

CAPITOLUL 11

LEGI DE PROPAGARE A FISURII DE OBOSEALĂ

11.1. Introducere

11.2. Modelarea inițierii fisurii prin oboseală

11.3. Modelarea propagării fisurii prin oboseală

11.4. Influența închiderii și deschiderii fisurii asupra vitezei de propagare a fisurilor de oboseală

11.5. Intârzierea la propagarea fisurii

11.6. Metode de predicție a durabilității la solicitări cu amplitudine variabilă

11.1. Introducere

Așa cum s-a menționat în capitolul anterior, procesului de degradare la oboseală îi sunt caracteristice trei etape distincte în care se manifestă mecanisme diferite. Aceste etape sunt: inițierea fisurii de oboseală, propagarea acesteia și ruperea finală. Cele trei etape pot fi evidențiate prin durabilitățile lor specifice pe o curbă Wöhler, *figura 11.1*.

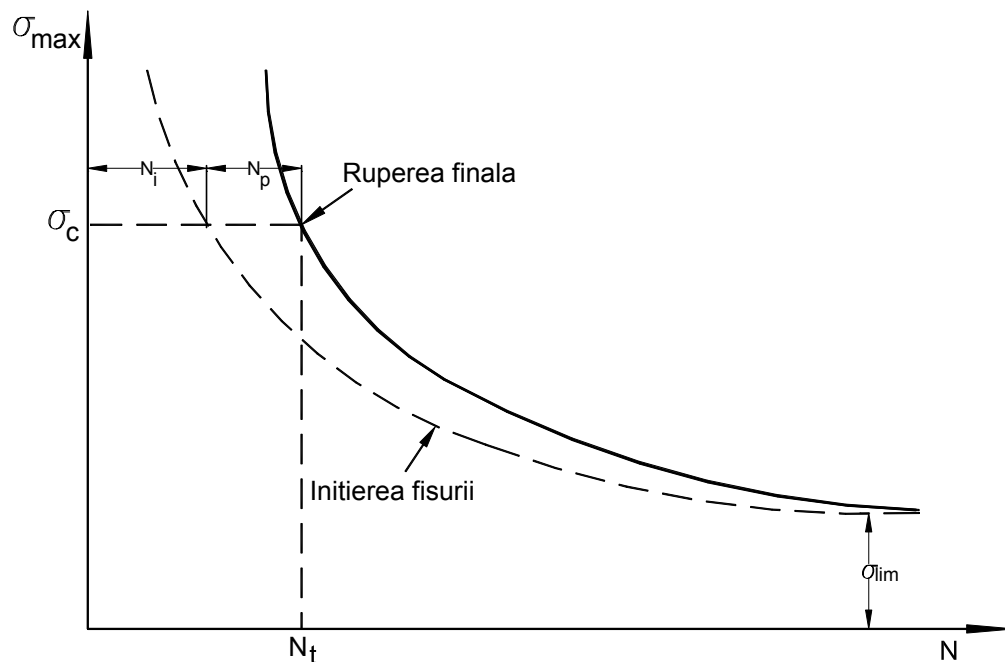


Fig. 11.1. Etapele fisurării prin oboseală

Pentru o anumită tensiune maximă, numărul de cicluri necesar perioadei de inițiere este notat cu N_i iar cel necesar propagării acesteia cu N_p . Durabilitatea totală va fi:

$$N_t = N_i + N_p$$

Se acceptă în general că numărul de cicluri necesar inițierii fisurii este acela pentru care fisura atinge lungimea de aproximativ 0,1 mm. Această lungime a fisurii se află în limitele de detectabilitate cu mijloace moderne nedistructive și este comparabilă cu dimensiunile unor defecte des întâlnite în materiale.

11.2. Modelarea inițierii fisurii prin oboseală

După cum s-a amintit în capitolul anterior, chiar dacă tensiunile nominale sunt cu mult mai mici decât limita de elasticitate a materialului, ca urmare a solicitărilor ciclice, local, datorită efectului de concentrare a tensiunilor în jurul unor defecte, tensiunile pot depăși limita de curgere. În asemenea zone apar deformații plastice în volume limitate de material unde se inițiază fisurile de oboseală. În *figura 10.7* se prezintă mecanismul de inițiere a fisurilor în lungul planelor de alunecare preferențiale. În vecinătatea unei astfel de creștături formate prin alunecare, tensiunile stabilite de Creager și Paris [222] sunt date de expresiile:

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right) - \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \frac{\rho}{2r} \cos \frac{3\theta}{2} \\ \sigma_y &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right) + \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \frac{\rho}{2r} \cos \frac{3\theta}{2} \\ \tau_{xy} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} - \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \frac{\rho}{2r} \sin \frac{3\theta}{2}\end{aligned}\quad (11.1)$$

în care ρ este raza la vârful creștăturii astfel formate. Coordonatele r și θ precum și tensiunile care acționează pe un element de suprafață sunt prezentate în *figura 11.2*.

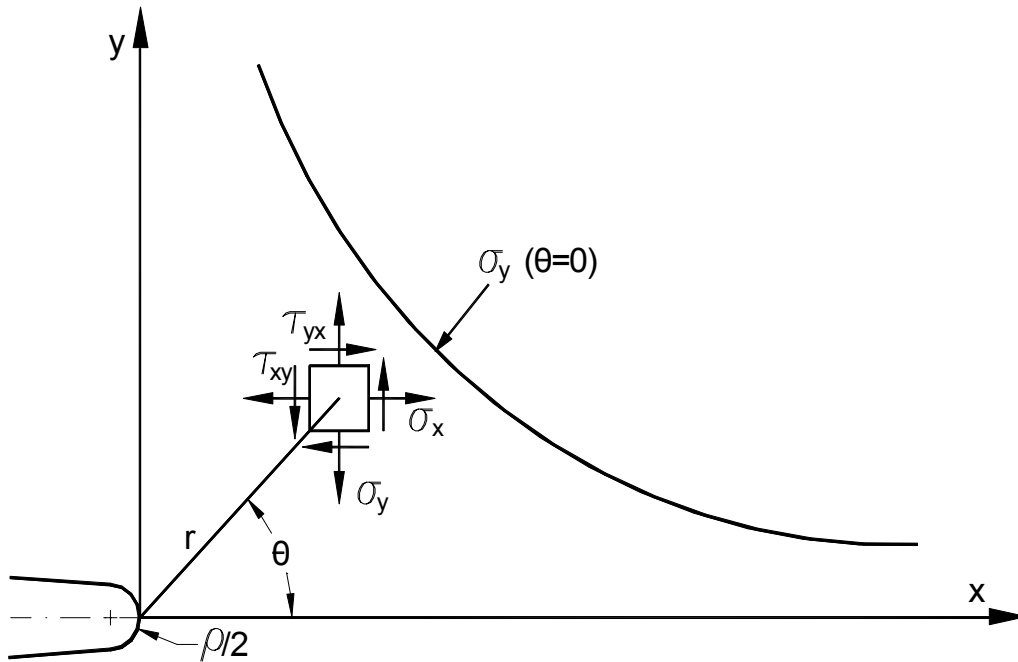


Fig.11.2. Variația tensiunii σ_y în imediata vecinătate a vârfului fisurii

În relațiile (11.1), K_I reprezintă factorul de intensitate a tensiunii existent la vârful unei fisuri având aceeași lungime cu creștătura considerată pentru *modul I* de solicitare. Tensiunea care produce solicitarea în *modul I*, σ_y , atinge valoarea maximă pentru $\theta=0$ și $r=\rho/2$ când devine:

$$\sigma_{\max} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{K_I}{\sqrt{\rho}} \quad (11.2)$$

Relația de mai sus arată faptul că, un parametru prin care se poate aprecia inițierea unei fisuri de oboseală poate fi raportul $\frac{K_I}{\sqrt{\rho}}$. Barteley consideră că există o valoare critică a acestui raport, respectiv $\left(\frac{K_I}{\sqrt{\rho}}\right)_c$ sub care *nu se poate iniția nici o fisură* dintr-o creștătură sau un defect dat [69]. În *tabelul 11.1* sunt indicate, după Barteley, valorile critice ale raportului $\frac{K_I}{\sqrt{\rho}}$ și domeniul de aplicabilitate.

