

CAPITOLUL 7

DETERMINAREA EXPERIMENTALĂ A MĂRIMILOR CARACTERISTICE MECANICII RUPERII ÎN DOMENIUL ELASTO-PLASTIC

7.1. Introducere

7.2. Metodă originală pentru determinarea J_{Ic} 7.3. Metode alternative pentru determinarea integralei J 7.4. Încercarea standard pentru determinarea J_{Ic} 7.5. Mărima necesară a probei pentru determinarea K_{Ic} 7.6. Încercarea standard pentru determinarea $\delta_{t\text{ crit}}$

7.1. Introducere

În capitolul 4 au fost prezentate, în termeni generali, *conceptele* cele mai cunoscute din cadrul Mecanicii ruperii în domeniul elasto-plastic și anume integrala J și deplasarea la deschiderea fisurii – COD – (crack opening displacement).

În acest capitol vor fi prezentate *metodele experimentale* utilizate în vederea obținerii valorilor pentru integrala J și COD, incluzând valorile critice J_{Ic} și $\delta_{t\text{ crit}}$. Acest capitol poate fi considerat ca o parte a capitolului 4 în care s-au prezentat metodele de determinare a mărimilor caracteristice Mecanicii ruperii în domeniul linear-elastic.

Determinarea valorilor pentru integrala J se bazează pe anumite procedee complexe. Ca urmare, discuția despre metodele de determinare ale integralei J vor fi împărțite în trei secțiuni:

- 1) Metodă originală pentru determinarea J_{Ic} , secțiunea 7.2;
- 2) Metode și expresii alternative pentru determinarea integralei J , secțiunea 7.3;
- 3) Metode de încercare standard pentru determinarea J_{Ic} , secțiunea 7.4.

Metoda originală pentru determinarea J_{Ic} necesită un volum mare de date analizate. Sunt încercate anumite tipuri de probe pe baza cărora se determină expresii simple pentru integrala J și care conduc în final la aflarea J_{Ic} .

7.2. Metodă originală pentru determinarea J_{Ic}

Prima metodă experimentală pentru determinarea integralei J (și anume valoarea sa critică J_{Ic} , în *modul I* de fisurare atunci când are loc propagarea fisurii) a fost prezentată de Begley și Landes în 1972, [23]. Metoda se bazează pe definiția integralei

$$J = \left(-\frac{dW_p}{da} \right) \text{ și necesită evaluarea grafică a acestei expresii. Metoda este ilustrată în}$$

figura 7.1 care prezintă schematic procedeul grafic de obținere a J_{Ic} .

Acest procedeu este următorul:

1. Se trasează diagramele încărcare-deplasare pentru un număr de probe prefisurate la diferite lungimi ale fisurilor (a_1 , a_2 , a_3 , etc.), *figura 7.1a*. Aria de sub curba încărcare deplasare reprezintă energia pe unitatea de grosime notată cu W_1 . Astfel, aria hașurată din *figura 7.1a* este egală cu termenul energetic W_1 pentru proba cu lungimea fisurii a_3 încărcată până la deplasarea v_3 ;

2. Pentru anumite valori constante ale deplasării v , se trasează variația energiei W_1 în funcție de lungimea fisurii, *figura 7.1b*;

3. Pantele negative ale curbelor W_1 -a, respectiv $\left(-\frac{\partial W_1}{\partial a}\right)_{v=\text{const.}}$, sunt trasate în raport cu deplasările, pentru orice lungime dorită a fisurii, între cea mai scurtă și cea mai lungă dintre deplasările utilizate în încercare, *figura 7.1c*. Intrucât energia de deformare elastică a probei este egală cu energia cedată acesteia rezultă că $\left(-\frac{\partial W_1}{\partial a}\right)_v$ este egală cu $\left(-\frac{\partial W_a}{\partial a}\right)_v$. În secțiunea 4.2 definiția energetică a lui J a fost dată astfel:

