

MECANICA RUPERII

LABORATOR 3

DETERMINAREA EXPERIMENTALĂ A VITEZEI DE PROPAGARE A FISURII

-
1. Modelarea propagării fisurii prin oboseală
 2. Modele de calcul pentru viteza de propagare a fisurii
 3. Relații pentru calculul vitezei de propagare a fisurii
 4. Descriere program de încercări
 5. Efectuarea încercărilor
 6. Rezultate experimentale
-

1. Modelarea propagării fisurii prin oboseală

Primele indicații cu privire la rezistența opusă de un material la inițierea fisurii și la propagarea acesteia sunt furnizate de curbele de durabilitate determinate pentru epruvetele netede. Evoluția unei fisuri în cursul propagării sale se poate urmări pe baza diagramei lungimea fisurii – numărul de cicluri aplicat N , *figura 1*.

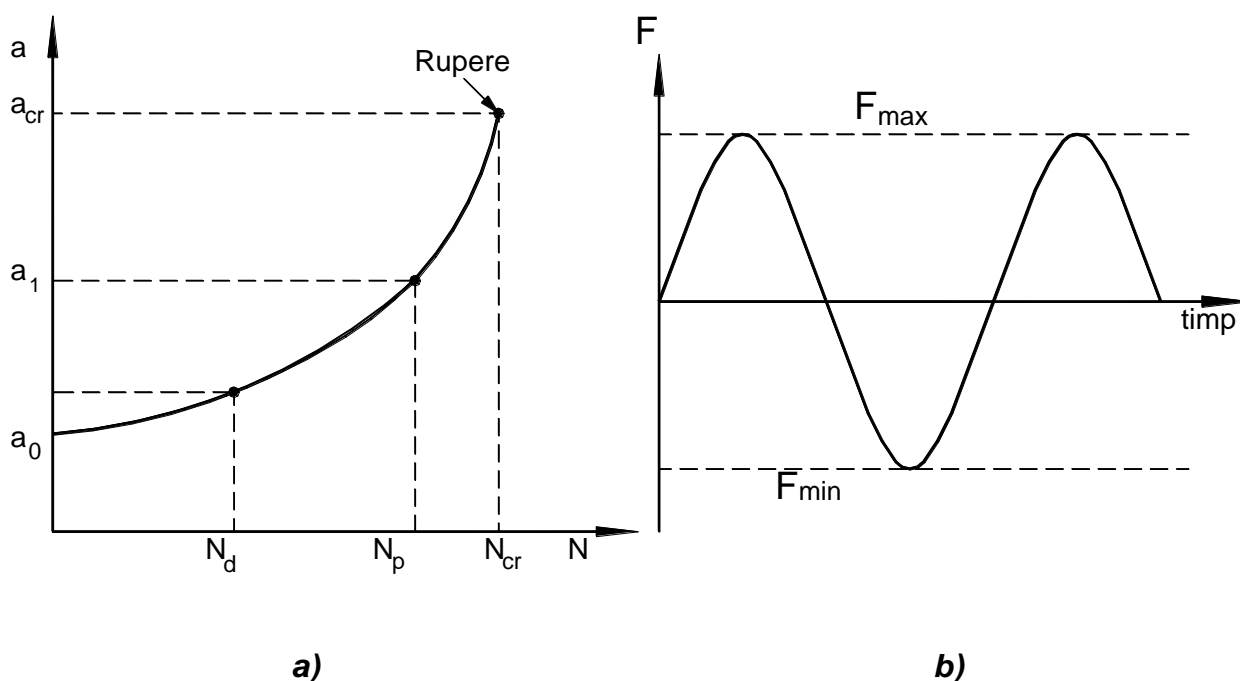


Fig. 1. Variația lungimii fisurii în timpul solicitării ciclice

Trasarea diagramei a - N constituie o problemă de bază în Mecanica ruperii deoarece, pe baza acesteia se poate aprecia durata de viață a unui element de rezistență sau a unei structuri în care s-a inițiat o fisură. Astfel, pentru propagarea unei fisuri cu

lungimea inițială a_0 până la lungimea a_1 , numărul de cicluri necesari este N_p , *figura 1a*. Din *figura 1* se pun în evidență următorii parametri:

- a_0 – lungimea fisurii inițiale;
- a_{cr} – lungimea critică a fisurii la care se produce ruperea finală;
- N_{cr} – numărul de cicluri necesar pentru propagarea până la rupere a unei fisuri cu lungimea inițială a_0 .

Curbele de variație a lungimii fisurii în funcție de numărul de cicluri se pot trasa pentru mai multe nivele ale tensiunii maxime la aceeași lungime a fisurii inițiale, *figura 2a*, sau pentru mai multe lungimi ale fisurii inițiale la același nivel al tensiunii maxime, *figura 2b*.

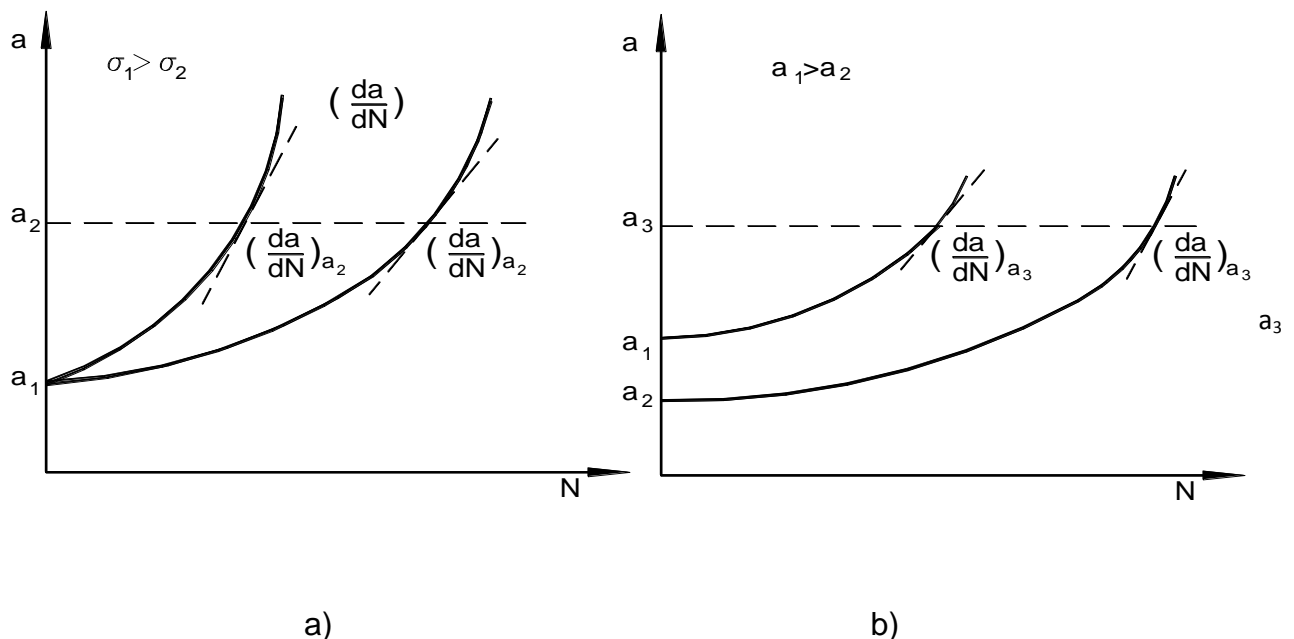


Fig. 2. Variația lungimii fisurii în timpul solicitării ciclice;

a) pentru aceeași lungime a fisurii inițiale; b) pentru același nivel al tensiunii maxime

Unul din parametrii de bază prin care se apreciază ruperea la oboseală este viteza de propagare a fisurii $\frac{da}{dN}$ reprezentând lungimea cu care se propagă fisura pe un ciclu de solicitare. Pentru diferite lungimi ale fisurii, viteza de propagare a acestora se poate obține calculând panta diagramei a - N . Viteza de propagare a fisurii $\frac{da}{dN}$ depinde de lungimea fisurii inițiale și de nivelul sau amplitudinea tensiunii aplicate, mărimi care intervin în expresia factorului de intensitate a tensiunii K . În mod obișnuit, odată cu creșterea lungimii fisurii inițiale, respectiv cu creșterea nivelului de solicitare, crește viteza de propagare a fisurii de oboseală. Ca urmare, viteza de propagare a fisurii de oboseală poate fi corelată cu variația factorului de intensitate a tensiunii ΔK , $\frac{da}{dN} = f(\Delta K)$.

Pentru cele mai multe aliaje metalice curba de variație a vitezei de propagare a fisurii în funcție de variația factorului de intensitate a tensiunilor poate fi schematizată ca în *figura 3*.

Regiunea I prezintă o creștere medie a lungimii fisurii pe ciclu mai mică decât dimensiunea grăunților. Viteza de propagare a fisurii scade pe măsură ce ne apropiem de o valoare ΔK_p , numită valoare de prag a factorului de intensitate a tensiunii. La o

amplitudine a solicitării mai mare decât valoarea de prag, $\frac{da}{dN}$ crește rapid în raport cu ΔK .

În această regiune, procesul de propagare a fisurii este puternic influențat de microstructură, de valoarea tensiunii medii și de condițiile de mediu. Viteza de propagare a fisurii variază de la valori mai mici de 10^{-8} mm/ciclu, cât este sub pragul de propagare, până la valori de cel mult 10^{-5} mm/ciclu. Existența unui prag de propagare a fisurii a fost pusă în evidență pentru prima dată de McClintock [1]. El a folosit un criteriu conform căruia, propagarea prin oboseală a fisurii începe atunci când, deformarea specifică locală sau deteriorarea acumulată pe o anumită distanță în fața vârfului fisurii atinge o valoare critică. Astfel, fisurile de oboseală nu se vor propaga dacă zona plastică de la vârful fisurii ajunge la dimensiuni comparabile cu dimensiunea microstructurii. Cercetările efectuate de Paris și Schmit [2] au demonstrat că valoarea de prag ΔK_p a variației factorului de intensitate a tensiunii pentru fisurile lungi, depinde nu numai de valoarea variației ΔK ci și de valoarea coeficientului de asimetrie a ciclului.