Tab. 11.1

Relația	Domeniul de aplicabilitate
$\left(\frac{K_I}{\sqrt{\rho}}\right)_c = 0,9R_m$	480 MPa < R_m < 1080 MPa
$\left(\frac{K_I}{\sqrt{\rho}}\right)_c = 9,5R_e$	276 MPa < R_e < 965 MPa
$\left(\frac{K_I}{\sqrt{\rho}}\right)_c = \frac{206,9}{\lambda}$	R_e < 965 MPa

În expresiile de mai sus, R_m [MPa], R_e [MPa] și λ reprezintă rezistența la rupere, limita de elasticitate, respectiv coeficientul de ecrusare a materialului. În acest context, se pune problema stabilirii numărului de cicluri N_i necesar inițierii fisurii de oboseală. Acest număr de cicluri este dificil de stabilit întrucât nu există o delimitare clară a unei granițe între stadiul de inițiere și cel de propagare a unei fisuri de oboseală. Există, totuși, anumite relații de calcul, mai mult sau mai puțin empirice, pe baza cărora se pot calcula numărul de cicluri necesar inițierii fisurii.

O astfel de relație se bazează pe amplitudinea deformațiilor locale, în zona de inițiere:

$$\log N_i = C^* + D \log \sqrt{E \sigma_{\max} \varepsilon_{\max}} \quad (11.3)$$

în care:

- C^* și D sunt constante de material;
- E reprezintă modulul de elasticitate longitudinal;
- σ_{\max} este tensiunea maximă la vârful creștăturii;
- ε_{\max} este amplitudinea deformației locale pe direcția de sollicitare.

O altă metodă, care utilizează coeficientul lui Neuber [196], a fost aplicată pentru o fisură cu $\rho=2$ mm în cazul unui oțel cu 0,2% carbon. Numărul de cicluri N_i necesar ca o fisură să atingă lungimea de 0,1 mm rezultă din relația;

$$\log k_N = 1,2969 - 0,1602 \log N_i \quad (11.4)$$

unde k_N este coeficientul lui Neuber definit prin relația:

$$k_N = 1 + \frac{\alpha_t - 1}{1 + \sqrt{\frac{q}{\rho}}} \quad (11.5)$$

în care:

- ρ – raza la baza creștăturii;
- α_t – coeficientul teoretic de concentrare a tensiunilor;
- q – constantă de material, egală cu 0,32 pentru un oțel moale.

Metodele cele mai recente au la bază utilizarea factorului de intensitate a tensiunii ca parametru în aprecierea numărului de cicluri necesar inițierii fisurii de oboseală. Astfel, pentru o placă dintr-un oțel moale cu lățimea $d=20$ mm și grosimea de 5 mm, prevăzută cu o fisură ascuțită ($\rho < 0,2$ mm), numărul de cicluri N_i necesar inițierii unei fisuri de 0,1 mm este:

$$N_i = \frac{2,9 \cdot 10^8}{(\Delta K)^4} \quad (11.6)$$

unde ΔK reprezintă variația factorului de intensitate a tensiunii, exprimat în $MPa\sqrt{m}$.

Analizând aceste relații, este evident faptul că sunt omiși o serie de parametri care intervin în această etapă și care urmează să fie luați în considerare pe măsura utilizării intensive a tehnicilor bazate pe microscopia electronică.

11.3. Modelarea propagării fisurii prin oboseală

11.3.1. Considerații generale

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 11.3*.

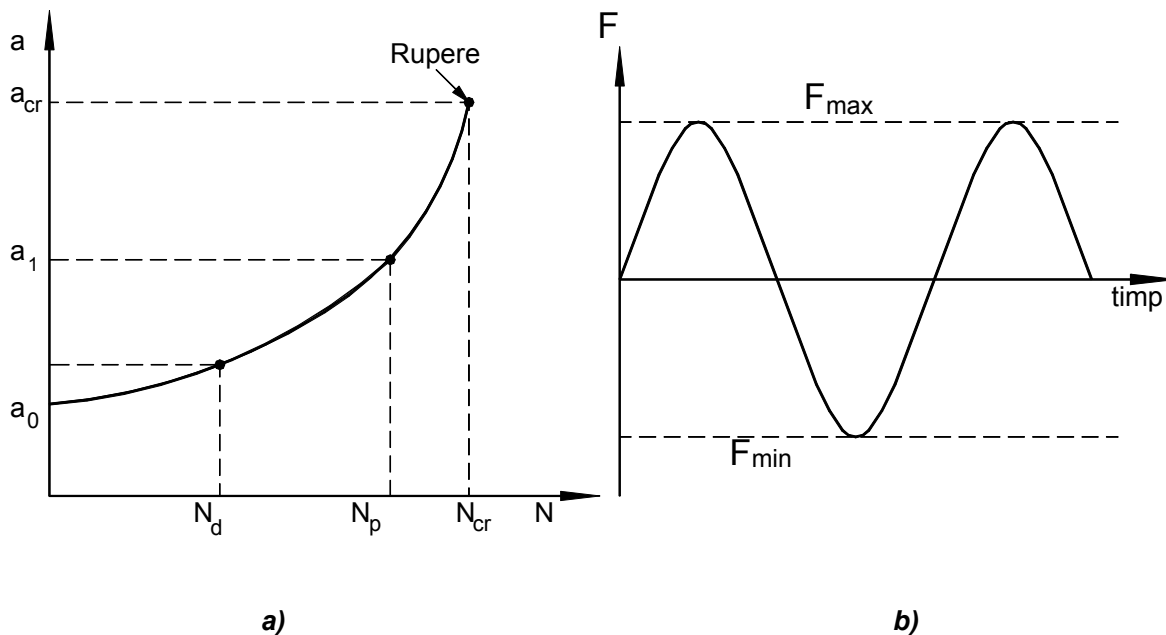


Fig. 11.3. Variația lungimii fisurii în timpul solicitării ciclice

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_{p1} , *figura 11.3a*. Din *figura 11.3* 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 11.4a*, sau pentru mai multe lungimi ale fisurii inițiale la același nivel al tensiunii maxime, *figura 11.4b*.

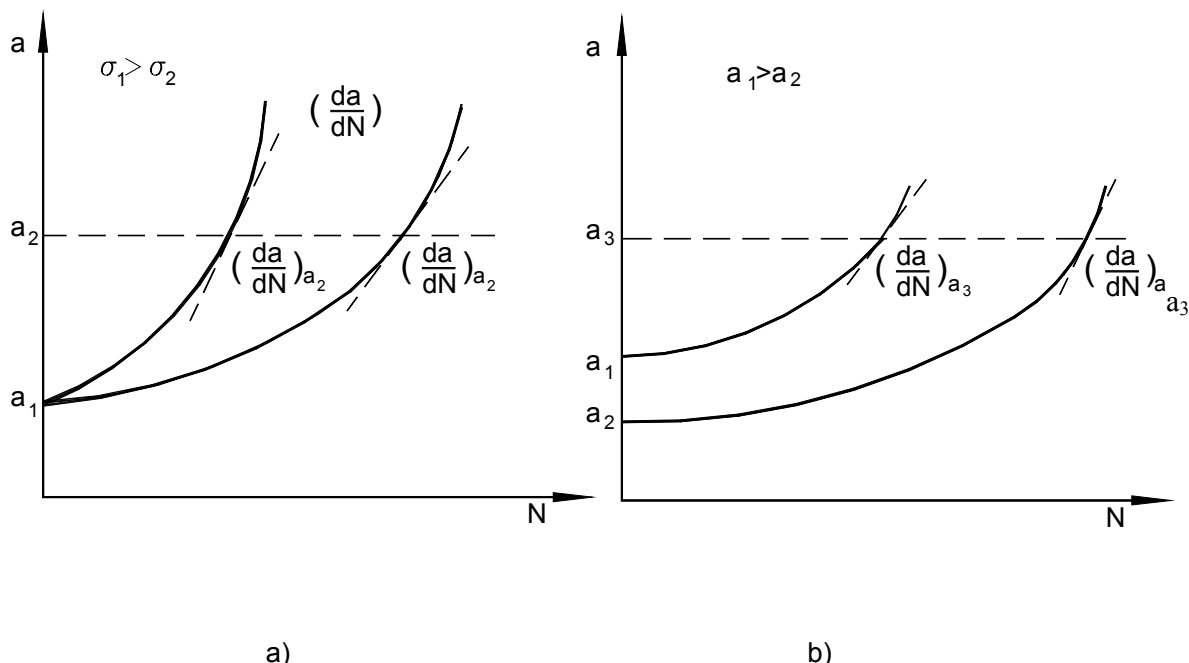


Fig. 11.4. Variația lungimii fisurii în timpul solicitării ciclice;

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 11.5*.