$$J = -\frac{dW_p}{da} \quad (7.1)$$

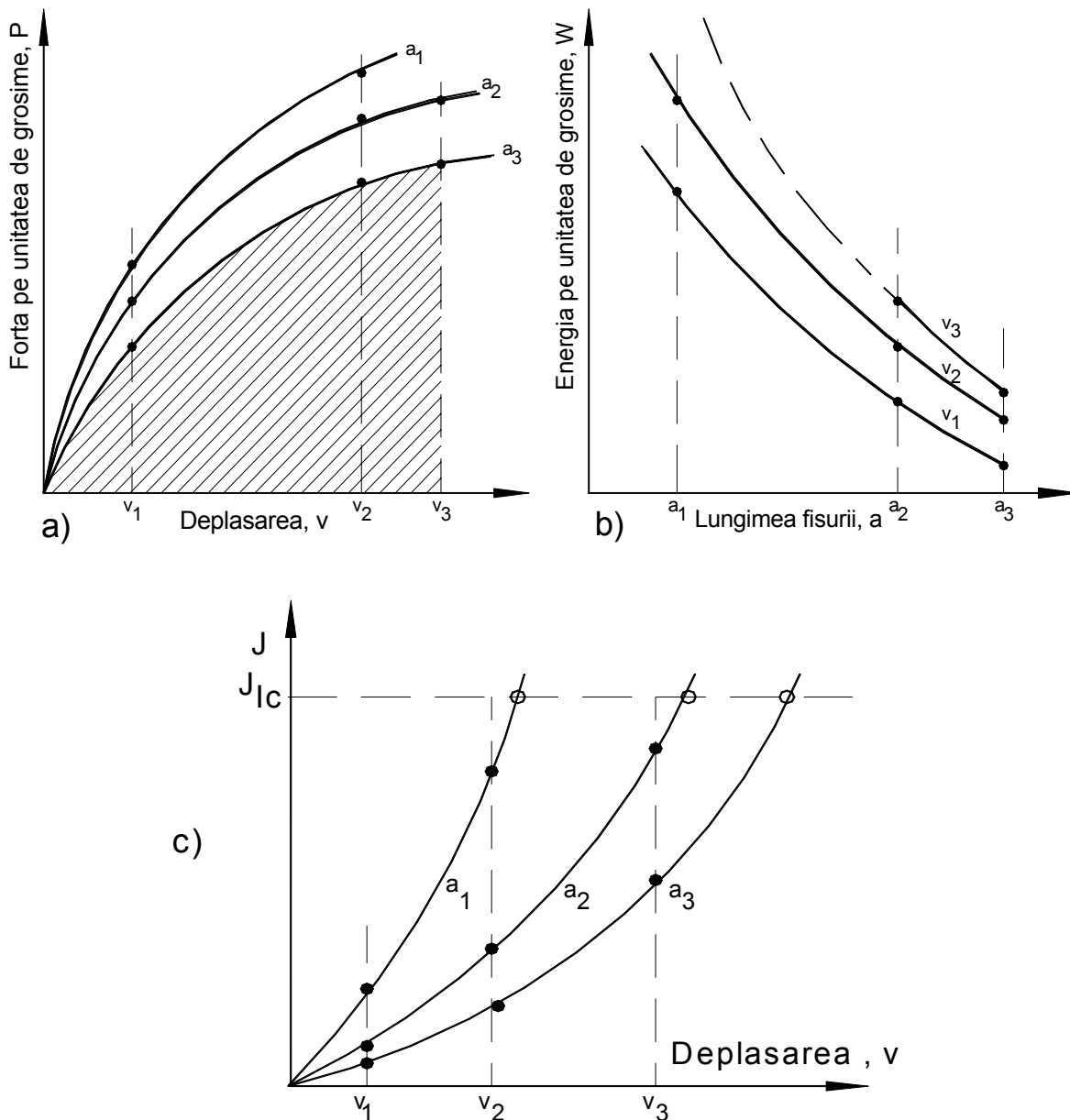


Fig. 7.1. Procedeeul grafic utilizat pentru determinarea J_{IC}

Intrucât pentru propagarea fisurii, în condițiile în care proba este fixată, nu se efectuează lucru mecanic prin sistemul de încărcare rezultă că:

$$J = -\left(\frac{\partial W_p}{\partial a}\right)_v = -\left(\frac{\partial W_e}{\partial a}\right) \quad (7.2)$$

Ca urmare, *figura 7.1c* prezintă în fapt curbele J-v pentru anumite lungimi ale fisurilor.