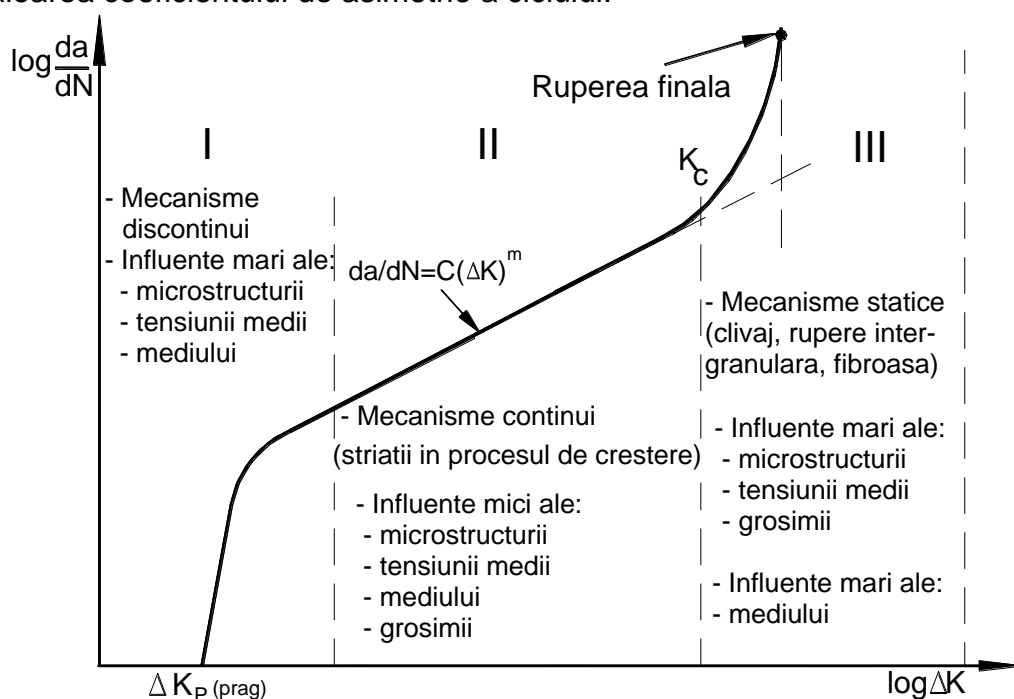


Fig. 3. Curba de variație pentru viteza de propagare a fisurii în raport cu variația factorului de intensitate a tensiunii

Regiunea II este caracterizată de existența unei dependențe liniare între da/dN și $\log \Delta K$. În această regiune propagarea fisurii de la un ciclu la altul are un caracter stabil. În această regiune influența structurii asupra vitezei de propagare a fisurii prin oboseală este redusă. În schimb, crește influența efectului combinat al tensiunii medii, frecvenței și mediului de lucru.

Regiunea III prezintă o variație importantă a ΔK , fapt ce conduce la o propagare instabilă a fisurii. Factorul de intensitate a tensiunii atinge valoarea sa critică K_{lc} ducând în cele din urmă la rupere. În această regiune acționează mecanismele caracteristice ruperii statice (clivajul, ruperea intergranulară) care sunt influențate semnificativ de microstructură, tensiunea medie și grosimea piesei, și în mai mică măsură de condițiile de mediu.

2. Modele de calcul pentru viteza de propagare a fisurii

Unul dintre aceste modele a fost propus de Head pentru placa infinită având o fisură centrală de lungime $2a$, solicitată de o tensiune sinusoidală de amplitudine σ [3]. Considerând că elementele de material din fața vârfului fisurii pot fi modelate de bare rigide, plastice, cu întărire, solicitate la întindere, el a ajuns la relația:

$$\frac{da}{dN} = C_1 \sigma^m a^n \quad (1)$$

în care C_1 este o constantă ce depinde de proprietățile mecanice ale materialului iar exponenții au valorile $m=3$ și $n=1,5$. Relații de forma (1) au mai obținut și Frost [4] pentru care $C_1=1$, $m=3$ și $n=1$.

Asemenea relații, deși sunt verificate experimental, nu pot fi utilizate în studiul diferitelor componente structurale, la care variază atât solicitarea cât și geometria.

Utilizarea conceptelor teoriei liniar-elastice a mecanicii ruperilor permite introducerea unui parametru care să încorporeze atât efectul încărcării cât și pe cel al geometriei. Se constată că, pentru valorile exponenților m și n determinate de Head, [3] relația (1) devine:

$$\frac{da}{dN} = C_1 K_I^3 \quad (2)$$

de unde rezultă că factorul de intensitate a tensiunii poate fi utilizat la descrierea modului de propagare a fisurii de oboseală. Folosind o teorie analitică a fenomenului de oboseală, Paris și Anderson au arătat că viteza de propagare a fisurii de oboseală poate fi exprimată în funcție de valoarea maximă a factorului de intensitate a tensiunii produsă de solicitarea ciclică și de coeficientul de asimetrie al ciclului. Ulterior, Paris și Erdogan [6] au găsit că, pentru un domeniu destul de larg ale valorilor vitezei de propagare a fisurii de oboseală, această mărime poate fi calculată cu relația:

$$\frac{da}{dN} = C (\Delta K)^m \quad (3)$$

în care $\Delta K = K_{\max} - K_{\min} = K_{\max} \sqrt{1 - R}$ reprezintă variația factorului de intensitate a tensiunii pentru modul I de propagare a fisurii iar C și n sunt constante care depind nu numai de material ci și de condițiile de solicitare – coeficientul de asimetrie a ciclului.

Legea lui Paris este una din cele mai folosite relații în analiza propagării fisurii produse prin oboseală. Fiind stabilită empiric, conduce la rezultate apropiate de realitate pentru un număr relativ mare de materiale în condiții de încărcare diferite.

În tabelul 1 sunt prezentate câteva valori ale constantelor C și n după Barthelemy pentru unele oțeluri și aliaje [7].

Tab. 1

Materialul		C $\frac{m}{\text{ciclu}} \left(\text{MPa} \sqrt{m} \right)^{-n}$	n
Oțeluri martensitice 552 MPa < σ_a < 2068 MPa		$1,36 \cdot 10^{-10}$	2,25
Oțeluri ferito-perlitice		$6,89 \cdot 10^{-12}$	3,20
Oțeluri austenitice inoxidabile		$5,60 \cdot 10^{-12}$	3,25
Aliaj de Al	AU4GT ₃	10^{-7}	2,90
	AU2GN	$1,2 \cdot 10^{-5}$	4,20

Cele mai multe modele privind viteza de propagare a fisurii prin oboseală au fost stabilite pentru *regiunea II* a curbei $da/dN=f(\Delta K)$ care se caracterizează prin aceea că, propagarea fisurii de la un ciclu la altul are un caracter stabil. Majoritatea modelelor cunoscute pot fi grupate în două mari categorii: *modele geometrice* și *modele de cumulare ale deteriorărilor*.

Modele geometrice. Aceste modele au la bază corelațiile stabilite experimental între distanța dintre două striatii succesive, și procesul de rotunjire a vârfului fisurii. Pe această bază se poate arăta că deplasarea ciclică privind deschiderea de la vârful fisurii $\Delta\delta_t$, dată de variația ΔK , este aproximativ egală cu viteza de propagare a fisurii da/dN , respectiv:

$$\frac{da}{dN} \approx \Delta\delta_t = \beta \frac{\Delta K^2}{\sigma_0' E_1} \quad (4)$$

în care: σ_0' reprezintă limita de curgere ciclică, $E_1 = \frac{E}{1-\nu^2}$ iar β este un coeficient determinat în funcție de deformația specifică la curgere, de coeficientul de ecruisare ciclică precum și de eficiența procesului de deschidere – închidere a fisurii în timpul procesului de propagare. Relația (4) conduce la valoarea $n=2$ pentru coeficientul din relația lui Paris, valoare ce se regăsește pentru multe aliaje. Aceeași relație arată că viteza de propagare a fisurii variază invers proporțional cu limita de curgere ciclică, fapt mai puțin observat experimental. Relația (4) dă rezultate bune numai pe porțiuni mici ale regiunii II.

Modele de cumulare a deteriorărilor. Aceste modele pornesc de la diferite criterii bazate pe valorile critice ale deformației specifice sau ale lucrului mecanic plastic la vârful fisurii. Dacă se folosește un model de deteriorare de tip Coffin-Manson, [8], conform căruia propagarea fisurii prin oboseală se produce atunci când raportul dintre amplitudinea medie a deformației specifice plastice $\bar{\gamma}_m^p$ și deformația specifică plastică reală la ruperea statică γ_r^p este egal cu unitatea, relația de calcul este următoarea:

$$\int_0^N 4 \left(\frac{\bar{\gamma}_m^p}{\gamma_r^p} \right)^k dN = 1 \quad (5)$$

unde k este o constantă ce poate fi egală cu 1 sau cu 2. Această teorie de deteriorare la oboseală estimează o creștere a fisurii proporțională cu radicalul razei zonei plastice de la vârful fisurii sau cu ΔK la puterea a patra. Toate modelele care se bazează pe cumularea deteriorărilor găsesc pentru exponentul n din relația lui Paris valoarea 4, ceea ce este în concordanță cu determinările experimentale făcute pentru cele mai multe metale. În modelul lui Rice [9], propagarea fisurii devine posibilă atunci când energia totală absorbită în bucla de histerezis devine egală cu valoarea critică W_c , necesară pentru crearea unei noi suprafețe de rupere având aria egală cu unitatea. Fie $\Delta u_y(x,0)$ deplasarea produsă în zona plastică pentru o inversiune a ciclului, atunci când originea sistemului de coordonate se află inițial la vârful fisurii. Presupunând că viteza de propagare a fisurii este constantă și că ruperea se produce în interiorul zonei plastice ciclice de rază r_c , incrementul de creștere a fisurii are expresia:

$$\frac{da}{dN} = \frac{4\sigma}{U_c} \int_0^{r_c} \Delta u_y(x,0) dx \quad (6)$$

unde σ_c reprezintă limita de curgere.

Raza zonei plastice ciclice, în ipoteza stări plane de tensiune, se calculează folosind relația $r_c \approx \frac{1}{2\pi} \left(\frac{\Delta K}{\sigma_c} \right)^2$. În ipoteza curgerii limitate, relația (6) devine:

$$\frac{da}{dN} = \frac{5\pi}{96U_c} \left(-v^2 \overline{g}_c \varepsilon_c \right) \left(\frac{\Delta K}{\sigma_c} \right)^4 \quad (7)$$

în care ε_c reprezintă deformația specifică la curgere. Pentru materialele ce prezintă ecruisare sau înmuiere ciclică, valorile σ_c și ε_c se înlocuiesc cu valorile ciclice corespunzătoare.

3. Relații pentru calculul vitezei de propagare a fisurii

Pentru calculul vitezei de propagare a fisurii de oboseală au fost propuse numeroase relații, teorii și modele. Cele mai multe au aplicabilitate restrânsă, și nu se pot utiliza pentru toate cele trei regiuni ale curbei din *figura 3*. În cele ce urmează se prezintă câteva dintre relațiile mai des întâlnite în activitatea de proiectare.

1. *Legea lui Paris*. Într-un sistem de coordonate dublu logaritmice, dependența liniară dintre viteza de propagare a fisurii și variația factorului de intensitate a tensiunii, caracteristică pentru *regiunea a II-a* a curbei din *figura 3*, se exprimă cu ajutorul *relației (3)* cunoscută sub numele de legea lui Paris. Constantele C și n se determină experimental, valorile lor fiind influențate de microstructură, condiții de mediu, temperatură, tipul solicitării și de coeficientul de asimetrie a ciclului de solicitare. Pentru coeficientul n ce reprezintă panta drepte de pe *regiunea II*, Paris a găsit valoarea 4. Numeroase investigații experimentale au arătat că n este cuprins între 2 și 7 pentru majoritatea materialelor ductile, valorile superioare corespunzând materialelor fragile. În lipsa unor date mai precise, pentru constantele definite de Paris pot fi considerate valorile $C=6,9 \cdot 10^{-12}$ și $n=3$ în cazul oțelurilor feritice și perlitice și respectiv $C=1,4 \cdot 10^{-10}$ și $n=2,3$ pentru cele austenitice, în care ΔK se exprimă în $MPa\sqrt{m}$ iar da/dN rezultă în $m/ciclu$.

