N. "Rezistența Materialelor. Bazele teoretice în Oboseala materialelor, Mecanica
Ruperii, Materiale Compozite și metode Numerice", Ed. POLITEHNICA,
Timișoara, 1997
- [102] Dumitru, I.; Faur, Cercetări privind comportarea unor oțeluri la viteze mari de deformație, A VIII
N.; Laichici, P.; Conferința de Vibrații Mecanice, Timișoara, 1996, pag.153-158
Popa, M.
- [103] Duțu, A.; Pop, N.; Cercetări pentru stabilirea metodologiei de expertizare a utilajelor destinate
Cireș, I. manipulării cărbunelui în centralele termoelectrice ale sistemului energetic
național și excavării lui la suprafață, care au norma de casare îndeplinită, în
vederea utilizării
- [104] EN 10025 SR EN 10025 +A1:1994

- [105] EN 10113 SR EN 10113 (-1,-2,-3:1995)
- [106] EN 1993 Eurocode 3: Design of steel structures
- [107] ENV 1993-1-1:1992, Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1.1: General rules and rules for buildings
- [108] Erdogan, F. Fracture Mechanics, Lecture Notes, Leight University, 1994
- [109] FEM 1.001/1987 Règles pour le calcul des appareils de levage. Cahier 2. Classement et sollicitations des charpentes et des mecanismes
- [110] FEM 1.001/1987 Règles pour le calcul des appareils de levage. Cahier 3. Calcul des contraintes dans la charpente
- [111] Fluieraş D. Considerations about the safety assesment in service for mining equipment" *Lucrările Seminarului ştiinţific MDRVUGM, First Edition, 1996*
- [112] Fluieraş, D.; Moisa, T.. Analiza fenomenului de oboseală având în vedere funcţionarea în regim dinamic a elementelor de rezistenţă ale construcţiilor metalice ISIM 1995.
- [113] Forsyth, P.J. J Inst. of Metals 1951.
- [114] Furgiuete, F.M.; Luchi, M.L. "A Note On Some Crack Tip Elements Employed In Two-Dimensional Elasto-Plastic Fracture Mechanics", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.33, No.5, 1989, pag.831-837
- [115] Gdoutos, E.E. "Fracture Mechanics. An introduction", Kluwer, 1993
- [116] Giese, R.D.; Herring, G. "Using Emerging Computer Database, Software and Communications Technologies in Fleet Management", ASIP Report, 1998
- [117] Gladkin, A.N. *Issledovanie prirodnih ipacticeskih karakteristik nekotorih polimornih metallow*, 101976, p 68/71.
- [118] Gohberg, M.M. *Metalcaskie kinstructii nodimno-transportnih masin*, Moskva-Leningrad, 1964.
- [119] GOST 13994-81
- [120] Hahn, G T. *Met Trans*, 3, 1972.
- [121] Hahn, H.G. "Spannungsverteilung an Rissen in festen korpen", VDIVerlag, Dusseidorf, 1970
- [122] Hanel, J.J. *Schwingfestigkeit und RiBfortschreitung von eigenspannungsbehafteten RiBstaben an St52 unter Eihstufenbelastung* Darmstadt, 1972
- [123] Harris, D.O.; Bianca, C.J "NASCRAAC – A Computer Code for Fracture Mechanics Analysis of Crack Growth", *AIAA 28th Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*, Monterey, California, 1987, pag 662-667
- [124] Heinrich, Walter, *Good condition, Cranes Today*, March 2001
- [125] Hertzberg, R. *Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Matenals*, John Wiley, 1983
- [126] Hertzberg, R.W. *Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Matenals*, J Wiley, 1972
- [127] Hertzberger, R.W. *Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Matenals*", 4th Edition, John Wiley & Sons, 1996
- [128] Horvath F. "Application of Finite Element Method For The Solution of Some Problems In Fracture Mechanics", *The Proceedings of the 10th Congress on Material Testing*, vol I, Budapest, pag 273-278
- [129] Huidu, E. *Activity Project in Lignite Mines from Oitenia* *Lucrările Seminarului Ştiinţific "Metode pentru determinarea rezervei de viaţă la utilajele greie mobile"* MDRVUGM 95. First Edition
- [130] Iliescu, D.V. *Controlul loturilor de produs*. Ed. Tehnică Bucureşti, 1982, p.75:95.