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 [184]. 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 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.

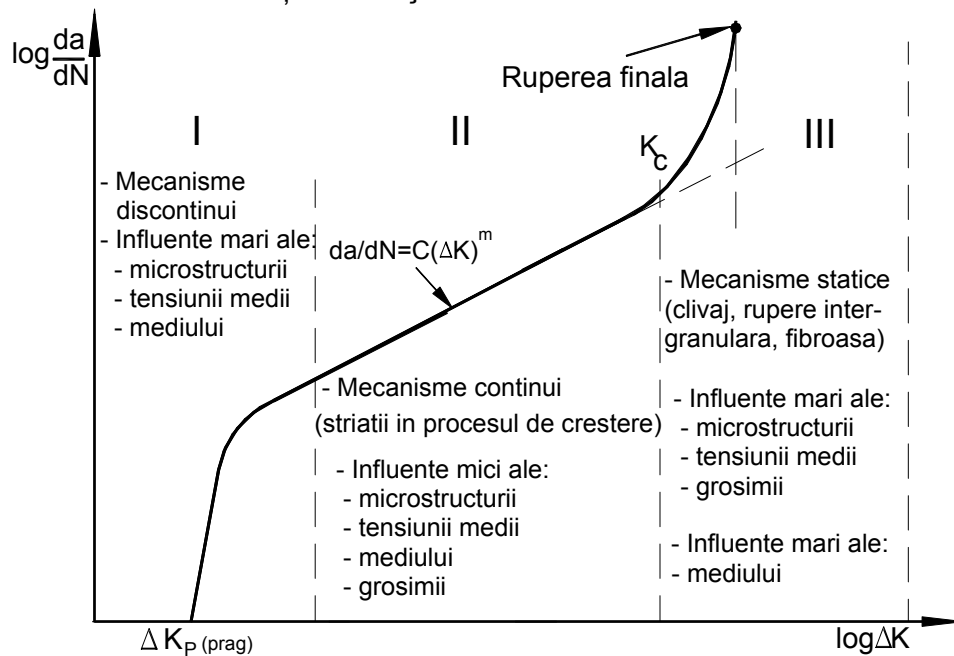


Fig. 11.5. Curba de variație pentru viteza de propagare a fisurii în raport cu variația factorului de intensitate a tensiunii

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_{Ic} 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.

11.3.2. 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 [61]. 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:

$$\frac{da}{dN} = C_1 \sigma^m a^n \quad (11.7)$$

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 (11.7) au mai obținut și Frost 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, relația (11.7) devine:

$$\frac{da}{dN} = C_1 K_I^3 \quad (11.8)$$

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 [65] 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:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^n \quad (11.9)$$

în care $\Delta K = K_{\max} - K_{\min} = K(\sigma_{\max}) - K(\sigma_{\min})$ 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 11.2* sunt prezentate câteva valori ale constantelor C și n după Barthelemy pentru unele oțeluri și aliaje.

Tab. 11.2

Materialul		C $\frac{m}{\text{ciclu}} (MPa\sqrt{m})^{-n}$	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 striții succesive, *figura 10.6a*, 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:

$$\frac{da}{dN} \approx \Delta\delta_t = \beta \frac{(\Delta K)^2}{\sigma_0' E_1} \quad (11.10)$$

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 (11.10) 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 (11.10) 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, 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:

$$\int_0^N 4 \left(\frac{\bar{\gamma}_m^p}{\gamma_r^p} \right)^k dN = 1 \quad (11.11)$$

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 cumulara 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 [245], 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:

$$\frac{da}{dN} = \frac{4\sigma}{U_c} \int_0^{r_c} \Delta u_y(x,0) dx \quad (11.12)$$

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 (11.12) devine:

$$\frac{da}{dN} = \frac{5\pi(1-\nu^2)\sigma_c \varepsilon_c}{96U_c} \left(\frac{\Delta K}{\sigma_c} \right)^4 \quad (11.13)$$

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.

11.3.3. 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 11.5*. 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 11.5*, se exprimă cu ajutorul *relației (11.9)* 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 11.5*, Donahue a propus relația:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K - \Delta K_p)^n \quad (11.14)$$

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

$$\Delta K_p = (1-R)^\gamma \Delta K_{p0}$$

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

$$\frac{da}{dN} = \frac{C(\Delta K)^n}{(1-R)K_c - \Delta K} \quad (11.15)$$

în care C și n sunt constante de material. Relația (11.15) se obține din relația (11.9) 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 (11.15) se face substituția $\Delta K = (1-R)K_{\max}$. Astfel, va rezulta:

$$\frac{da}{dN} = C(1-R)^{n-1} \left(\frac{K_{\max}^n}{K_c - K_{\max}} \right) \quad (11.16)$$

La valori mari ale variației ΔK , în cazul materialelor ductile, dimensiunile zonei plastice devin însemnate iar ipotezele Mecanicii Ruperii 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:

$$\frac{da}{dN} = C \frac{\Delta K^n}{(1-R)^r} \quad (11.17)$$

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:

$$\frac{da}{dN} = C \frac{\Delta K^4}{K_c^2 - K_{\max}^2} \quad (11.18)$$

Relația (11.18) a fost ulterior perfecționată astfel încât să poată fi aplicată și la materiale cu ecrisare. Astfel:

$$\frac{da}{dN} = C \frac{\Delta K^4}{G\sigma_c^2 U_c} \quad (11.19)$$

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:

$$\frac{da}{dN} = \frac{\Delta K^2}{4\pi\sigma_c E} \left(\frac{\Delta K - \Delta K_p}{K_{Ic} - \frac{\Delta K}{1-R}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (11.19)$$

Forman a propus o relație generală de forma:

$$\frac{da}{dN} = C \left(\frac{K_{\max} \frac{1-R}{1-nR} - \Delta K_p}{K_c - K_{\max}} \right)^{n_1} \quad (11.20)$$

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

O altă relație care descrie curba din *figura 11.5.* a fost prezentată de *Erdogan* și *Ratwani* și are expresia:

$$\frac{da}{dN} = \frac{C(1+\beta)^n \Delta K^{n_1} (\Delta K - \Delta K_p)^{n_1}}{K_c - (1+\beta)\Delta K} \quad (11.21)$$

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 $(\Delta K - \Delta K_p)^{n_1}$ ia în considerație datele experimentale la nivele coborâte ale tensiunilor și ține seama de existența pragului de propagare. Alegând în mod corespunzător constantele, relația (11.21) 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 (11.17) 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:

$$\frac{da}{dN} = C' \frac{(1-R)^m \left[\frac{\Delta K - \Delta K_p}{K_0} \right]^p \left(\frac{\Delta K}{K_0} \right)^{n_1}}{(1-R)^q \left[1 - \frac{K_{\max}}{K_c} \right]^q} \quad (11.22)$$

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:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta J)^m \quad (11.23)$$

care are aceeași structură ca și legea lui Paris.

11.4. Influența închiderii și deschiderii fisurii asupra vitezei de propagare a fisurilor de oboseală

Atunci când se analizează durabilitatea la solicitări variabile trebuie să se ia în considerare închiderea respectiv deschiderea fisurii în cursul alternanței tensiunilor din cadrul spectrului de solicitare. Atât la materialele ductile cât și la cele fragile, condițiile de propagare a fisurii sunt determinate de: variația factorului de intensitate a tensiunii ΔK produsă de solicitare, coeficientul de asimetrie a ciclului R și valoarea maximă a factorului de intensitate a tensiunii, K_{\max} . Sunt situații în care valoarea maximă a factorului de intensitate a tensiunii de la vârful fisurii, numită valoare locală sau efectivă, este diferită de valoarea nominală, dată de solicitare. Aceste diferențe se pot datora următoarelor cauze:

1. închiderea prematură a flancurilor fisurii chiar în prezența unor tensiuni de tracțiune;
2. modificarea permanentă a traseului de propagare a fisurii, atât datorită influenței microstructurii cât și stării locale de tensiune;
3. micșorarea, în zona vârfului fisurii, a efectelor tensiunilor remanente ce apar în interiorul zonelor plastice produse de solicitări ciclice, sau apariția unor transformări de fază în structura intimă a materialului;
4. la propagarea fisurii este posibil ca în anumite locuri legătura dintre flancurile fisurii să nu se distrugă datorită existenței unor particule, elementelor de aliare sau fazelor secundare.