Pentru regiunile I și III, au fost propuse mai multe relații empirice sau semiempirice capabile să ia în considerație influența coeficientului de asimetrie asupra vitezei de creștere a fisurii și a abaterii de la dependența liniară descrisă de legea lui Paris. Unele dintre aceste legi se descriu în cele ce urmează.

2. *Relația lui Donahue*. Pentru valori mici ale variației ΔK , respectiv pentru regiunea I a curbei din *figura 3*, Donahue a propus relația:

$$\frac{da}{dN} = C \left(K - \Delta K_p \right)^n \quad (8)$$

în care ΔK_p reprezintă valoarea de prag a parametrului ΔK . Această valoare se calculează cu relația dată de Klesnil și Lucas:

$$\Delta K_p = (-R)^{\gamma} \Delta K_{p0}$$

unde ΔK_{p0} reprezintă valoarea de prag în cazul $R=0$ iar γ este un parametru de material.

Sunt și alte relații de calcul indicate în literatură pentru ΔK_p :

- după Borsom:

$$\Delta K_p = 7,03(1 - 0,85R)$$

- după McEvily:

$$\Delta K_p = \left(\frac{1,2\Delta K_{p0}}{1 + 0,2 \frac{1+R}{1-R}} \right)$$

3. *Relația lui Forman* [10]. În domeniul III viteza de propagare a fisurii de oboseală este corelată cu variația factorului de intensitate a tensiunii prin ecuația propusă de Forman:

$$\frac{da}{dN} = \frac{C(\Delta K)^n}{(-R)K_c - \Delta K} \quad (9)$$

în care C și n sunt constante de material. Relația (9) se obține din relația (3) modificată cu termenul de la numitor, care scade odată cu creșterea încărcării și a coeficientului R și cu descreșterea tenacității la rupere K_c . Aceasta face ca, la o valoare dată a variației ΔK , viteza de propagare a fisurii să crească. Situația în care $K_{\max} = K_c$ corespunde instabilității.

Efectul valorilor mari ale variației ΔK precum și influența coeficientului de asimetrie R pot fi evidențiate mai mult, dacă în relația (9) se face substituția $\Delta K = (-R)K_{\max}$. Astfel, va rezulta:

$$\frac{da}{dN} = C(-R)^{n-1} \left(\frac{K_{\max}^n}{K_c - K_{\max}} \right) \quad (10)$$

La valori mari ale variației ΔK , în cazul materialelor ductile, dimensiunile zonei plastice devin însemnate iar ipotezele Mecanicii Rupurii Liniar-Elastice pot să nu mai fie valabile. În acest caz, pe suprafața de rupere, în afara striatiilor mai pot fi observate clivajul și separarea intergranulară precum și aspectul fibros.

4. *Relația lui Walker*. Pe cale empirică, pentru viteza de propagare a fisurii de oboseală, Walker a stabilit următoarea relație:

$$\frac{da}{dN} = C \frac{\Delta K^m}{(-R)^r} \quad (11)$$

în care C , m și r reprezintă constante de material. Această relație este utilizată de obicei pentru regiunea II, dar limitat, în anumite zone, ea poate fi utilizată și în regiunile I sau III.

5. *Relația lui Weertman*. Relația semiempirică propusă de Weertman poate descrie regiunile II și III cu ajutorul relației:

$$\frac{da}{dN} = C \frac{\Delta K^4}{K_c^2 - K_{\max}^2} \quad (12)$$

Relația (12) a fost ulterior perfecționată astfel încât să poată fi aplicată și la materiale cu ecrisare. Astfel:

$$\frac{da}{dN} = C \frac{\Delta K^4}{G\sigma_c^2 U_c} \quad (13)$$

în care C este o constantă de proporționalitate, G este modulul de elasticitate transversal iar σ_c reprezintă limita de curgere.

6. *Relații generalizate*. Incercările experimentale pe anumite materiale au arătat că, pentru multe cazuri, cele trei domenii se reduc la unul singur. Pornind de la aceste considerente s-au propus o serie de dependențe care permit o descriere completă a diagramei $da/dN=f(\Delta K)$. Dintre acestea putem aminti în primul rând relația propusă de *Austen* utilizabilă în cazul oțelurilor de construcții:

$$\frac{da}{dN} = \frac{\Delta K^2}{4\pi\sigma_c E} \left(\frac{\Delta K - \Delta K_p}{K_{Ic} - \frac{\Delta K}{1-R}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

Forman a propus o relație generală de forma:

$$\frac{da}{dN} = C \left(\frac{K_{\max} \frac{1-R}{1-nR} - \Delta K_p}{K_c - K_{\max}} \right)^{n_1} \quad (15)$$

în care C , n și n_1 sunt constante de material.

O altă relație care descrie curba din figura 3 a fost prezentată de Erdogan și Ratwani și are expresia:

$$\frac{da}{dN} = \frac{C (1+\beta)^n \Delta K^{n_1} (K - \Delta K_p)^{n_1}}{K_c - (1+\beta) \Delta K} \quad (16)$$

unde C , n și n_1 sunt constante de material iar β are expresia:

$$\beta = \frac{K_{\max} + K_{\min}}{K_{\max} - K_{\min}}$$

Factorul $(1+\beta)^n$ este introdus pentru a lua în considerație efectul tensiunii medii asupra propagării fisurii de oboseală iar numitorul ține seama de datele experimentale la nivele ridicate ale tensiunii. Factorul $(K - \Delta K_p)^{n_1}$ ia în considerație datele experimentale la nivele coborâte ale tensiunilor și ține seama de existența pragului de propagare. Alegând în mod corespunzător constantele, relația (16) este în concordanță cu datele experimentale, pentru domeniul de valori ale vitezelor cuprins între $25 \cdot 10^{-8}$ și $0,25$ mm/ciclu.

Momentul apariției propagării instabile a fisurii poate fi pus în evidență mai bine dacă numitorul din relația (11) este rescris sub forma:

$$\left[\frac{\Delta K}{K_{\max}} (K_c - K_{\max}) \right]^q$$

astfel încât, atunci când K_{\max} tinde către K_c numitorul tinde spre zero. Totuși, dimensiunile constantei C depind de valorile exponenților. Pentru a elimina acest dezavantaj, ecuația poate fi rescrisă sub forma:

$$\frac{da}{dN} = C' \frac{(1-R)^n \left[\frac{\Delta K - \Delta K_p}{K_0} \right]^p \left(\frac{\Delta K}{K_0} \right)^{n_1}}{(1-R)^q \left[1 - \frac{K_{\max}}{K_c} \right]^q} \quad (17)$$

în care sunt utilizate numai rapoarte adimensionale.

Pentru studiul propagării elasto-plastice a fisurilor de oboseală s-a încercat utilizarea conceptului *integralei J*. În acest scop a fost propusă relația:

$$\frac{da}{dN} = C (J)^m \quad (18)$$

care are aceeași structură ca și legea lui Paris.

4. Descriere program de încercări

Programul Da/dN pentru determinarea vitezei de propagare a fisurilor prin oboseală efectuează încercarea la oboseală producând propagarea fisurii plecând de la vârful concentratorului practicat în proba compactă.

Metoda de testare prevede încărcări ciclice ale probelor crestate care au fost pre-fisurate prin oboseală. Lungimea fisurii este măsurată în funcție de numărul de cicluri la oboseala efectuate până în momentul respectiv, iar datele sunt supuse analizei numerice pentru a stabili rata de creștere a fisurii. Viteza de creștere a fisurii este exprimată în funcție de factorul de intensitate a tensiunii, Delta-K (ΔK), care se calculează pe baza analizei în domeniul linier - elastic.

Materiale care pot fi testate prin această metodă nu sunt limitate în grosime sau rezistență, cu condiția ca probele să fie suficient de groase pentru a preveni flambajul și pentru ca în timpul încercării să rămână în zona de elasticitate. Metoda de încercare definește o gamă largă de mărimi cu dimensiuni plane proporționale, dar dimensiunea poate fi modificată în funcție de limita de curgere și sarcina aplicată.

Epruveta de tracțiune sau epruveta compactă – CT (compact tension) are o singură crestătură laterală în prelungirea căreia se induce o fisură prin oboseală care să fie ca aspect cât mai apropiată de fisurile reale. Configurația și dimensiunile generale ale acestei probe sunt prezentate în *figura 4*.

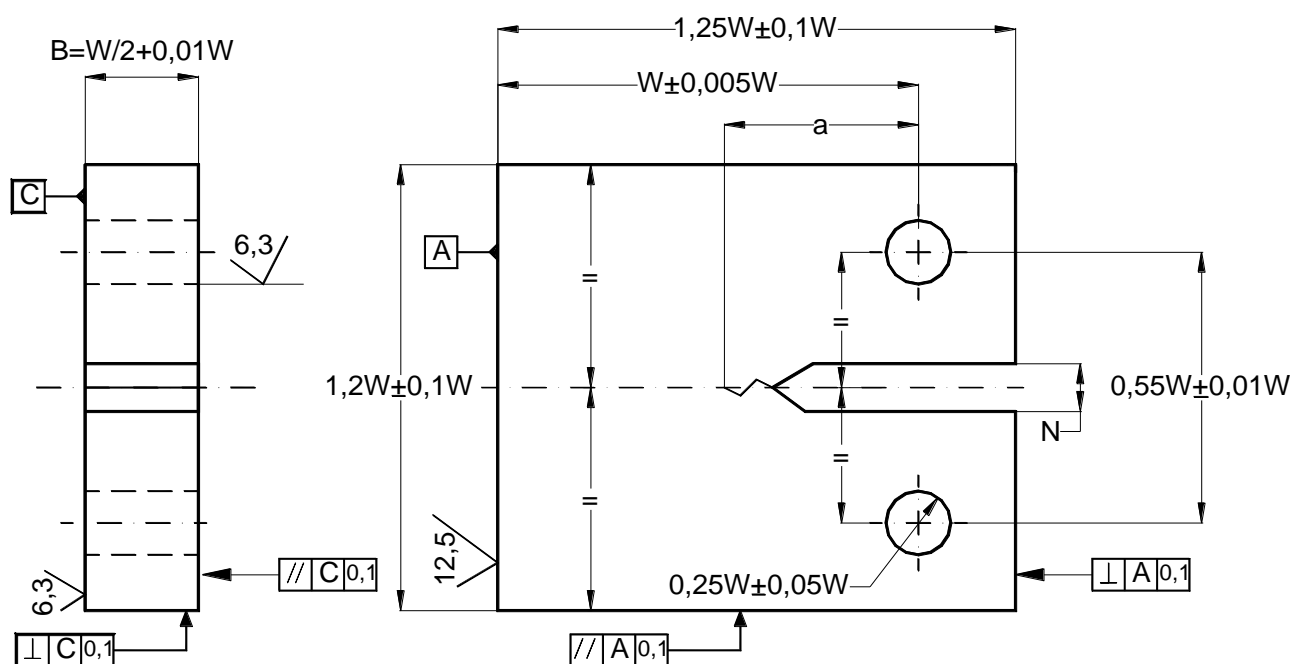


Fig. 4. Proba de tracțiune - CT

Rezultatele sunt exprimate în termenii factorului de intensitate a tensiunii la vârful fisurii, Delta-K (ΔK), definit de teoria elasticității liniare. Programul de propagare a fisurii prin oboseală conține diferite modalități de a determina propagarea fisurii. Propagarea fisurii este determinată de obicei vizual, dar mai există și alte metode cum ar fi diferența de potențial, determinarea complianței la descărcare, etc.