- [131] Iliescu, N.; Năstăsescu, V "Contribuţii privind determinarea factorului de intensitate a tensiunilor la vârful fracturii unei plăci cu creştături", *Simpozion Naţional de Mecanica Rupenii, Midia*, 1986, pag 95-100
- [132] Ingraffea, A.R. "Finite Element Methods for Discrete Crack Modeling in Concrete Structures", *Lecture Notes, CISM Course "Fracture Mechanics in Structural Concrete"*, Udine, Italy, 1997
- [133] Ioviţu, E. *Rezistenţa la oboseală a unor îmbinări sudate cap la cap din table*

- de oțel OL38 și OL52. Construcția de masini, București, 1965
- [134] ISCIR Îndrumător pentru construcția și exploatarea macaralelor. Ed. Tehnică, București, 1965.
- [135] ISO 12482-1 Cranes – Condition monitoring- Part 1: General
- [136] ISO 8686-1 Appareils de levage à charge suspendue – Principes de calcul des charges et des combinaisons de charge – Partie 1: Généralités
- [137] ISO 9927-1:1994 Appareils de levage à charge suspendue – Vérifications – Partie 1: Généralités
- [138] Ispas, Șt.; Nica, A., Mortun, A. Mecanica materialelor pentru construcțiile aerospațiale. Ed. Academiei, București, 1978
- [139] Jaoul, B. Etude de la plasticité et application aux métaux Dunod, Paris 1965.
- [140] Kanninen, M. Advanced Fracture Mechanics Oxford Univ., 1985
- [141] Kareta, H.L. Mazur, V.G. O zavisimocmi temperaturi nerekhoga ctoii hrupkoe sostoiannie im velicini zema, nr 21997, p 96/99
- [142] Kinoshvili, R. Strength of Materials, IR, Moscow, 1972, p.322.
- [143] Koronka, F. Exploatarea, întreținerea și repararea combinelor miniere de abataj. Ed. Tehnică București, 1990.
- [144] Kudriatev, V.; Besman, I. .Zav. Laboratoriu 36 1970.
- [145] Liurade, H.P. Les essais de fatigue sous sollicitations d'amplitude variable. La fatigue des matériaux et des structures. Sherbrooke Univ., 1978.
- [145] Liurade, H.P. Sondage et techniques connexes, 1975.
- [147] Lupea, M.; Kriz, F., Itineanțu, M.; Pop, N.; Tișea, T. Expertizări pe utilaje, Prompt SA, T 5141/2-91
- [148] M.A. Bukstein, Fabricarea cablurilor din oțel și a cablurilor combinate (trad. rusă) I.D.T., 1956
- [149] Mancini, G. Commentaires sur les recherches COMMA 2 et Brugg Bull. OIPEEC 24/1975, Politecnico di Torino, p 6/16
- [150] Marșavina, L. "Metode numerice utilizate în Mecanica ruperii", Ed. Mirton, Timișoara, 1998
- [151] Marșavina, L., Boleanțu, L. "Metode numerice de evaluare a factorului intensitate a tensiunii", Acta Universitatis Cibiniensis, vol. XIII, Seria Tehnică, Mecanică Aplicată, Sibiu, 1995, pag.111-116
- [152] Marșavina, L.; Dumitru, I. "Model matematic pentru estimarea duratei de viață a tiranților excavatoarelor, Seminar științific: Metode pentru determinarea rezervei de viață la utilajele grele mobile. Timișoara, 1996
- [153] Marșavina, L. Metode experimentale în Mecanica ruperii, Referat nr.1 al Tezei de doctorat, Universitatea POLITEHNICA Timișoara, 1993
- [154] Marșavina, L. "Estimarea durabilității elementelor de îmbinare ale tirantului unui excavator", Lucrările Simpozionului Național de Mecanica Ruperii, Călimănești, 1998, pag.4.13-4.18