Datorită acestor fenomene, viteza reală de propagare a fisurii la oboseală se micșorează, chiar dacă proprietățile de rupere globale ale materialului nu se modifică.

Micșorarea vitezei de propagare a fisurii de oboseală poate fi explicată cu ajutorul unui mecanism fizic cunoscut sub numele de închiderea fisurii, *figura 11.6*. Se consideră că fisura se deschide și se închide în timpul ciclului de solicitare, ea fiind închisă atunci când sarcina aplicată este nulă. Elber a constatat că, în timpul solicitării cu cicluri de amplitudine constantă, fisura este închisă chiar dacă există sarcini aplicate și că ea nu se deschide decât atunci când tensiunile de închidere aplicate depășesc o anumită valoare. Când tensiunea atinge valoarea maximă, corespunzătoare punctului A, *figura 11.6a*, fisura se deschide iar starea de tensiune este cea indicată în *figura 11.6c*. În această situație, la vârful fisurii predomină o stare de solicitare caracterizată prin tensiuni de tracțiune. La descărcare, atunci când tensiunea atinge valoarea minimă, (punctul C), datorită caracterului reversibil al deformațiilor elastice, enclava plastică de la vârful fisurii este supusă la compresiune de către materialul solicitat elastic din zona adiacentă, *figura 11.6d*. Ca urmare a acestui fapt, fisura se închide total sau parțial. În cadrul unui ciclu de solicitare există o tensiune de închidere σ_{inc} de la care fisura începe să se închidă. Deschiderea fisurii se produce aproximativ la același nivel al tensiunilor, σ_{desc} , la care s-a produs închiderea. Dacă se consideră ciclul pulsant din *figura 11.6a*, se poate considera că începând din punctul B fisura începe să se închidă, în punctul C fiind închisă total sau parțial. Începând cu punctul D fisura se redeschide.

Mecanismul ce cauzează închiderea fisurii poate fi explicat cu ajutorul zonei plastice care înconjoară vârful fisurii, ale cărei dimensiuni cresc proporțional cu valorile tensiunii aplicate, *figura 11.7*. Odată cu creșterea fisurii, în urma frontului acesteia rămâne pe fiecare din fețele fisurii, un înveliș de material deformat plastic în care există deformații remanente de tracțiune. La descărcare, deformațiile remanente produc intrarea în contact a fețelor fisurii, chiar dacă solicitarea este de tracțiune.

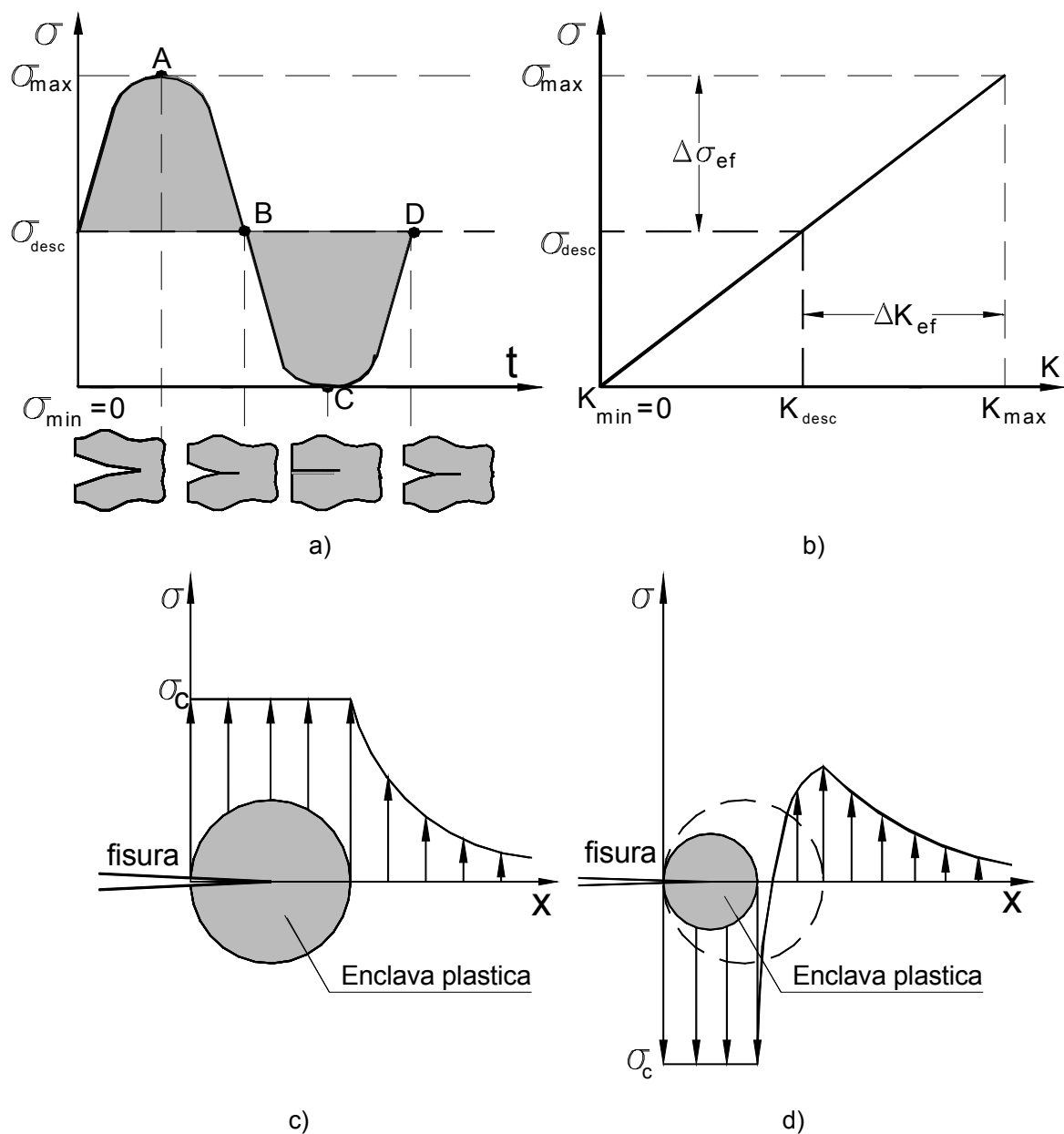


Fig. 11.6. Inchiderea și deschiderea fisurii

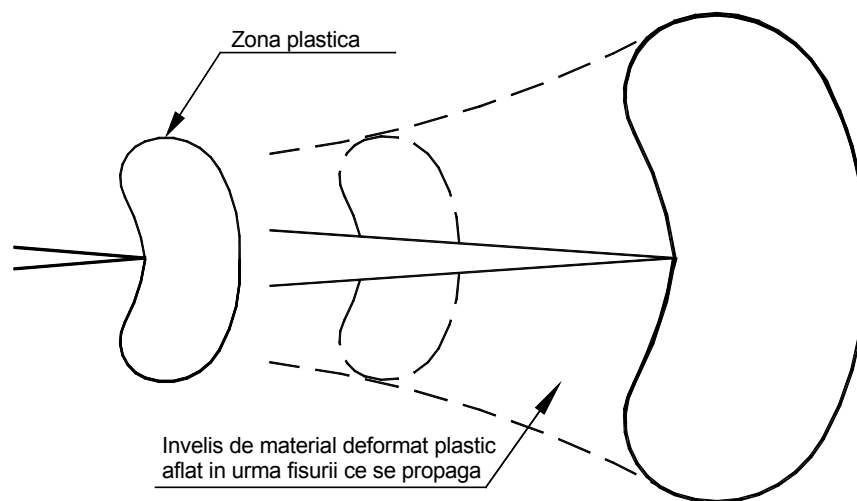


Fig. 11.7. Zona plastică la înaintarea fisurii

Ca urmare, închiderea fisurii se datorează plasticității induse, fenomen produs de următorii factori:

- straturile corozive formate pe flancurile fisurii;
- închiderea microscopică a fisurii datorită asperităților suprafețelor de rupere;
- închiderea datorită fluidelor vâscoase ce pătrund în interiorul fisurii;
- transformarea locală a fazelor materialului datorită efectelor tensiunii și deformației specifice.