Programul de determinare a vitezei de propagare a fisurii prin oboseală îndeplinește majoritatea cerințelor standardului ASTM E647. Parametrii de încercare se introduc de la un ecran principal de date. În meniul principal al programului se introduc date pentru identificarea lotului și probei, configurația și dimensiunile probei precum și parametrii de control și testare. Se pot stoca toate aceste informații de configurare ca o configurare unică, personalizată de testare, care se prelua mai târziu pentru a rula teste similare, sau pentru a repeta testele anterioare. În timpul execuției programului și a desfășurării încercării este afișat un grafic ce arată forma de undă sub care se face încercarea. De asemenea se mai afișează un al doilea grafic care dă Lungimea fisurii în raport cu Numărul de cicluri sau Forța în raport cu COD (semnalul de la extensometru) sau alte asemenea dependențe care se pot selecta cu ajutorul butonului din meniu.

Programul poate utiliza metoda complianței pentru determinarea creșterii lungimii fisurii propagate. Relația dintre complianță și lungimea fisurii a fost determinată analitic pentru un număr de probe standard, inclusiv pentru proba compactă (CT).

Aceste relații sunt de obicei exprimate în termeni adimensionali pentru complianță,

$$U = \frac{E \cdot v \cdot B_{eff}}{P}$$

$$\frac{E \cdot v \cdot B_{eff}}{P}$$

și lungimea fisurii normalizată, a/W , care este definită de relația:

$$\frac{a}{W} = \sum_{i=0}^5 C_i \cdot U^i \quad (19)$$

unde:

- E- modulul lui Young;
- v este deplasarea între punctele măsurate;
- B_{eff} este grosimea efectivă a probei;
- P este forța între punctele de măsurare;
- a este lungimea fisurii;
- W este lățimea probei;
- $C_{0...5}$ sau C_i sunt coeficienții de complianță prezentați în tabelul 2. Pentru proba compactă (CT) coeficienții sunt dați atât pentru **fața frontală** cât și pentru linia de încărcare (în funcție de locul în care se face măsurarea pentru v – cu extensometrul pentru fața frontală, pentru deplasarea traversei la punctele de aplicație ale forței).

Tab. 2. Coeficienții specifici ai complianței pentru proba compact CT, *Centre Cracked Tension, Bend & Disc Compact Tension Specimens*

Specimen	C ₀	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅
CT _{ff}	1.0010	-4.6695	18.460	-236.82	1214.9	-2143.6
Stepped Notch Compact Tension & CT _{II}	1.000196	-4.06319	11.242	-106.043	464.335	-650.677
CCT	-0.12365	3.353445	4.963435	-56.569	98.013	-52.0929
Bend	0.999748	-3.9504	2.9821	-3.21408	51.51564	-113.031
DCT	1.000	-4.459	2.066	-13.041	167.627	-481.4

Pentru proba compactă complianța este dată de relația:

$$U = \frac{1}{\sqrt{\frac{E \cdot v \cdot B_{eff}}{P} + 1}} \quad (20)$$

unde B_{eff} este grosimea efectivă a probei și este dată de relația:

$$B_{eff} = B - \frac{(B - B_{net})^2}{B} \quad (21)$$

Datele obținute din încercarea prin care se determină viteza de propagare a fisurii prin oboseală se utilizează pentru a determina adecvarea materialului testat la aplicațiile la care va fi supus în exploatare. Informațiile obținute din cadrul unei asemenea încercări pot fi importante în alegerea materialului adecvat pentru componentele și structurile la care fisurile provocate de fenomenul de oboseală pot fi critice pentru durata de viață a respectivei componente sau structuri.

Ce se întâmplă în timpul unui test?

În general, programul de propagare a fisurilor prin oboseală Instron FastTrack da/dN produce o încercare de oboseală prin care se încarcă și descarcă în mod repetat o probă din materialul dorit pentru ca o fisură să se propage de la nivelul creștăturii practicate în prealabil prin prelucrare mecanică. Încercarea are loc până când fisura atinge o lungime pre-stabilită, sau până când se ating un număr de cicluri de solicitare, moment în care programul prezintă în mod automat anumite rezultate.

După terminarea încercării, programul poate reprezenta următoarele grafice:

- Viteza de creștere a fisurii (da/dN) în raport cu Delta-K (ΔK);
- Lungimea fisurii în raport cu numărul de cicluri;
- ΔK în raport cu numărul de cicluri;
- ΔP în raport cu numărul de cicluri.





Programul de determinare a vitezei de propagare a fisurii sub oboseală îndeplinește majoritatea cerințelor prevăzute de standardul ASTM E647.

Programul conține o opțiune prin care poate trece automat în modul de determinare a tenacității la fisurare K_{IC}.

5. Efectuarea încercărilor

Se pornește mașina de încercat INSTRON urmând următorii pași:

Pornire Consolă

1. Pornire comutator (PLC) – manetă – de pe cutia de comutare a blocului hidraulic
2. Pornire Consolă – buton – din spatele unității de tip CONSOLA, (se APRINDE BUTONUL “O” de la mașină)
3. Pornire P.C. – buton
4. *3.a. Se așteaptă 2 minute pentru pornire – altfel la  (galben) apare mențiunea **uncalibrated** ( **blink galben**)*
5. Pornire soft “Instron Console” de pe P.C.
6. Apare “blink” “R” – trebuie Restaurată calibrarea pentru FORTA
7. Se apasă pe “R” de pe consolă și apoi pe “R” de pe “Load”
8. Se apasă pe “**Restore Calibration**”
9. “Close” de pe menu-ul astfel deschis de pe consolă
10. Pe Consolă rămâne culoarea **galben intermitent** cu semnul 
11. Se pornește apa de la rețea
12. Se pornește mașina cu butonul “I” – presiune joasă – se ține apăsat până când pompa intra în regim staționar
13. Pe Consolă apare verde intermitent
14. Se apasă pe “II” – de la mașină – presiune înaltă
15. Cu ajutorul butonului “↑” de pe telecomandă se ridică pistonul – astfel se va putea stabili și limita superioară de la punctul 17.
16. Se apasă pe imaginea din stânga sus, 
17. Se apasă pe “Position” – actualmente cu verde și săgețile alb
18. De la General (stânga sus) se apasă pe “Primary limits” (devine portocalie)
19. Se apasă pe “Arm all limits”
20. Apar toate săgețile (de la Position și Load) cu verde

Pornire program da/dN

Se pornește programul da/dN care conține mai multe sectoare, figura 5.

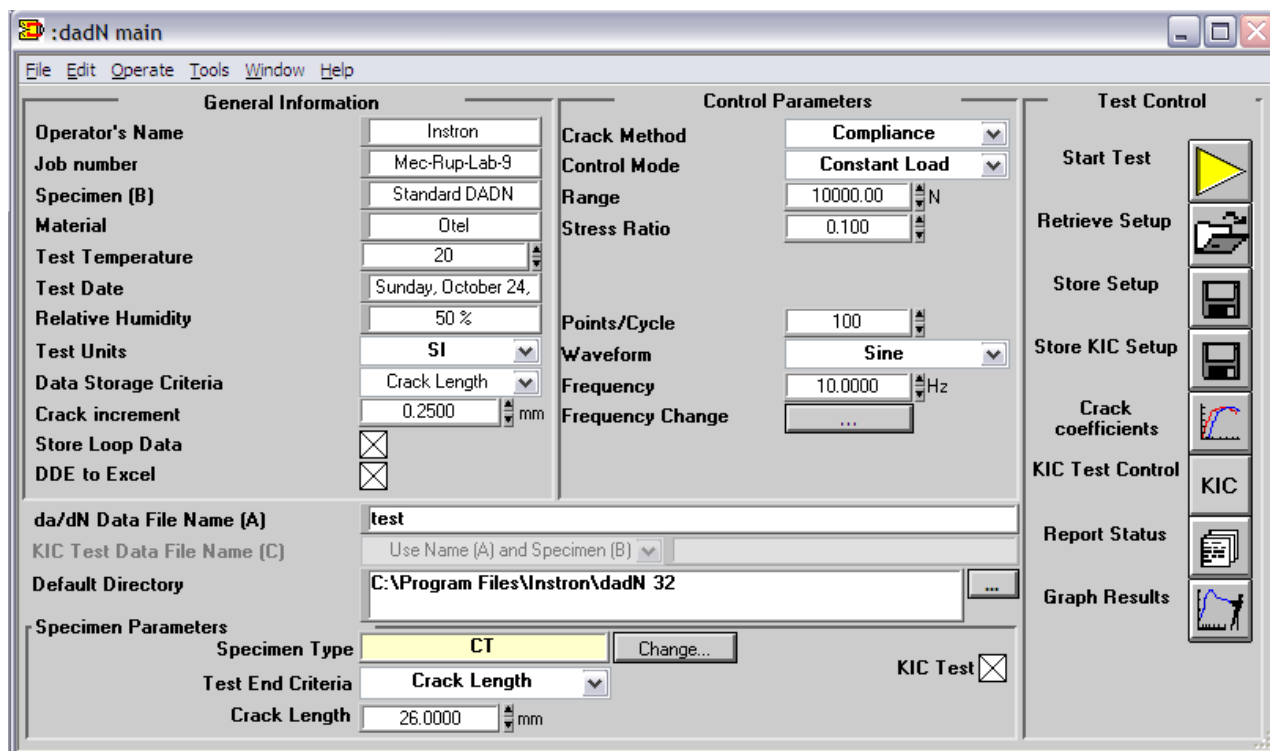


Fig. 5. Ecranul principal al programului da/dN

Primul sector se referă la informații generale referitoare la denumirea încercării, material, dată, sistemul de unități de măsură și criteriul de stocare a datelor care poate să fie pentru lungimea fisurii sau numărul de cicluri de solicitare.

Al doilea sector cuprinde date referitoare la numele fișierului în care se vor stoca datele, criteriul de sfârșit de încercare ce poate fi numărul de cicluri sau lungimea finală a fisurii și date geometrice despre probă, figura 6. Dacă lungimea finală a fisurii, dată manual prin butonul „visual” sau calculată prin Complanță depășește valoarea dată aici (26 mm) încercarea se oprește și se formează rezultatele finale.

În acest meniu se trec toate date referitoare la dimensiunile probei, la poziționarea extensometrului (gauge location – distanța de la punctul de aplicație al forței la brațele extensometrului, knife edge thickness – aceeași valoare – diferă doar pentru proba de încovoiere și gauge length – distanța dintre brațele extensometrului – 10 mm) și date referitoare la material. Modulul de elasticitate de aici precum și B și B_n se vor utiliza în calculul Complanței.