- [155] Marșavina, L. Metode numerice pentru calculul parametrilor din Mecanica Ruperii, Teză de Doctorat. Timișoara, 1998
- [156] Marșavina, L.; Boleanțu, L. Metode numerice de evaluare a factorului de intensitate a tensiunii, Acta Universitatis Cibisiensis, vol. XIII, Seria Tehnică, mec. Aplicată, Sibiu. 1995. pag 111-116
- [157] Marșavina, L.; Dumitru, I.; Boleanțu, L. Analize și încercări asupra materialelor excavatorului Ero - 1300 din cariera Tismana, Contract. beneficiar S.C. PROMPT S.A. 1996
- [158] Marșavina, L.; Dumitru, I.; Boleanțu, L. Analize și încercări asupra utilajelor grele cu durata de exploatare expirată, Contract. beneficiar S.C. PROMPT S.A., 1996
- [159] Marșavina, L. "Study of Fatigue Crack Propagation in Wagon Axles COMPRAIL '98.

- Raicov, P. Lisabona, Portugalia, 1998
- [160] Mateescu, D.; Băluț, N.; Caraba, I., Calculul plan și spațial al grinzilor căilor de rulare executate din oțel, Ed. Academiei, 1988
- [161] Mateescu, D.; Gădeanu, L.; Mercea, Gh.; Muhibacher, R.; Cosmulescu, P., Construcții metalice, 1975
- [162] Mateescu, Dan D., Clădiri înalte cu schelet din oțel, Ed. Academiei Române, București, 1997
- [163] Meret, N.; Novac, Șt., Utilizarea rațională a cablurilor din oțel în industrie Ed. Tehnică, București, 1967, p.74/94.
- [164] Miclosi, V.; Popescu, N.; Stere, N., Îndrumător pentru alegerea oțelurilor. ED. Tehnică București, 1960.
- [165] Mirca, C.; Șontea, S., Considerations about the Major Defects at Metallic Constructions of the Equipment for Surface Coal Mines. Lucrările Seminarului Științific MDRVUGM 96. First Edition.
- [166] Mocanu, D.R., Rezistența materialelor. Ed. Tehnică, București, 1980
- [167] Mocanu, D.R., Rezistența materialelor. Ed. Tehnică, București, 1982
- [168] Mocanu, D.R. col., Încercarea materialelor. Vol. I. Ed. Tehnică, București 1982.
- [169] Moortel von, de, A new Method for the Fatigue Testes on Steel Wires and Wire Ropes and the new Viewpoints opened by the Results obtained. Wire and Wire Products, october, 1959.
- [170] Muller, H., Das Verhalten der Drahtseile bei Wechselbeanspruchungen Deutsche Hebe und Fordertechnik in Dienste der Transportationalisierung R.F.G., Februar, 1962.
- [171] Nădășan, Șt., Rezistența materialelor. Vol. IV, Ed. did și ped București, 1963
- [172] Nădășan, Șt.; Boleanțu, L.; Babeu, T.; Fischer, M.; Lambert V., Manualul tehnicianului de laborator uzinal. Ed. did și ped., București, 1969
- [173] Nădășan, Șt.; col., Încercări și analize de metale. Ed. Tehnică, București, 1965, p.99/157, p.521/533.
- [174] Nădășan, Șt.; Horovitz, B.; Bernath Al., Safta, V., Oboseala metalelor. Ed. Tehnică, București 1962.
- [175] Năstăsescu, V.; Fuiorea, I., "Analiza câmpului tensiunilor în vecinătatea concentratorului de tip crestătură cu fisură, prin metoda elementelor finite", Simpozion Național de mecanica ruperii, Midia, 1996, pag.107-112
- [176] Neguț N., Mașini de ridicat, U.T. Timișoara, 1994.