4. Cunoașterea deplasărilor v , atunci când are loc începutul propagării fisurii, necesită determinarea J_{lc} din curba J-v pentru fiecare lungime inițială a fisurii. În *figura 7.1c* valoarea lui J_{lc} este prezentată schematic ca fiind constantă (caz ideal) și așa și trebuie să fie dacă admitem că integrala J este un criteriu propriu pentru începutul propagării fisurii. Punctul slab al acestei proceduri îl reprezintă determinarea deplasării critice. Pentru unele materiale, punctul de maxim al diagramei încărcare-deplasare coincide cu începutul propagării fisurii. Pentru alte materiale sunt necesare procedee suplimentare de identificare a începutului propagării fisurii. Acest procedeu implică un număr destul de mare de date utilizate și trasarea anumitor grafice care trebuie să se facă cu o acuratețe foarte bună. În aceste condiții, se pot introduce erori în fiecare pas al abordării acestei proceduri. Fiind în legătură directă cu definiția energetică a integralei J, această metodă este de referință pentru verificarea celorlalte metode.

7.3. Metode alternative pentru determinarea integralei J

O contribuție originală pentru determinarea integralei J a fost adusă de Rice [246]. Să considerăm expresiile pentru W_p și J date de ecuațiile (4.6) și (4.11):

$$W_p = W_0 + \Delta W_e - L \quad (4.6)$$

$$J = -\frac{\partial W_p}{\partial a} \quad (4.11)$$

Vom considera acum valoarea lui J pentru două cazuri extreme și anume, pentru propagarea fisurii sub deplasare constantă v și propagarea fisurii sub încărcare constantă P , pe unitatea de grosime.

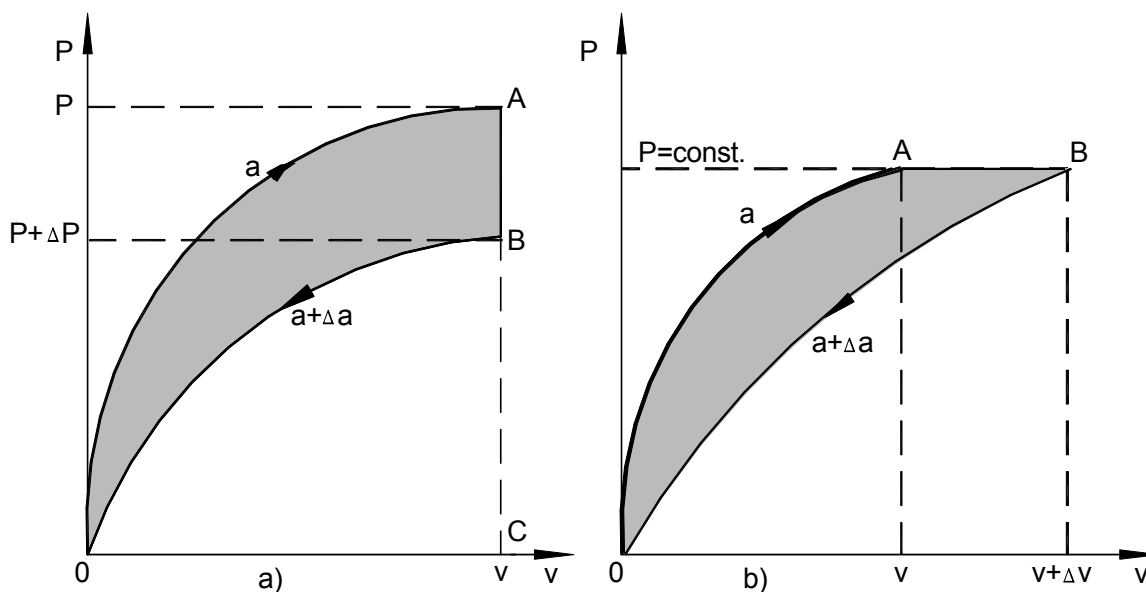


Fig. 7.2. Propagarea fisurii într-un corp neliniar elastic
deplasări blocate (a) și încărcare constantă (b)