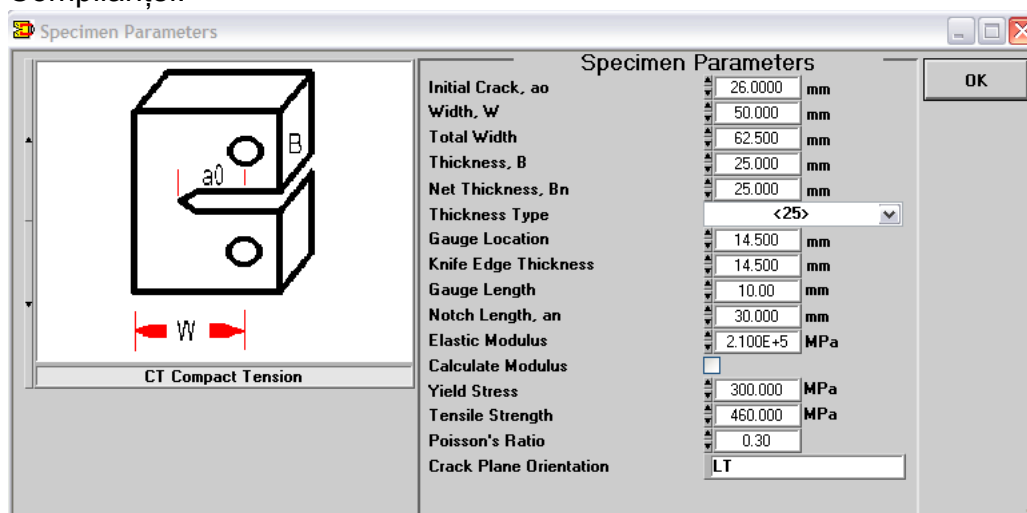
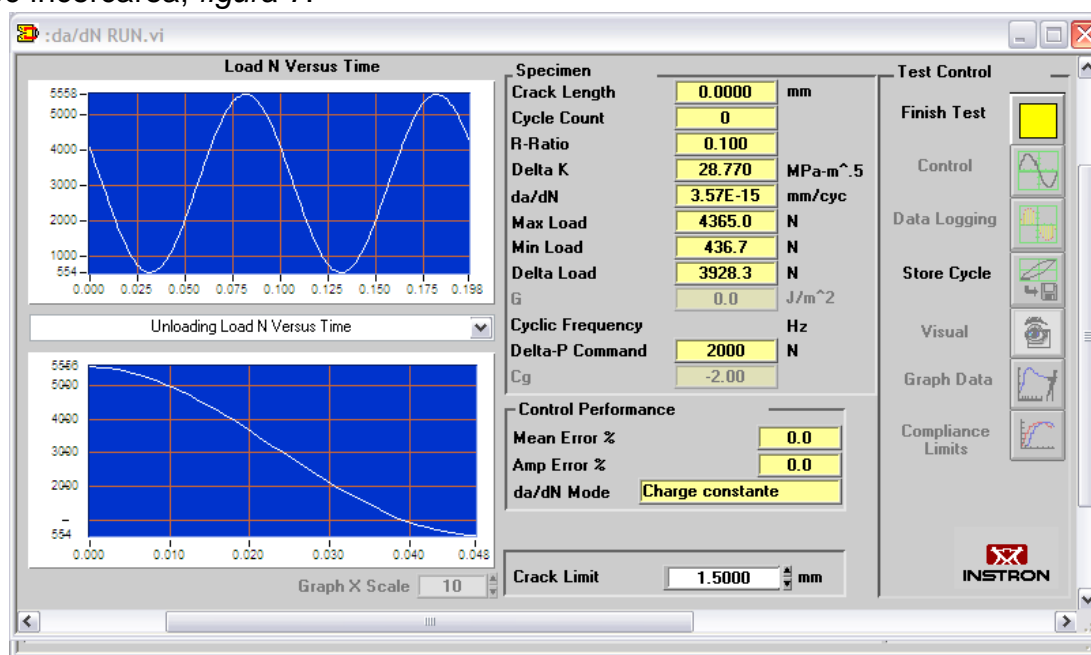


Fig. 6. Proba compactă – dimensiuni

Al treilea sector cuprinde:

- a) metoda de calcul pentru lungimea fisurii propagate. *In cazul în care se alege modul vizual, metoda de lucru este următoarea:*
- după start-test apare un nou ecran cu graficul de variație a forței în raport cu timpul și un al doilea grafic, *figura 7*, ce cuprinde mai multe posibilități pentru abscisă și ordonată: descărcarea în funcție de timp, forța în funcție de deplasare, forța în funcție de LPD redus și forța în funcție de LPD histerezis. Atunci când fisura se propagă în mod vizibil, se apasă pe butonul „visual” și de tastează lungimea fisurii actuale. Acesta se citește pe ecranul laptop-ului, imaginea fiind preluată „live”, cu o cameră de luat vederi sau o webcam, de pe epruvetă. Pentru ușurința citirii, pe epruvetă este instalată o scală gradată care pe imaginea „live” este mărită;
- In cazul în care se alege metoda de calcul cu ajutorul Complanței, prin apăsarea butonului „crack coefficients” din meniu-ul principal se pot verifica coeficienții din tabelul 2 ce se utilizează în relația (19) pentru calculul lungimii fisurii propagate a., figura 8. Complanța din relația (20) utilizează valorile date în meniu-ul din figura 6 pentru E, B și B_{net}. Valoarea pentru v(deplasarea la deschiderea flancurilor fisurii) se preia automat de la extensometrul montat pe fața frontală a probei (COD – crack opening displacement) iar forța se ia din execuția programului care apare și în meniu-ul secundar – atunci când are loc încercarea, figura 7.*

**Fig. 7. Meniu-ul de încercare - secundar**

În timpul încercării va apărea ecranul din figura 7. În acest ecran se pot schimba în timpul încercării următoarele: valorile minime și maxime ale forței de încercare și lungimea fisurii finale.

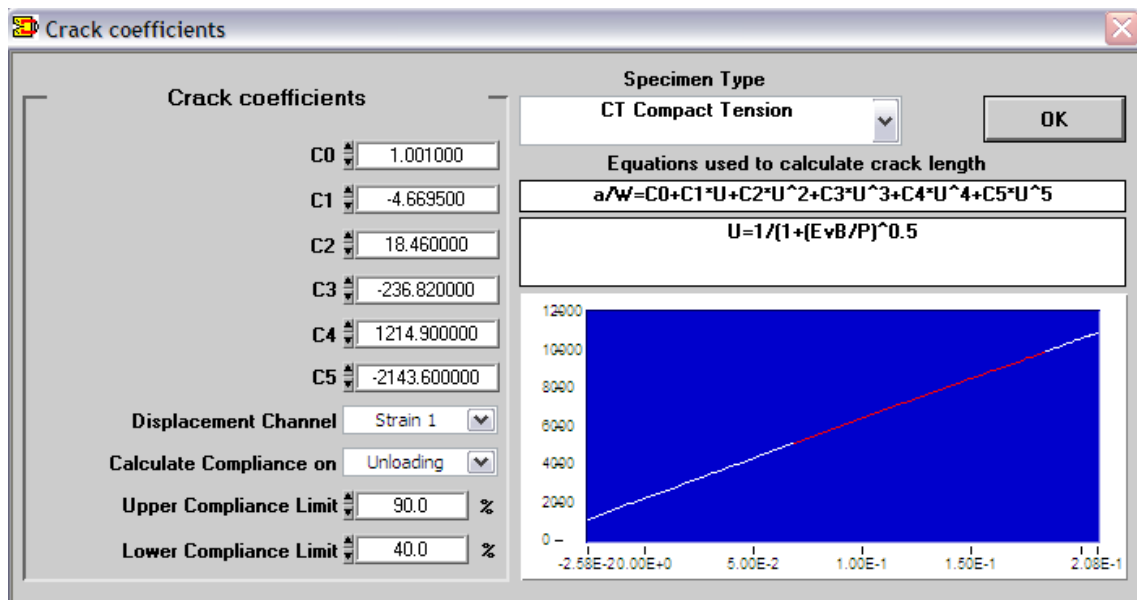


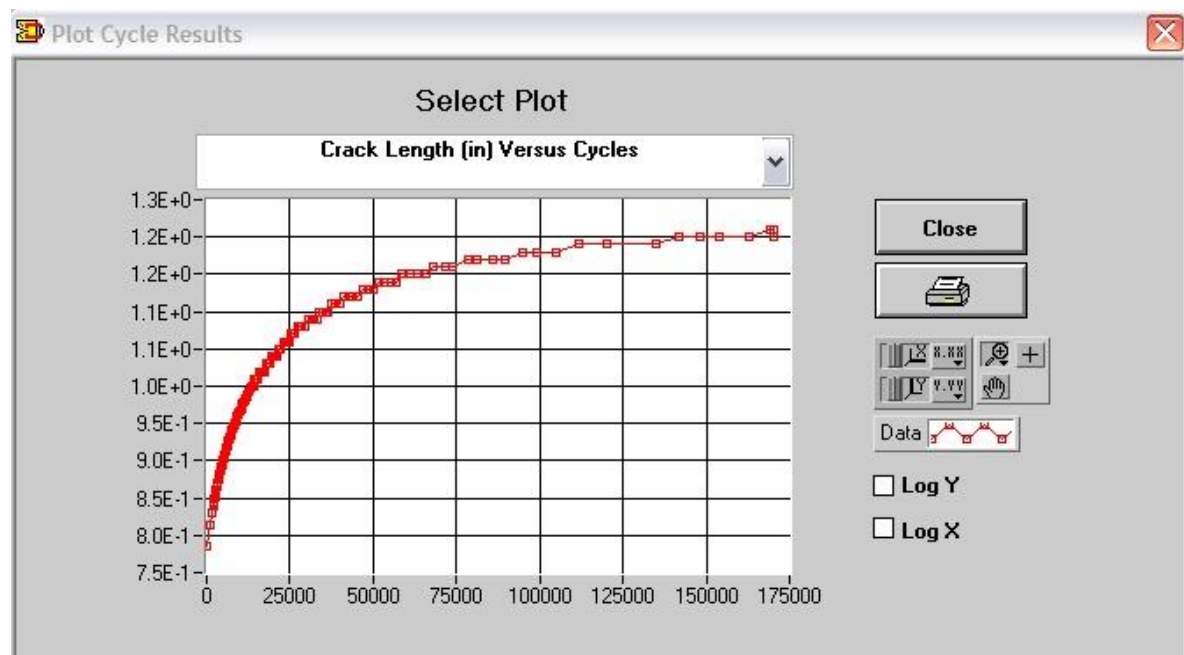
Fig. 8. Coeficienții utilizați pentru metoda Complianței

- pentru modul de control al forței se va alege „constant load” cu o forță de 10000 N pentru proba B-25. In aceste condiții fisura se va propaga lent în timp.
- In aceeași secțiune „stress ratio” ales cu valoarea 0,1 presupune o încercare între $F_{min} = 0,1 \cdot F_{max}$ și F_{max} , deci între 1000 și 10000 N.
- Numărul de puncte se urmează a se stoca pe un ciclu se alge 10;
- Forma ciclului se alege sinusoidală cu o frecvență de 10 Hz.