- [177] Nickola, W.E., "Failure Prevention Via Experimental Stress Analysis", Failure Prevention and Reliability, The Design Engineering Technical Conference, Chicago, 1977, pag.225-244
- [178] Nitzsche, K., Werkstoffprufung von Metallen. Band I, VEB Deutscher Verlag fur Grundstoffindustrie, Leipzig, 1963.
- [179] Olariu, M.; Babeu, T., Stadiul actual privind evaluarea și prelungirea duratei de viață a structurilor de rezistență Referat I., Univ. Politehnica Timișoara Fac.de mecanică, 1997
- [180] OPTIMTERM CONSULTING SRI., Analiza avariilor la construcția metalică a macaralelor capră, poduri rulante și macarale portat, portuare, care au avut loc în perioada 1970-1990, 1992
- [181] Owen, D.R.J.; Fawkes, A J, "Engineering Fracture Mechanics. Numerical Methods and Applications" Pitendge Press Ltd., Swansea 1983

- [182] Pacoste, C.; Stoian, V.; Dubină, D. Metode moderne în calculul structurilor, Ed. științifică și Enciclopedică, București, 1998
- [183] Pană, T. Aplicații ingineresti ale mecanicii Ruperii, Ed. Tehnică- București, 1974
- [184] Pană, T. Mecanica ruperii materialelor. București 1992.
- [185] Pană, T., Aplicații ingineresti ale mecanicii Ruperii, Ed. Tehnică- București, 1974
- [186] Pavel, A. Elemente de inginerie mecanică. Ed. Did. și Ped., București, 1981.
- [187] Petersen, R.E. Stress Concentration Factors, John Wiley & Sons, New York, 1974
- [188] Pop, N.; Rădulescu, V.; Olariu, M., Referat de experimentare nr. C 592; Expertizarea avariei la podul rulant 20 t-31,5 m, Prompt SA, T 5488-95
- [189] Popa, I. Îndrumător pentru exploatarea macaralelor în construcții, București, 1987.
- [190] pr EN 1991 Eurocode 1: Actions on structures
- [191] PrEN 1993-1-9 Eurocode 3: Design of steel structures Part 1-9: Fatigue strength of steel structures [Eurocod 3 - Calculul structurilor metalice - Partea 1.9 – Rezistența la oboseală a structurilor metalice]
- [192] R1-87, ISCIR Prescripții tehnice pentru proiectarea, construirea, montarea, exploatarea și verificarea macaralelor, mecanismelor de ridicat și dispozitivelor lor auxiliare
- [193] Rancu, N.; Tovissi, L. Statistica matematică cu aplicații în producție. Editura Academiei R.P.R, București, 1963.
- [194] Rațiu, M. "Engineering Fracture Mechanics for InService Failure Analysis of Power Plant Components", Short Course, ABB Impell Corporation, USA, 1988
- [195] Rațiu, M. "IMPELL VATTPACK Computer Code for FRACTURE MECHANICS Analysis of Piping and Vessels", ABB, San Ramo n, USA, 1985
- [196] Rațiu, M.; Fluieraș, D. "Stdiul metodelor de diagnoză a degradărilor și analiza propagării fisurilor", ISiM 1995
- [197] Regep, F.; Danajecz, M.; Pop, N.; Tișea, T., Elaborare program teoretic de calcul, Prompt SA, T 5141/3-91
- [198] Regep, F.; Kriz, F.; Pop, N.; Tișea, T., Cercetări privind elaborarea unei metodologii de analiza a stării de oboseala a structurilor portante ale IR cu durata de viață depășită în scopul stabilirii necesității de casare sau de prelungire a funcționării –Studiu, Prompt SA, T 5141/1-91
- [199] Regep, F.; Lupea, M.; Pop, N.; Tișea, T., Elaborarea metodologiei generale de analiza a stării de oboseală, Prompt SA, T 5141/5-92
- [200] Regep, F.; Lupea, M.; Pop, N.; Tișea, T., Incercari de laborator pentru verificarea metodelor teoretice de calcul, Prompt SA, T 5141/4-92
- [201] Regep, F.; Mirza, N.; Lupea, M.; Pop, N.; Tișea, T., Elaborarea metodologiei specifice pentru poduri rulante, Prompt SA, T 5141/6-93
- [202] Regep, F.; Pop, N.; Tișea, T., Elaborarea metodologiei specifice pentru utilaje speciale, Prompt SA, T 5141/8-93
- [203] Regep, F.; Pop, N.; Tișea, T., Elaborarea metodologiei specifice pentru macarale Prompt SA, T 5141/7-93
- [204] Ribovalov, I.P. i kol, Issledovanie Soprotivkeniia razrușeniiu nizkolegipobannoi stali api razlicinih bigdah narujenia, 111976, p.28/34.