Deși conceptele legate de închiderea fisurii au fost inițial formulate pe baza observațiilor făcute pentru metale, dezvoltarea materialelor nemetalice și a compozitelor au permis identificarea altor mecanisme de închidere cum ar fi cele legate de modificarea traseului de propagare la întâlnirea unor obstacole date de elementele componente și păstrarea legăturii dintre flancurile fisurii prin intermediul unor fibre sau particule nerupte. Elber a arătat că, fisura se poate propaga numai în acea parte a ciclului de solicitare în care flancurile fisurii sunt separate. Dacă în timpul solicitării tensiunea variază între σ_{\max} și σ_{\min} (ambele pozitive) și dacă se notează cu σ_{desc} valoarea tensiunii în care fisura s-a deschis complet, atunci porțiunea din ciclu în care tensiunile sunt mai mici decât această valoare nu contribuie la propagarea fisurii. Ca urmare, este necesară definirea unei variații efective a tensiunii $\Delta\sigma_{\text{ef}}$ și a factorului de intensitate corespunzător ΔK_{ef} , figura 11.6b. Așadar, vom avea:

$$\Delta\sigma_{\text{ef}} = \sigma_{\max} - \sigma_{\text{desc}} = Q\Delta\sigma, \quad \Delta K_{\text{ef}} = K_{\max} - K_{\text{desc}} = Q\Delta K \quad (11.124)$$

în care Q reprezintă coeficientul efectiv al factorului de intensitate, definit de relația:

$$Q = \frac{\Delta K_{\text{ef}}}{\Delta K} = \frac{K_{\max} - K_{\text{desc}}}{K_{\max} - K_{\min}} \quad (11.25)$$

Valoarea parametrului K_{desc} variază de la un material la altul și în funcție de solicitare. Pentru calculul vitezei de propagare a fisurii, Elber a propus o relație de tip Paris, modificată, de forma:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K_{\text{ef}})^m = C(Q\Delta K)^m \quad (11.26)$$

în care Q este definit de relația (11.25) dacă $K_{\min} < K_{\text{desc}}$ sau $Q=1$ pentru $K_{\min} \geq K_{\text{desc}}$ caz în care închiderea fisurii nu influențează rezultatele. În acest caz legea lui Paris rămâne nemodificată. Rescriind relația (11.25) în funcție de ΔK și R, se obține:

$$Q = \frac{1}{1-R} - \frac{K_{\text{desc}}}{\Delta K} \quad (11.27)$$

Valoarea de prag a factorului de intensitate a tensiunii pentru care fisura nu se propagă, poate fi obținută din această relație prin anularea coeficientului efectiv al factorului de intensitate. Pentru $Q=0$ rezultă:

$$\Delta K_p = K_{\text{desc}}(1-R) \quad (11.28)$$

Relația (11.27) este aplicabilă numai atunci când valorile ΔK se află în intervalul:

$$K_{\text{desc}}(1-R) \leq \Delta K \leq K_{\text{desc}}\left(\frac{1}{R} - 1\right)$$

Elber a arătat că, pentru plăcile confecționate din aliaje de aluminiu aflate în stare plană de tensiune, dacă ΔK este cuprins între 13 și 40 $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$, la frecvențe ale sarcinilor variabile cuprinse între 1 Hz și 30 Hz și pentru valori ale coeficientului de asimetrie R situate între -0,1 și 0,7, este valabilă relația:

$$\frac{K_{\text{desc}}}{K_{\max}} = 0,5 + 0,1R + 0,4R^2 \quad (11.29)$$

Se admite faptul că Q este influențat nu numai de coeficientul de asimetrie R ci și de geometria epruvetei, tipul stării de tensiune, variația factorului de intensitate a tensiunii și condițiile de mediu. Conceptul de variație efectivă a factorului de intensitate a tensiunii la închiderea fisurii este de un real folos în explicarea efectului produs de tensiunea medie (coeficientul R) asupra creșterii fisurii. Așa cum se arată în *figura 11.8*, K_{desc} crește odată cu creșterea coeficientului de asimetrie însă, K_{ef} crește mai mult. La aceeași variație ΔK produsă de sarcinile aplicate, creșterea ΔK_{ef} odată cu R conduce la mărirea vitezei de propagare a fisurii.

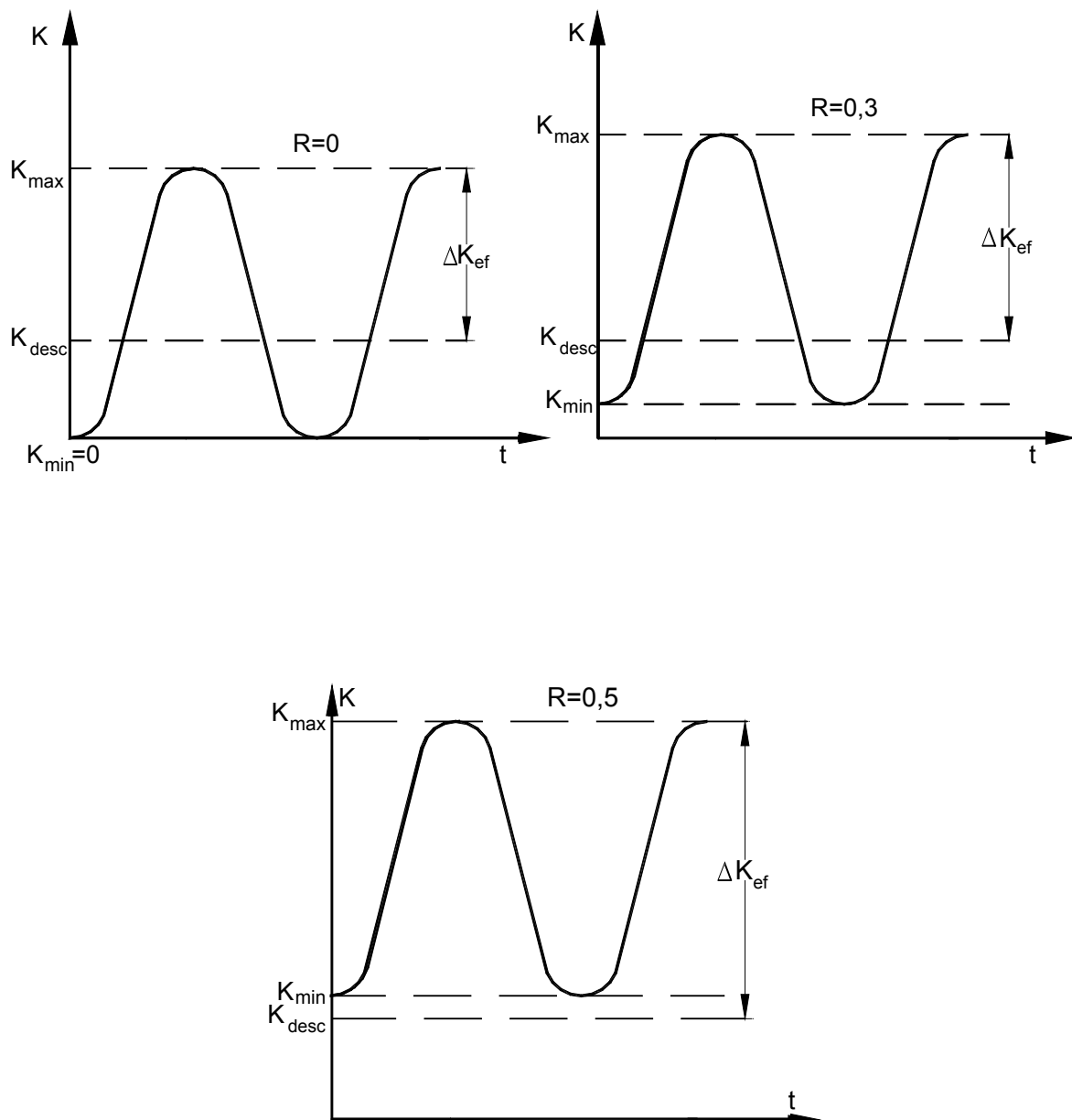


Fig. 11.8. Variația factorului de intensitate pentru diferite valori ale coeficientului R

Inchiderea fisurii conduce la reducerea vitezei de propagare și confirmă utilitatea introducerii noțiunii de prag de propagare. La estimarea efectelor închiderii fisurii pot fi utilizate următoarele ipoteze simplificatoare:

- valoarea factorului de intensitate la care are loc oprirea propagării fisurii, K_{desc} , reprezintă o constantă de material; ea este independentă de K_{min} , K_{max} și de solicitarea anterioară;
- nu există o variație de prag a factorului de intensitate a tensiunii ΔK_p , care să reprezinte o constantă de material; *relațiile (11.24)* sunt valabile atât timp cât $\Delta K_{ef} > 0$.