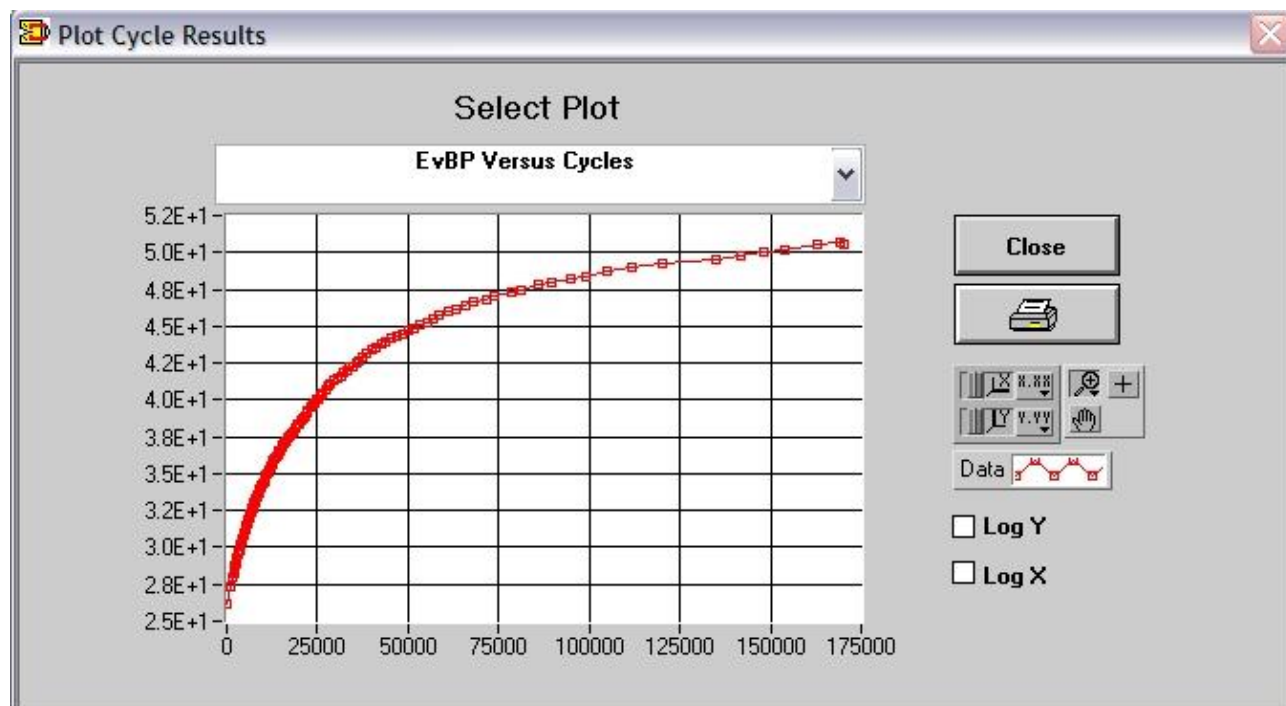
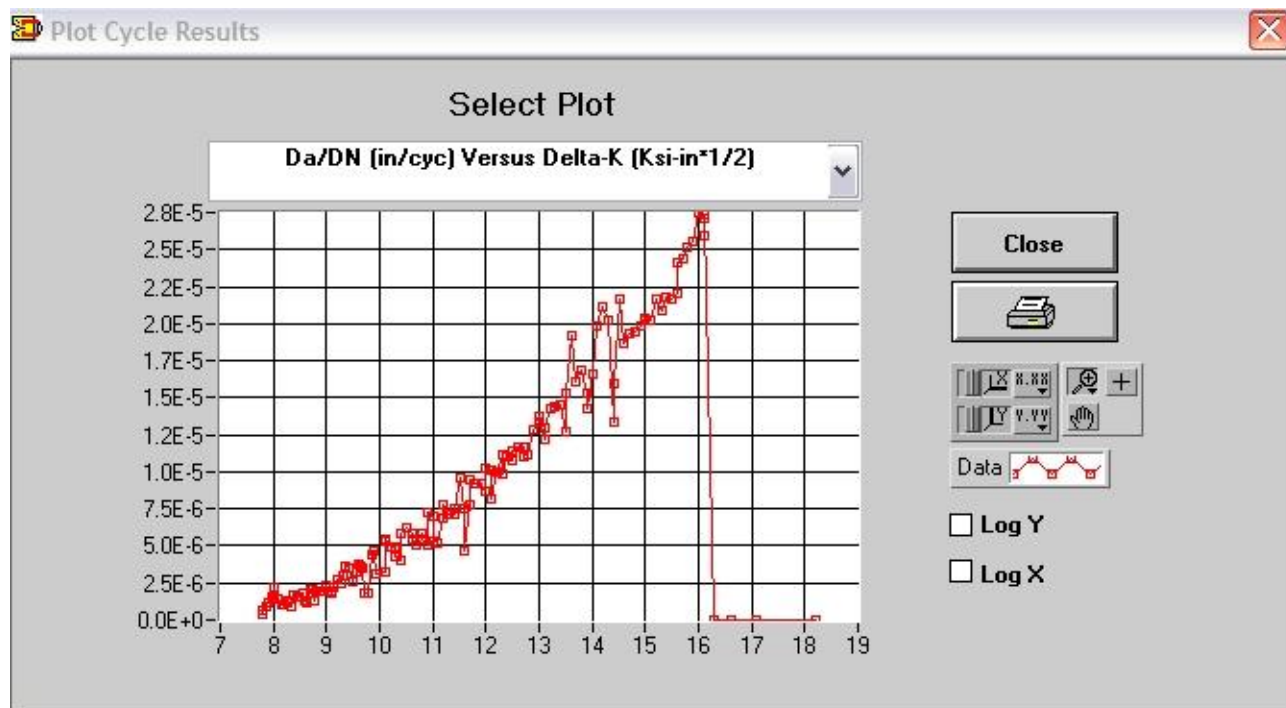
6. Rezultate experimentale

Rezultatele sunt prezentate atât sub formă de grafice cât și sub formă de tabele de date. In funcție de opțiunea utilizatorului graficele pot fi:

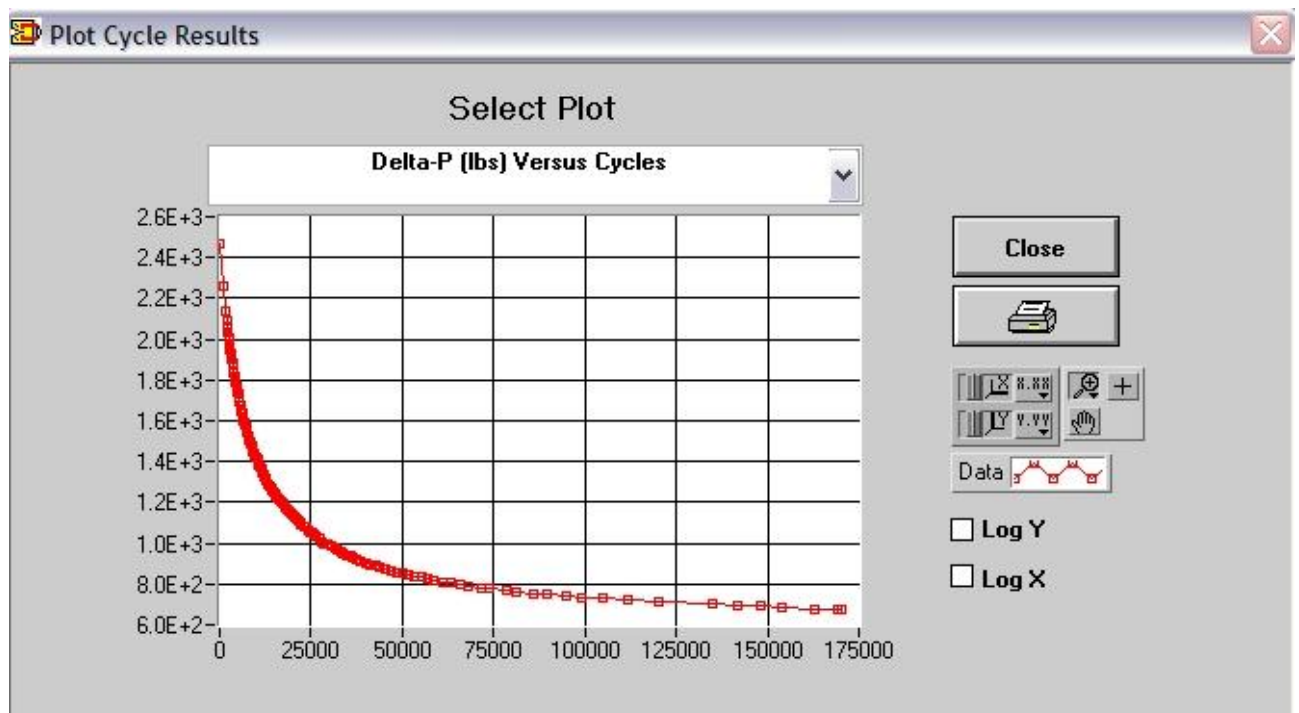
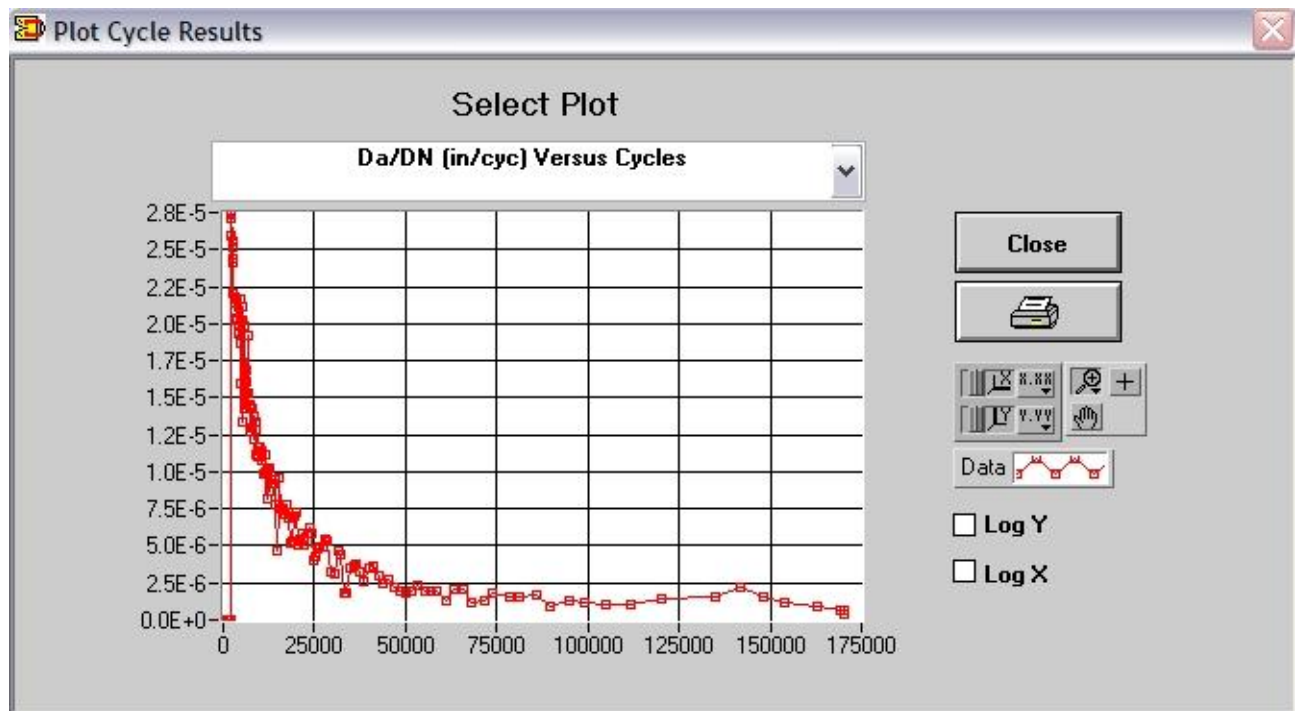
- Variația lungimii fisurii în raport cu numărul de cicluri de solicitare;
-