- [205] Rice, J.R. Mechanics of Crack Tip Deformation and Extension by Fatigue, Fatigue Crack Propagation, ASTM STP 415, 1967, pag.247-311
- [206] Robinson, J. "Integrated Theory of Finite Element Methods", John Wiley & Sons, London, 1973
- [207] Roik, K., Vorlesungen über Stahibau, Grundlagen. Verlag Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin,

- München, Düsseldorf, 1978.
- [208] Rossetti, Ugo. *Nouvelle methode d'interpretation des essais de fatigues sur cables.* Bull.OIPEEC 26/1975, Politehnico di Torino, p.6/12
- [209] Rossetti, Ugo. *Quelques observations sur l'influence de D/d* Bull.OIPEEC 25/1975, Politehnico di Torino, p.52/53
- [210] Rusu, O. "Considerații asupra calculului propagării fisurii la solicitări variabile", *Lucrările Simpozionului Național de Mecanica rupei, Călimănești, 1998, pag.4.25-4.30*
- [211] Rusu, O. "Metode actuale de calcul la oboseală", *Buletinul ARMR, Nr.4, 1997, pag.2-8*
- [212] Rusu, O.; Teodorescu, M. *Oboseala metalelor. Aplicații ingineresti, 2, Ed. Tehnică, București 1992.*
- [213] Rusu, O.; Teodorescu, M.; Lascu-Simion, N. *Oboseala metalelor. Baze de calcul I, Ed.Tehnică, București, 1992.*
- [214] Saal, H. *Der Einfluß von Formzahl und Spannungsverhältnis auf die Zeit und Dauerfestigkeiten und Rißfortschreitung bei Flachstäben aus St.52. Darmstadt, 1972.*
- [215] Saffa, Ionel Voicu; Saffa, Ion Voicu, *Defectoscoapie nedistructivă industrială, Ed. Sudura, Timișoara 2001*
- [216] Saouma, V.E. "Fracture Mechanics", *Lecture Notes, University of Colorado, Boulder, 1997*
- [217] Schmitt, W. "Anwendung der Methode der Finiten Elemente in der Bruckmechanik unter besonderer Berücksichtigung dreidimensionaler und elastisch-plastischer Probleme", *Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs, Dissertation, Darmstadt, 1981*
- [218] Sedmak, S. "ESIS Recommendations for Use of Finite Element Method in Fracture Mechanics", *The 9th Biennial European Conference On Fracture, Varna, 1992, pag.841846*
- [219] Sedmak, S.; Arrie, C.; Glavardanov, I. *Assessment of Welded Joints Rotor Excavator Arrow MDRVUGM 96, First Edition.*
- [220] Shanyi, DU.; Lee, J.D. "Finite Element Analysis Of Slow Crack Growth", *Engineering Fracture Mechanics, Vol.16, No.2, 1982, pag.229245.*
- [221] Sherman, D.H. *Fracture Toughness Testing Using Chevron – Notched Specimens, Metals Handbook, Ninth Edition, Vol.8, Mechanical Testing, ASM, Ohio, 1985*
- [222] Sithikow, und, Pospeschow *Drahtseile VEB Verlag Technik Berlin, 1957 (trad.i.rusă).*
- [223] Smith, C.W. "Analytical and Experimental Studies of the Surface Flaw" *SEM Fall Conference on Experimental Mechanics, Keystone, Colorado, 1987*
- [224] SR EN 10045-1:1993 *Materiale metalice. Incercarea de încovoiere prin șoc pe epruveta Charpy. Partea 1:Metoda de încercare*
- [225] SR EN 292-1 *Securitatea mașinilor. Concepte de bază, principii generale de proiectare. Partea 1: Terminologie de bază, metodologie*