Deși fenomenul de închidere a fisurii influențează valoarea de prag K_p , acesta nu reprezintă singura cauză ce conduce la existența pragului de propagare. Se poate considera că parametrul ΔK_p are două componente, una intrinsecă notată cu $\Delta K_{p(i)}$ și una extrinsecă notată cu $\Delta K_{p(e)}$ și dată de fenomenul de închidere a fisurii:

$$\Delta K_p = \Delta K_{p(i)} + \Delta K_{p(e)} \quad (11.30)$$

Observații experimentale au arătat că la deschiderea fisurii prin oboseală este evidentă prezența *modului II* de solicitare (deschidere a fisurii) și a contactului dintre asperitățile flancului fisurii. În zona pragului de propagare și la valori mici ale coeficientului de asimetrie R , deplasarea maximă de deschidere la vârful fisurii este de ordinul fracțiunilor de micrometru iar asperitățile pot fi chiar de zeci de micrometri, argumente ce pot demonstra posibila închidere a fisurii. Viteza de creștere a fisurii depinde de raportul dK/da , ca urmare, pentru valori K_{min} și K_{max} date este important să se cunoască dacă valorile factorului de intensitate a tensiunii cresc sau scad. Această observație conduce la ideea că valoarea K_p depinde de solicitările anterioare.

Încercările de a determina efectul închiderii fisurii asupra comportării la oboseală întâmpină o serie de dificultăți, cum sunt:

- închiderea fisurii este influențată de microstructura materialului, condițiile de mediu, starea de tensiune, dimensiunile și geometria epruvetei, lungimea fisurii, istoricul solicitărilor anterioare;
- modificările de natură microstructurală ale direcției de propagare a fisurii date de neomogenități, impurități sau frontiera dintre grăunți conduc la modificări substanțiale ale vitezei de propagare, în special în apropierea pragului de propagare;
- închiderea fisurii este un fenomen incompatibil cu criteriile de similitudine folosite de obicei în Mecanica ruperii; ca urmare, în același material și la aceeași valoare a variației ΔK se pot produce închideri diferite ale fisurii, în funcție de valorile K_{min} și K_{max} și de lungimea fisurii;
- metodele globale de măsurare a închiderii fisurii (metoda complianței sau metodele ce folosesc emisia acustică ori modificarea potențialului electric) nu pot face distincție între diferitele mecanisme de închidere a fisurii, pentru că acestea influențează în același timp și viteza de propagare a fisurii, prin urmare afectează în mod direct răspunsul global al probei.

11.5. Întârzierea la propagarea fisurii

S-a constatat experimental că aplicarea unor suprasarcini de tracțiune are ca efect micșorarea vitezei de creștere a fisurii, *figura 11.9*. Acest fenomen poartă numele de *întârzierea la propagarea fisurii*.

Întârzierea crește odată cu raportul dintre amplitudinea suprasarcinii de întindere și amplitudinea ciclului de solicitare normal (de amplitudine constantă). Dacă acest raport este suficient de mare, fisura se poate opri din propagare. Tendința de întârziere

se accentuează atunci când se aplică periodic mai multe suprasarcini consecutive. Această tendință nu conduce neapărat la creșterea duratei de viață. Dacă ciclul care urmează după supraîncărcare are $R > 0$, întârzierea se diminuează odată cu creșterea coeficientului R . Întârzierea este mai pronunțată la secțiunile subțiri și mai redusă la cele groase sau la aliajele cu limită de curgere ridicată. Dacă supraîncărcarea de scurtă durată produce întârzierea fisurii, subîncărcarea tinde să o accelereze. Același efect îl are și supraîncărcarea cu sarcini de compresiune; efectul însă este mai mic decât cel produs de suprasarcina de întindere cu aceeași mărime.

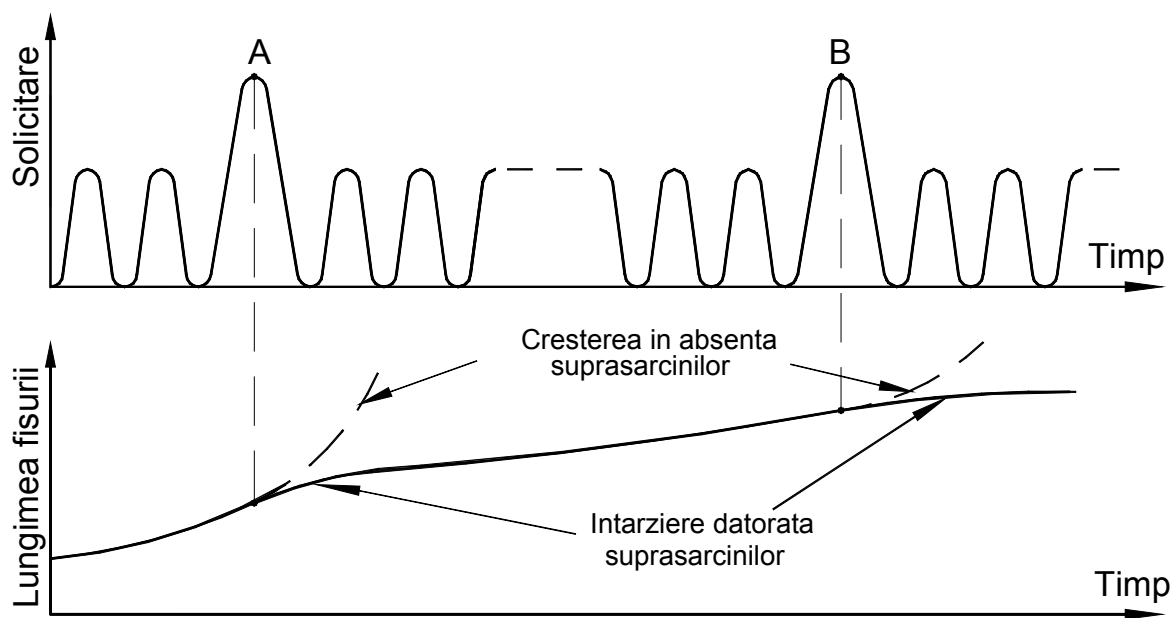


Fig. 11.9. Efectul suprasarcinilor de tracțiune asupra propagării fisurii

Conceptul de închidere a fisurii poate fi folosit la evaluarea întârzierii propagării fisurii produsă de suprasarcinile de întindere sau a accelerării acesteia, dată de suprasarcinile de compresiune. În acest sens se prezintă exemplul din *figura 11.10*. După ce amplitudinea solicitării crește, urmează o perioadă de tranziție în care tensiunea la care se deschide fisura crește față de valoarea ei stabilă de dinainte de supraîncărcare; ulterior această tensiune atinge o valoare stabilă superioară. În perioada tranziției, ΔK_{ef} este temporar mai mare decât valoarea stabilizată de după tranziție, cauzând accelerarea creșterii fisurii. Când supraîncărcarea dispare, fenomenul se repetă în sens invers având ca rezultat întârzierea creșterii fisurii. Ca urmare, parametrul ΔK_{ef} poate fi utilizat la evaluarea propagării fisurii pentru orice tip de solicitare. Singurul inconvenient constă în faptul că metoda implică cunoașterea modului de variație a tensiunii de deschidere cu încărcarea, ceea ce implică efectuarea unei analize elasto-plastice ciclu cu ciclu, care necesită timp îndelungat și costuri mari.

În concordanță cu cele arătate anterior se pot face următoarele observații:

1. Valoarea tensiunii de deschidere din zonele de tranziție diferă sensibil de cea estimată pe cale teoretică. Ca urmare, la creșterea solicitării, ΔK_{ef} crește mai mult decât se estimează pe când la reducerea solicitării, datorită tensiunilor remanente, acest parametru crește puțin. Acest efect persistă atât timp cât extremitatea zonei plastice de la noul nivel de solicitare atinge marginea zonei plastice ce corespunde solicitării precedente.