În ambele cazuri, variația energiei potențiale datorită propagării fisurii cu valoarea Δa este:

$$\Delta W_p = W_p|_{a+\Delta a} - W_p|_a = \Delta W_e - \Delta L \quad (7.3)$$

Pentru cazul deplasărilor împiedicate, *figura 7.2a*, se poate scrie:

$$\Delta W_e = \int_0^v P|_{a+\Delta a} dv - \int_0^v \Delta P dv \quad \text{și} \quad \Delta L = 0 \quad (7.4)$$

Utilizând ecuația (7.2) variația energiei potențiale va fi egală cu:

$$\Delta W_p = \Delta W_e - \Delta L = \int_0^v \Delta P dv \quad (7.5)$$

Se observă că ΔP este negativă și ΔW_p este egală cu minus aria hașurată aflată între cele două curbe trasate pentru lungimile fisurilor a și $a+\Delta a$ din *figura 7.2a*. Din ecuația (7.1) va rezulta:

$$J = -\frac{dW_p}{da} = -\lim_{\Delta a \rightarrow 0} \frac{\Delta W_p}{\Delta a} = -\int_0^v \left(\frac{\partial P}{\partial a} \right)_v dv \quad (7.6)$$

În cazul încărcării constante, *figura 7.2b*, vom avea:

$$\Delta W_e = \int_0^{v+\Delta v} P|_{a+\Delta a} dv - \int_0^v P|_a dv \quad (7.7)$$

și $\Delta L = P \cdot \Delta v$.

Aceasta conduce la:

$$\Delta W_p = \Delta W_e - \Delta L = \int_0^{v+\Delta v} P|_{a+\Delta a} dv - \left(\int_0^v P|_a dv + P \Delta v \right) \quad (7.8)$$

care este egală cu aria hașurată din *figura 7.2b*. De aceea vom putea rescrie ΔW_p ca fiind:

$$\Delta W_p = -\int_0^P \Delta v dP \quad (7.9)$$

De notat că Δv este o mărime pozitivă în acest context. Astfel, se obține:

$$J = -\frac{dW_p}{da} = -\lim_{\Delta a \rightarrow 0} \frac{\Delta W_p}{\Delta a} = -\int_0^P \left(\frac{\partial v}{\partial a} \right)_v dP \quad (7.10)$$

În cazul fixării plăcii (deplasări constante) integrala J va fi:

$$J = -\left(\frac{\partial W_p}{\partial a} \right)_v = \left(\frac{\partial L}{\partial a} - \frac{\partial W_e}{\partial a} \right)_v = \left(0 - \frac{\partial W_e}{\partial a} \right)_v = -\left(\frac{\partial W_e}{\partial a} \right)_v = -\left(\frac{\partial}{\partial a} \int_0^v P dv \right)_v = -\int_0^v \left(\frac{\partial P}{\partial a} \right)_v dv$$

iar în cazul condiției de încărcare constantă se obține:

$$J = -\left(\frac{\partial W_p}{\partial a} \right)_P = \left(\frac{\partial L}{\partial a} - \frac{\partial W_e}{\partial a} \right)_P = \left(\frac{P \partial v}{\partial a} - \frac{\partial}{\partial a} \int_0^v P dv \right)_P = \left(P \frac{\partial v}{\partial a} \right)_P - \frac{\partial}{\partial a} \left(P v - \int_0^P v dP \right) = \int_0^P \left(\frac{\partial v}{\partial a} \right)_P dP$$

Astfel, definițiile alternative ale lui J pentru extensia fisurii în condiții de deplasare constantă sau încărcare constantă sunt date de expresia:

$$J = -\int_0^v \left(\frac{\partial P}{\partial a} \right)_v dv = \int_0^P \left(\frac{\partial v}{\partial a} \right)_P dP \quad (7.11)$$