- [226] SR ISO 11782-1:2000 *Coroziunea metalelor și aliajelor. Încercarea la oboseală în mediu coroziv Partea 1: Încercare ciclică la rupere*
- [227] SR ISO 4301-1 *Instalații de ridicat. Clasificare Partea 1: Generalități*
- [228] SR ISO 4306-1:98 *Instalații de ridicat. Vocabular. Partea 1: Generalități*
- [229] SSPC *Încercări mecanice și analize metalografice ale îmbinărilor sudate, MICM-ISIM, Timișoara, vol.V, 1989.*
- [230] STAS 10100/0-75 *Principii generale de verificare a siguranței construcțiilor*
- [231] STAS 10108/0-78 *Construcții civile, industriale și agricole. Calculul elementelor din oțel*
- [232] STAS 10290-75 *–Încercările metalelor. Încercarea la tracțiune. determinarea caracteristicilor elastice*
- [233] STAS 1510-87 *Mașini de încercări mecanice statice. Condiții tehnice pentru verificare*

- [234] STAS 1963-81 "Rezistența materialelor. Terminologie și simboluri":
- [235] STAS 200-75 –"Încercările metalelor. Încercarea la tracțiune"
- [236] STAS 4203-74 Metalografie. Luarea și pregătirea probelor metalografice
- [237] STAS 4662-79 Instalații de ridicat. Prescripții generale de calcul pentru mecanisme
- [238] STAS 4664-63
- [239] STAS 6488:92 Solicități variabile. Vocabular și simboluri
- [240] STAS 6833-79 –"Încercările metalelor. Încercarea de încovoiere prin șoc la temperaturi scăzute"
- [241] STAS 6911-80 Căi de rulare și opritoare pentru poduri rulante și macarale
- [242] STAS 7511-81- "Încercările metalelor. Încercarea de încovoiere prin șoc pe epruvete cu creștătură în V"
- [243] STAS 8027-78 Încercările metalelor. Încercarea la oboseală cu sarcini axiale
- [244] STAS 8290-83 Instalații de ridicat. Principii de calcul și proiectare pentru construcția metalică
- [245] STAS 9261-81 –"Încercările metalelor. Încercarea de încovoiere prin șoc pe epruvete încărcate cu sudură"
- [246] STAS 9760-84 Încercarea metalelor. Determinarea tenacității la rupere în condițiile stării plane de deformare. Metoda KIC
- [247] STAS E 12803-90 "Determinarea deplasării la deschidere a fisurii"
- [248] STAS E 12803-90 Încercărilor metalelor. Determinarea deplasării la deschidere a fisurii
- [249] Stepin, P.A. Soproivlenie materialov, I.V.S., Moscova, 1973, p.288.
- [250] Stok, B.; Koc P. Finite Element Stress Concentration Investigation of Infinite Domains With Cracks, Proceedings of the 10th Congress on Material Testing, Vol.1, Budapest, 1991, pag.291-296
- [251] Swenson, D.; James, M. "FRANC2D/ L: A Crack Propagation Simulator for Plane Layered Structures", User's Guide. Manhattan, Kansas, 1996
- [252] Swenson, D.V. "Modeling Mixed – Mode Dynamic Crack Propagation Using Finite Elements", PhD. Thesis, Department of Structural Engineering Report, Nr.85-10, Cornell University, 1985
- [253] Tada, H.; Paris, P.; Irwin, G. "The Stress Analysis Of Cracks Handbook", Second Edition, St. Louis, 1985
- [254] Tăulescu, N.Gh. Verificarea calității prin esantionare secvențială Ed. Tehnică București, 1989, p.18/28
- [255] Teodorescu, C.C.; Mocanu, D.R.; Buga, M. Îmbinări sudate. Ed. Tehnică, București, 1973.