2. Efectul de întârziere se produce chiar și atunci când există un singur ciclu de suprasolicitare, mai ales dacă acesta este numai de întindere. Tensiunile remanente de compresiune produse în zona vârfului fisurii tind să țină fisura închisă în timpul ciclurilor următoare, dacă acestea au o amplitudine mai mică. Dacă raportul dintre tensiunea maximă a suprasolicitării și cea de la nivelul de referință este mai mare de 2, fisura se poate opri din propagare. La un raport mai mic de 1,4 efectul ciclului de solicitare este foarte mic. Este clar că viteza de propagare a fisurii da/dN este modificată de istoricul solicitării prin intermediul unei amplitudini efective a factorului de intensitate a tensiunii ΔK_{ef} ce este influențată de tensiunile remanente, respectiv închiderea fisurii.

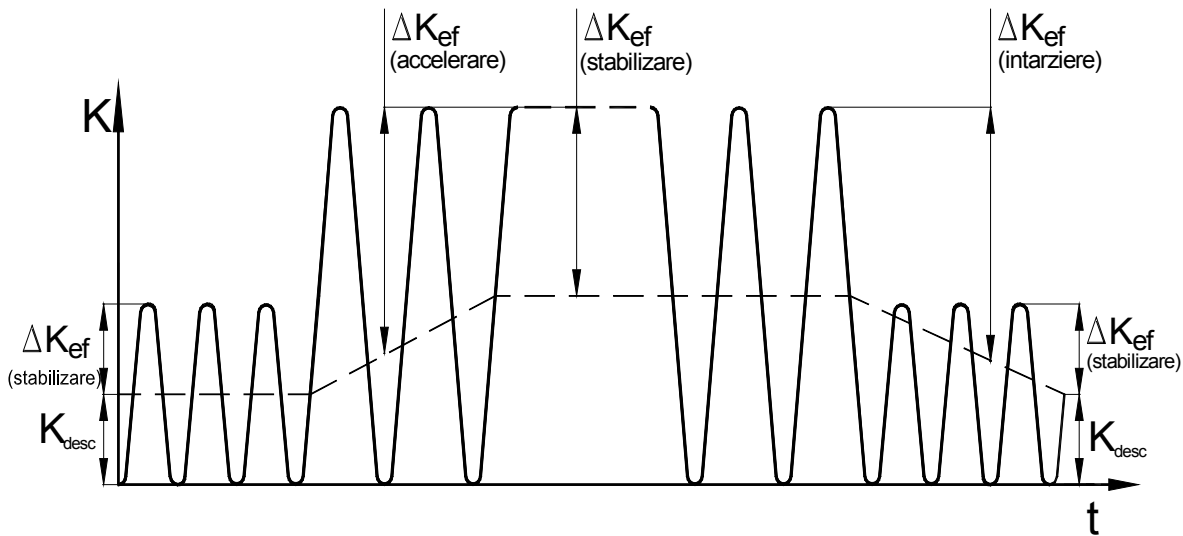


Fig. 11.10. Mod de evaluare a întârzierii la propagarea fisurii

Fenomenul de închidere a fisurii nu este singura cauză ce trebuie luată în considerare atunci când se studiază mecanismele de întârziere. La unele materiale fețele fisurii rămân "legate" prin intermediul particulelor de aliere, întârziind astfel propagarea fisurii. Prezența particulelor de aliere duce, de regulă, la închiderea fisurii prin micșorarea deplasării de deschidere efective și întărirea frontului fisurii, mărindu-se astfel rezistența la oboseală. Sunt însă studii care demonstrează că folosirea unor tehnologii de fabricație specifice, coroborată cu anumite dimensiuni și concentrații ale particulelor, favorizează atât separarea la interfață cât și ruperea particulelor, ducând la micșorarea rezistenței la oboseală a materialului.

11.6. Metode de predicție a durabilității la solicitări cu amplitudine variabilă

Dintre metodele cu largă aplicabilitate pentru determinarea duratei de viață la solicitări cu amplitudine variabilă se pot aminti:

- metode care iau în considerare factorul de intensitate a tensiunii;
- metode bazate pe analiza deformațiilor plastice la vârful fisurii, cunoscute sub numele de metodele din prima generație;
- metode bazate pe închiderea și deschiderea fisurii sau metodele din a doua generație.

11.6.1. Metodă bazată pe variația factorului de intensitate a tensiunii

Ewalds și Wanhil au propus o metodă aplicabilă în special la spectrele de bandă îngustă, care neglijează efectul de interacțiune al ciclurilor din cadrul spectrului de solicitare considerat. În principiu, această metodă constă din descompunerea unui spectru de bandă îngustă într-un spectru în trepte cu mai multe nivele de solicitare având amplitudini constante $\Delta\sigma_i$. Pentru asemenea trepte, caracterizate prin numărul de cicluri N_i , se calculează variația factorului de intensitate a tensiunii ΔK_i în funcție de lungimea fisurii. Se obține un factor de intensitate a tensiunii echivalent mediu, definit astfel:

$$\Delta K_{ech(m)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta K_i)^2 N_i}{\sum_{i=1}^n N_i}} \quad (11.31)$$

Atunci când spectrul de solicitare aleator tinde spre un spectru de solicitare cu amplitudine constantă avem $\Delta K_{ech(m)} = \Delta K$. Pentru unele tipuri de spectre de bandă îngustă s-a obținut o corelație, analog cu ecuația lui Paris:

$$\frac{da}{dN} = A(\Delta K_{ech(m)})^n \quad (11.32)$$

unde A și n sunt constante de material.

11.6.2. Modelul Wheeler

Modelul Wheeler stabilește o corelație între viteza de propagare a fisurii și dimensiunile zonelor plastice produse de suprasarcină și de sarcina curentă. Atunci când se aplică o suprasarcină, zona plastică își mărește dimensiunile. După aplicarea suprasarcinii se stabilește un câmp de tensiuni remanente de compresiune cu valori mai mari decât cele anterioare. Întrucât tensiunile remanente se scad din tensiunile aplicate, se produce o întârziere a creșterii fisurii. Când fisura depășește câmpul de tensiuni remanente, viteza de propagare a fisurii precum și tensiunile revin la valoarea de dinainte de aplicarea suprasarcinii. Wheeler a considerat o fisură care în momentul aplicării suprasarcinii are lungimea a_s , zona plastică produsă la vârful acesteia având diametrul:

$$2r_{ps} = C_1 \frac{\sigma_s^2 a_s}{\sigma_c^2} = C \frac{K_c^2}{\sigma_c^2} \quad (11.33)$$

În relația (11.33) s-a notat cu σ_s și K_s valorile maxime ale tensiunii și factorului de intensitate a tensiunii date de suprasarcină, *figura 11.11*.

După ce fisura s-a extins, când lungimea acesteia are valoarea a_i , diametrul zonei plastice devine:

$$2r_{pi} = C_1 \frac{\sigma_i^2 a_i}{\sigma_c^2} = C \frac{K_i^2}{\sigma_c^2} \quad (11.34)$$

în care σ_i este tensiunea maximă a ciclului de solicitare i . Se presupune că această zonă plastică este inclusă în cea produsă de suprasarcină astfel încât vârful fisurii se află la distanța λ de frontiera plastică.