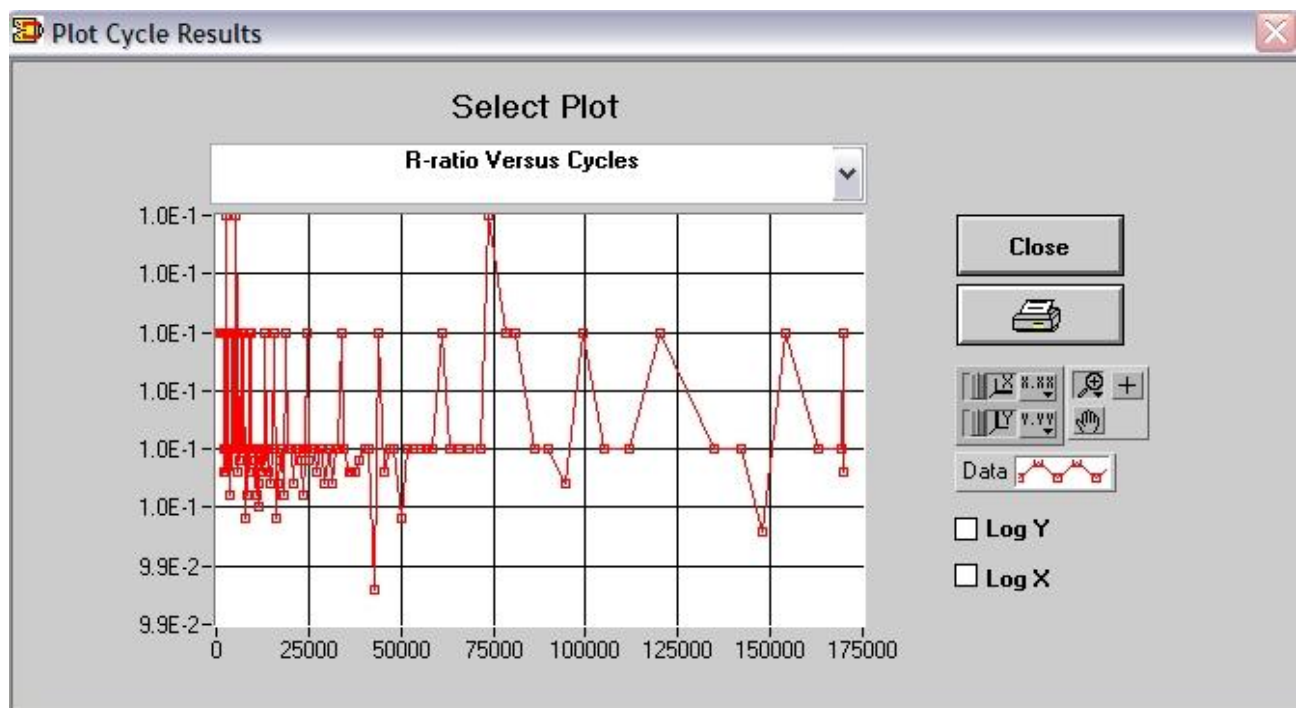
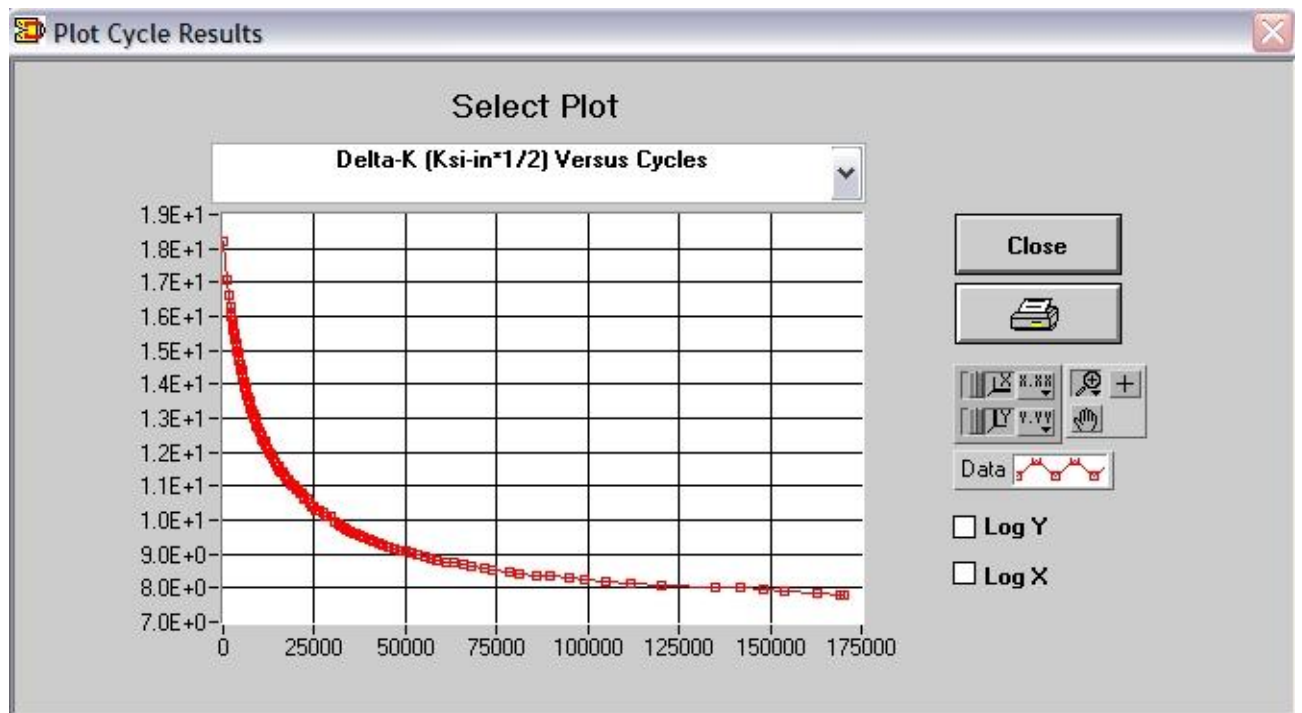
- Variația da/dN în raport cu ΔK ;

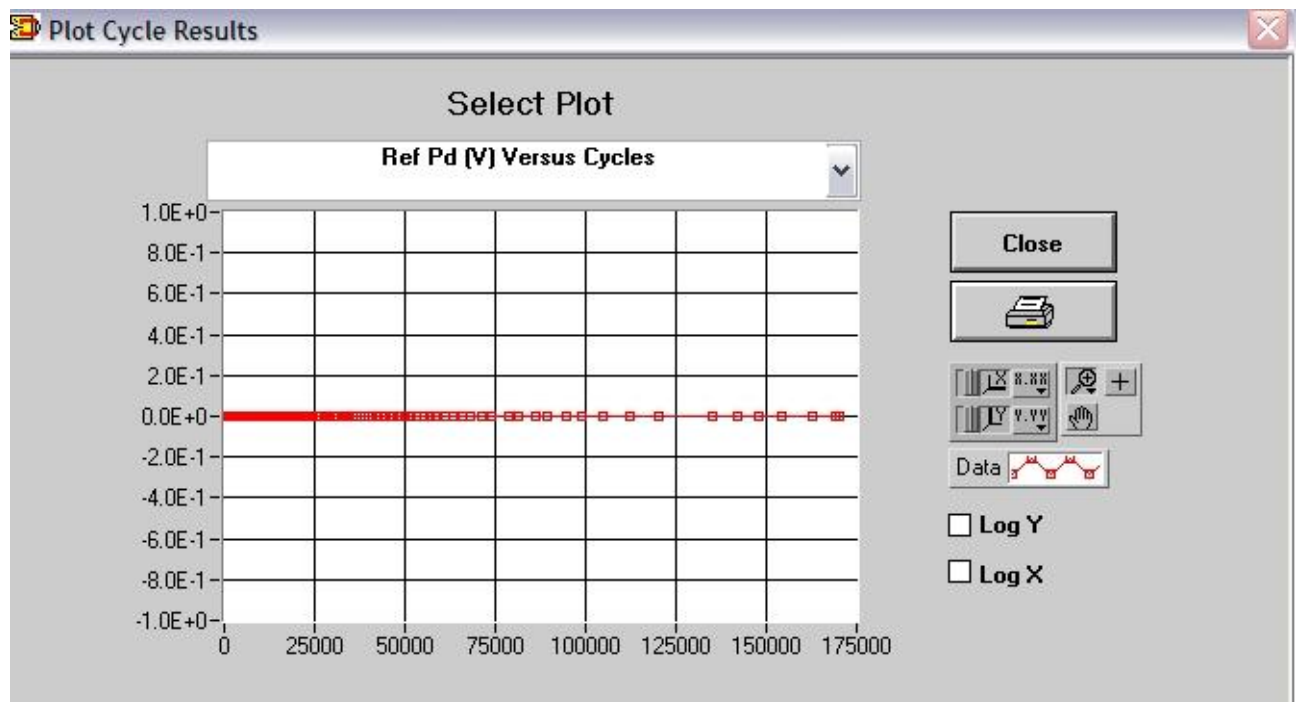
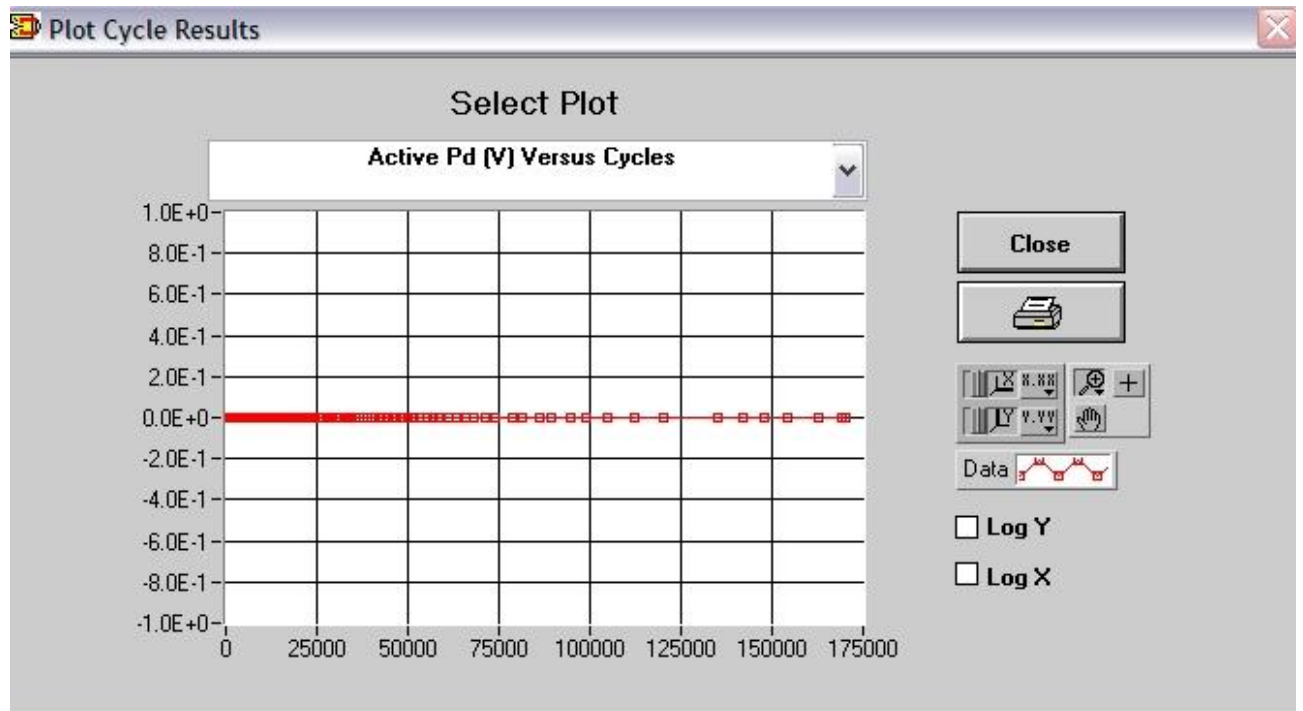