- [256] Țircomnicu, R.; Bălașa, B.; Blumenfeld, M. "An Expert System for Crack Initiation and Propagation", Lucrările celei de a 3-a Conferințe Internaționale de Elemente Finite și de Frontieră, Secțiunea 1, Constanța, 1995, pag.230-237
- [257] Tovissi, L. Vodă, V. Metode statistice. Aplicații în producție. Ed șt și enciclopedică, București, 1982, p.239/286.
- [258] Tripa, P.; Marșavina, L. "Computer Code for calculating the factor of safety against fracture and the fatigue crack propagation", 11th European Conference on Fracture, Poitiers, Franța, 1996
- [259] Tripa, P.; Marșavina, L. "Estimarea siguranței în exploatare a conductelor de abur intermediar fisurate utilizând conceptele mecanicii ruperii", Analele Universității din Oradea, Fascicola Mecanică, Vol.1,1995
- [260] Tripa, P.; Marșavina, L. "Influența ciclurilor de solicitare asupra factorului de intensitate a tensiunii și a propagării prin oboseală a unei fisuri longitudinale nestrăpunse dintr-o conductă de abur viu supusă la presiune interioară", Simpozion Național de Mecanica Ruperii",
- [261] Vainer L.A ;Razov, I.A. Isslegovanic viskosti razrusenia austeaitnc- martensitnoi staii marki OX15H5M, nr 21976, p 72/74

- [262] Van, der Sluys Application of Finite Element Techniques to Fracture Mechanics Analysis, The Babcock & Wilcox Company, Ohio, 1971
- [263] VBG 9 Maschinenbau-und Metall- Berufsgenossenschaft -, Unfallverhütungsvorschrift "Krane",1974 ,
- [264] VDI 3822 Schadensanalyse (April 1980)
- [265] Viță, I.; Sârbu, L.; Mașini de ridicat în construcții. Ed. Tehnică, București, 1969.
Nuteanu, T.;
Alexandru, C.
- [266] Volta, G., Lucia, "Results of the Pretests Analysis and Start-up of the JRC Ispra Pressurized
A.C. Thermal Shock Experiment: Nozzle Corner Crack Behavior", Int. Journal of
Pressure Vessels and Piping, vol.33, nr.3, 1998, pag.165-196
- [267] Wawrzynek, P.A.; "Discrete Modeling of Crack Propagation: Theoretical aspects and
Ingraffea, A.R. Implementation Issues in two and Three Dimensions", Cornell University,
Report 91-5, Ithaca, New York, 1991
- [268] Wnuk, P.M. "Fundamental Concepts of Damage Tolerant Design", 9th Biennial European
Conference on fracture, Varna, 1992, pag.687-715
- [269] Worting, A.G. Prelucrarea datelor experimentale.
Geffner, J
- [270] Wyss, T. Die Stahldrahtseile der Transport und Forderanlagen in besondereder
Standseile und Scheebahnen, 1956.
- [271] Yagawa, G.; Ueda, Numerical and Experimental Study On Ductile Fracture Of Plate With Surface
H.; Takahashi, Y. Crack, Fatigue and Fracture Assessment By Analysis and Testing, PVP-Vol.
103, ASME, 1986, pag.43-48
- [272] Zaretski, A., Calculating life, Hoist, August/September 2001
- [273] Zienkiewicz, O.C. "The Finite Element Method", 3 rd Edition, Mc GrawHill, New York, 1977
-