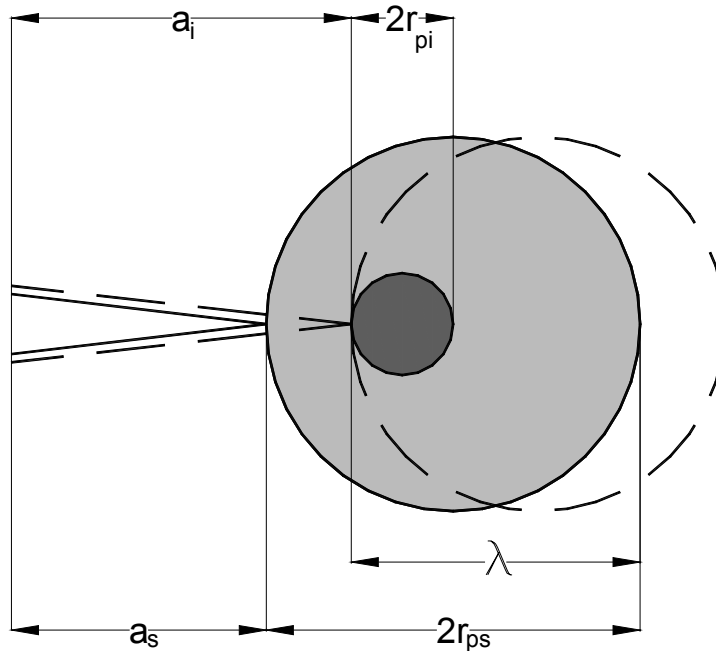


Fig. 11.11. Modelul Wheeler

Wheeler a introdus un factor de întârziere Φ și a presupus că acesta are forma:

$$\Phi = \left(\frac{2r_{pi}}{\lambda} \right)^n \quad (11.35)$$

în care $\lambda = a_s + 2r_{ps} - a_i$ iar n este un parametru empiric. În aceste condiții va rezulta relația:

$$\left(\frac{da}{dN} \right)_{\text{întârziere}} = \Phi \left(\frac{da}{dN} \right)_{\text{linear}} = \Phi f(\Delta K) \quad (11.36)$$

care este aplicabilă atât timp cât $a_i + 2r_{pi} < a_s + 2r_{ps}$. Când $a_i + 2r_{pi} \geq a_s + 2r_{ps}$ vârful fisurii trece dincolo de frontiera zonei plastice produse de suprasarcină și factorul de întârziere devine prin definiție $\Phi = 1$.

Modelul Wheeler, bazat pe utilizarea întârzierii de la un ciclu la altul, conduce la rezultate aflate în concordanță cu cele obținute experimental.

11.6.3. Metoda Willenbourg

Ca și la modelul prezentat mai înainte, Willenbourg consideră că enclava plastică produsă de suprasarcină se întinde până la cota:

$$a_p = a_s + 2r_{ps} = a_s + C \frac{K_s^2}{\sigma_c^2} \quad (11.37)$$

Această metodă își propune să determine valoarea maximă a factorului de intensitate a tensiunii necesar, $K_{\max, nec}$, pentru a produce la vârful fisurii de lungime a_i o zonă plastică ce se poate întinde până la frontiera enclavei plastice, figura 11.12.

Deoarece $a_i + 2r_{p, nec} = a_s + 2r_{ps}$ rezultă:

$$C \frac{K_{\max, nec}^2}{\sigma_c^2} = a_s + 2r_{ps} - a_i \quad (11.38)$$

Pentru o lungime oarecare a_i a fisurii, factorul de intensitate curent $K_{\max, i}$ reduce valoarea $K_{\max, nec}$:

$$K_{red} = K_{\max, nec} - K_{\max, i}$$

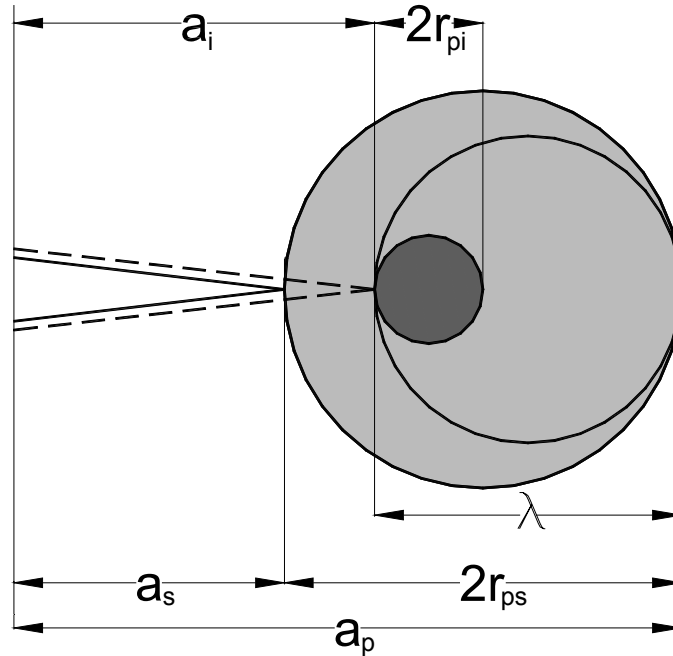


Fig. 11.12. Metoda Willenborg

Tensiunile remanente de compresiune induse de suprasarcină se scad din tensiunile active, produse la vârful fisurii de sarcinile aplicate. În consecință, valorile $K_{max,i}$ și $K_{min,i}$ produse de încărcare în timpul ciclului i , se micșorează cu cantitatea K_{red} . Ca urmare, valorile efective ale factorului de intensitate a tensiunilor au expresiile:

$$\begin{aligned} K_{max\,ef} &= K_{max\,i} - K_{red} = 2K_{max\,i} - K_{max\,nec} \\ K_{min\,ef} &= K_{min\,i} - K_{red} = 2K_{min\,i} - K_{min\,nec} \end{aligned} \quad (11.39)$$

și

$$R_{ef} = \frac{K_{min\,ef}}{K_{max\,ef}} \quad (11.40)$$

Atunci când $K_{min\,ef}$ sau atât $K_{min\,ef}$ cât și $K_{max\,ef}$ au valori negative, ele se consideră zero. După ce în prealabil s-au calculat valorile lui ΔK_{ef} și R_{ef} , viteza de propagare a fisurii da/dN poate fi calculată cu relația lui Forman, care, în funcție de valorile efective, devine:

$$\frac{da}{dN} = \frac{C(\Delta K_{ef})^n}{(1 - R_{ef})K_c - \Delta K_{ef}} \quad (11.41)$$

Cu toate că metoda Willenborg nu ține seama de efectele produse de suprasarcinile multiple și nici de încărcările negative, rezultatele obținute concordă cu cele determinate experimental.

În conformitate cu modelele Wheeler și Willenborg, întârzierea la propagarea fisurii se produce instantaneu sau fisura se oprește. Aceste modele nu iau în considerație o eventuală amânare a propagării, așa cum se constată pe baza determinărilor experimentale. Se poate constata experimental că întârzierea la propagare poate continua și după ce fisura a traversat zona de tensiuni remanente. În unele cazuri, suprasolicitățile de întindere produc o schimbare a traseului de propagare inițial al fisurii (în modul I) și duc chiar la bifurcarea acesteia, fenomen care este însoțit de micșorarea valorii efective ΔK_{ef} în raport cu valoarea ΔK corespunzătoare aceleiași lungimi a fisurii. Dacă schimbarea traseului de propagare se face de-a lungul unei

interfețe, este posibilă mai curând accelerarea și nu întârzierea procesului de propagare a fisurii. Uneori, suprasolicitarea de întindere poate duce la scăderea valorii ΔK_{ef} până aproape de pragul de propagare, favorizând apariția unor mecanisme suplimentare ce nu constituie cauza principală a întârzierii la propagare, dar care prelungesc întârzierea.

11.6.4. Metoda Elber

Această metodă face parte din categoria metodelor din a doua generație și ia în considerare, în procesul de întârziere a propagării fisurii, influența închiderii și deschiderii acesteia.

Principala problemă care apare în evaluarea durabilității aplicând metoda Elber constă în determinarea tensiunii corespunzătoare deschiderii fisurii $(\sigma_{desc})_i$ pentru fiecare ciclu din cadrul spectrului de solicitare cu amplitudine variabilă. Dacă aceste tensiuni sunt corect calculate atunci procedeul pentru predicția duratei de viață constă în următoarele:

- se calculează pentru ciclul i variația efectivă a tensiunii:

$$(\Delta\sigma_{ef})_i = (\sigma_{max})_i - (\sigma_{desc})_i$$

- pe baza lui $(\Delta\sigma_{ef})_i$ se calculează $(\Delta K_{ef})_i$;
- utilizând corelația dintre viteza de propagare a fisurii și $(\Delta K_{ef})_i$ se obține variația lungimii fisurii în cadrul ciclului i ca fiind:

$$\Delta a_i = \left(\frac{da}{dN} \right)_i = f[(\Delta K_{ef})_i]$$

- se determină $a_{i+1} = a_i + \Delta a_i$.

Procedeul se repetă până când lungimea fisurii atinge valoarea critică a_{cr} .