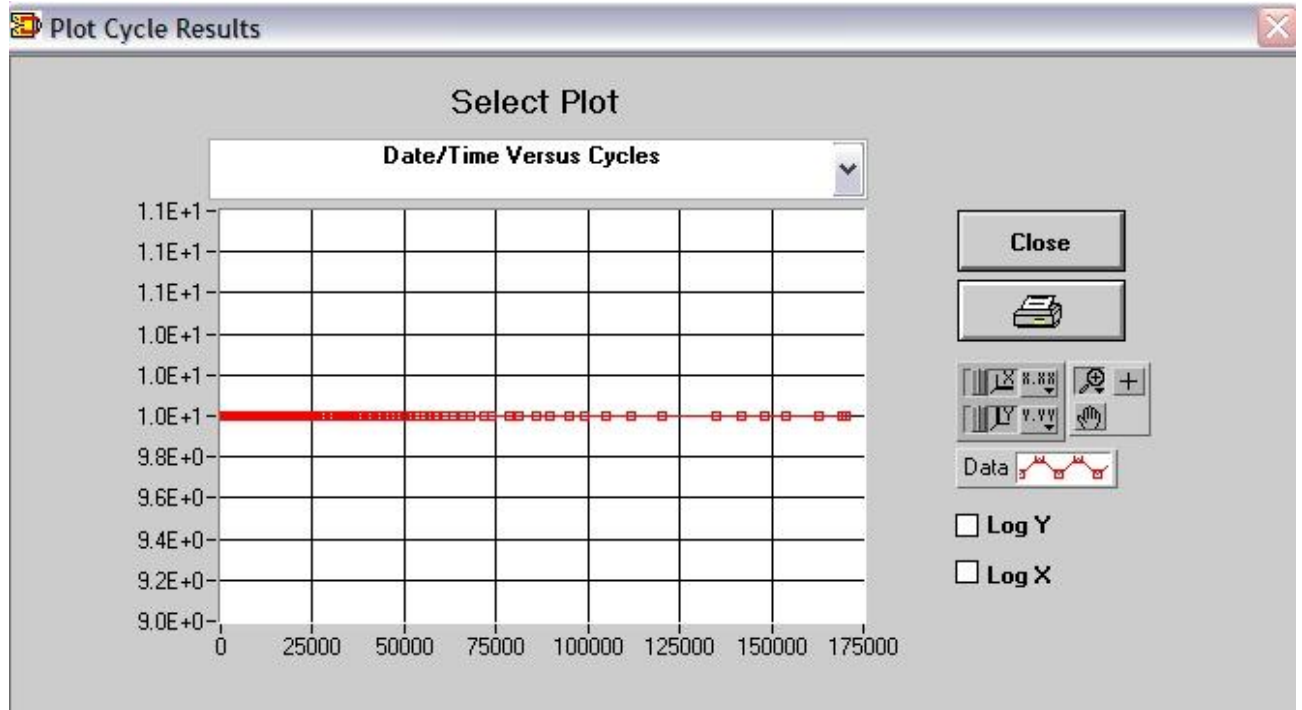
- Variația da/dN în raport cu numărul de cicluri;



- Variația ΔK în raport cu numărul de cicluri;







Tabelul de date

da/dN Test Results

OK

Print

	Cycles	Crack Length (in)	EvBP	Da/DN (in/cyc)	Delta-P (lbs)	Delta-K (K _{max} ^{1/2})	R-ratio	Active Pd (V)	Ref Pd (V)	Date/Time
1	3.30E+01	7.85E-01	2.62E+01	0.00E+00	2.47E+03	1.82E+01	1.01E-01	0.00E+00	0.00E+00	10/05/1995 11:11
2	9.81E+02	8.14E-01	2.73E+01	0.00E+00	2.26E+03	1.71E+01	1.01E-01	0.00E+00	0.00E+00	10/05/1995 11:13
3	1.58E+03	8.31E-01	2.80E+01	0.00E+00	2.14E+03	1.66E+01	1.01E-01	0.00E+00	0.00E+00	10/05/1995 11:14
4	1.90E+03	8.39E-01	2.83E+01	0.00E+00	2.09E+03	1.63E+01	1.01E-01	0.00E+00	0.00E+00	10/05/1995 11:14
5	1.91E+03	8.40E-01	2.84E+01	0.00E+00	2.09E+03	1.63E+01	1.00E-01	0.00E+00	0.00E+00	10/05/1995 11:14
6	1.95E+03	8.41E-01	2.84E+01	2.74E-05	2.06E+03	1.61E+01	1.00E-01	0.00E+00	0.00E+00	10/05/1995 11:15
7	2.02E+03	8.43E-01	2.85E+01	2.59E-05	2.06E+03	1.61E+01	1.00E-01	0.00E+00	0.00E+00	10/05/1995 11:15
8	2.15E+03	8.45E-01	2.86E+01	2.71E-05	2.05E+03	1.61E+01	1.00E-01	0.00E+00	0.00E+00	10/05/1995 11:15
9	2.27E+03	8.49E-01	2.88E+01	2.75E-05	2.03E+03	1.60E+01	9.98E-02	0.00E+00	0.00E+00	10/05/1995 11:15
10	2.39E+03	8.51E-01	2.89E+01	2.56E-05	2.01E+03	1.59E+01	1.00E-01	0.00E+00	0.00E+00	10/05/1995 11:16
11	2.50E+03	8.54E-01	2.90E+01	2.52E-05	2.00E+03	1.58E+01	1.01E-01	0.00E+00	0.00E+00	10/05/1995 11:16
12	2.62E+03	8.57E-01	2.91E+01	2.44E-05	1.98E+03	1.57E+01	9.98E-02	0.00E+00	0.00E+00	10/05/1995 11:16
13	2.77E+03	8.60E-01	2.92E+01	2.41E-05	1.96E+03	1.56E+01	1.02E-01	0.00E+00	0.00E+00	10/05/1995 11:16
14	2.89E+03	8.62E-01	2.93E+01	2.20E-05	1.95E+03	1.56E+01	1.00E-01	0.00E+00	0.00E+00	10/05/1995 11:16
15	3.01E+03	8.65E-01	2.95E+01	2.16E-05	1.93E+03	1.55E+01	1.01E-01	0.00E+00	0.00E+00	10/05/1995 11:17
16	3.17E+03	8.69E-01	2.96E+01	2.18E-05	1.91E+03	1.54E+01	1.00E-01	0.00E+00	0.00E+00	10/05/1995 11:17
17	3.29E+03	8.71E-01	2.97E+01	2.09E-05	1.90E+03	1.53E+01	1.00E-01	0.00E+00	0.00E+00	10/05/1995 11:17
18	3.45E+03	8.74E-01	2.98E+01	2.16E-05	1.88E+03	1.52E+01	9.96E-02	0.00E+00	0.00E+00	10/05/1995 11:17
19	3.59E+03	8.76E-01	3.00E+01	2.02E-05	1.87E+03	1.51E+01	1.00E-01	0.00E+00	0.00E+00	10/05/1995 11:17
20	3.72E+03	8.79E-01	3.01E+01	2.03E-05	1.85E+03	1.50E+01	1.00E-01	0.00E+00	0.00E+00	10/05/1995 11:18
21	3.88E+03	8.83E-01	3.02E+01	2.04E-05	1.84E+03	1.50E+01	9.96E-02	0.00E+00	0.00E+00	10/05/1995 11:18
22	4.05E+03	8.86E-01	3.04E+01	1.99E-05	1.82E+03	1.49E+01	1.00E-01	0.00E+00	0.00E+00	10/05/1995 11:18
23	4.20E+03	8.88E-01	3.06E+01	1.95E-05	1.80E+03	1.48E+01	1.01E-01	0.00E+00	0.00E+00	10/05/1995 11:19
24	4.39E+03	8.92E-01	3.06E+01	1.93E-05	1.79E+03	1.47E+01	1.00E-01	0.00E+00	0.00E+00	10/05/1995 11:19
25	4.57E+03	8.94E-01	3.08E+01	1.87E-05	1.77E+03	1.46E+01	1.00E-01	0.00E+00	0.00E+00	10/05/1995 11:19
26	4.70E+03	8.97E-01	3.09E+01	2.16E-05	1.76E+03	1.45E+01	1.01E-01	0.00E+00	0.00E+00	10/05/1995 11:19
27	4.88E+03	9.00E-01	3.10E+01	1.60E-05	1.74E+03	1.44E+01	1.01E-01	0.00E+00	0.00E+00	10/05/1995 11:20
28	5.04E+03	9.03E-01	3.12E+01	1.34E-05	1.73E+03	1.44E+01	1.00E-01	0.00E+00	0.00E+00	10/05/1995 11:20
29	5.25E+03	9.06E-01	3.13E+01	2.03E-05	1.71E+03	1.43E+01	1.00E-01	0.00E+00	0.00E+00	10/05/1995 11:20
30	5.42E+03	9.09E-01	3.15E+01	2.11E-05	1.69E+03	1.42E+01	1.02E-01	0.00E+00	0.00E+00	10/05/1995 11:21
31	5.61E+03	9.12E-01	3.16E+01	1.98E-05	1.68E+03	1.41E+01	1.01E-01	0.00E+00	0.00E+00	10/05/1995 11:21
32	5.76E+03	9.14E-01	3.17E+01	1.66E-05	1.66E+03	1.40E+01	1.00E-01	0.00E+00	0.00E+00	10/05/1995 11:21
33	5.98E+03	9.17E-01	3.19E+01	1.43E-05	1.65E+03	1.39E+01	9.98E-02	0.00E+00	0.00E+00	10/05/1995 11:21
34	6.11E+03	9.20E-01	3.20E+01	1.53E-05	1.64E+03	1.39E+01	1.00E-01	0.00E+00	0.00E+00	10/05/1995 11:22