Se constată faptul că semnele sunt diferite pentru deplasare constantă și pentru încărcare constantă. Cu ajutorul ecuației (7.11), Rice, [245], arată că este posibilă

determinarea J_{lc} pe baza unei singure încercări a unei anumite probe. De exemplu, J pentru o fisură profundă într-o bară supusă la încovoiere este dată de relația:

$$J = \frac{2}{Bb} \int_0^\theta M d\theta \quad (7.12)$$

în care B este grosimea barei, b este mărimea zonei nefisurate din fața fisurii, M este momentul de încovoiere iar θ este unghiul total de încovoiere. Ecuația (7.12) este aplicată la configurația fisurii inițiale, *figura 7.3*. Deși fisura practică este profundă ($a > b$), b trebuie să fie astfel încât zona deformată plastic inițial să nu ajungă la marginea epruvetei.

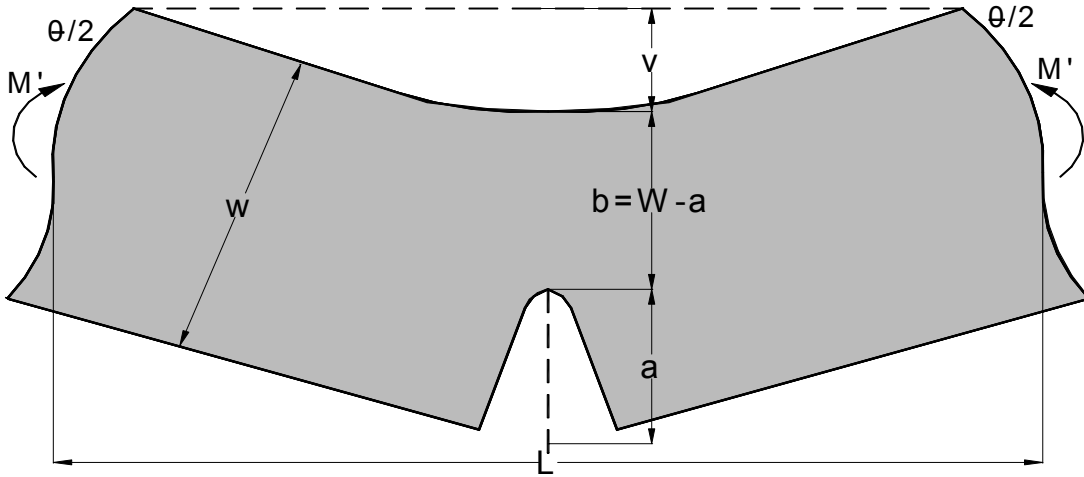


Fig. 7.3. Bară cu creștătură profundă solicitată la încovoiere

În *figura 7.3*, M' este momentul de încovoiere pe unitatea de grosime: $M' = M/B$.

În continuare se consideră prima egalitate din relația (7.11) valabilă în cazul deplasărilor constante. Forța P și deplasarea v trebuie determinate în funcție de M și θ . Considerându-se o încărcare cu forțe prin trei puncte, pentru forța ce acționează asupra barei vom avea relația:

$$P = \frac{4M}{L}$$

L fiind distanța între reazeme. Întrucât plasticitatea rămâne limitată la vârful fisurii, nedepășind cu mult zona creștată, se consideră că laturile barei rămân drepte și ca urmare:

$$v = \frac{\theta L}{4}$$

Având în vedere faptul că $b = w - a$ ($w = \text{const.}$) rezultă că:

$$\frac{\partial \bullet}{\partial a} = - \frac{\partial \bullet}{\partial b}$$

În aceste condiții prima egalitate din relația (7.11) se scrie astfel:

$$J = - \int_0^v \left(\frac{\partial P}{\partial a} \right)_v dv = \int_0^\theta \left(\frac{\partial M}{\partial b} \right)_\theta d\theta \quad (7.13)$$

Este dificilă evaluarea experimentală a acestei relații. Ca urmare, trebuie să se găsească o relație analitică între θ , b și M , având în vedere posibilitatea propagării fisurii. Se presupune că materialul are o comportare elasto-plastică conducând la distribuția tensiunii în zona nefisurată ca în *figura 7.4*:

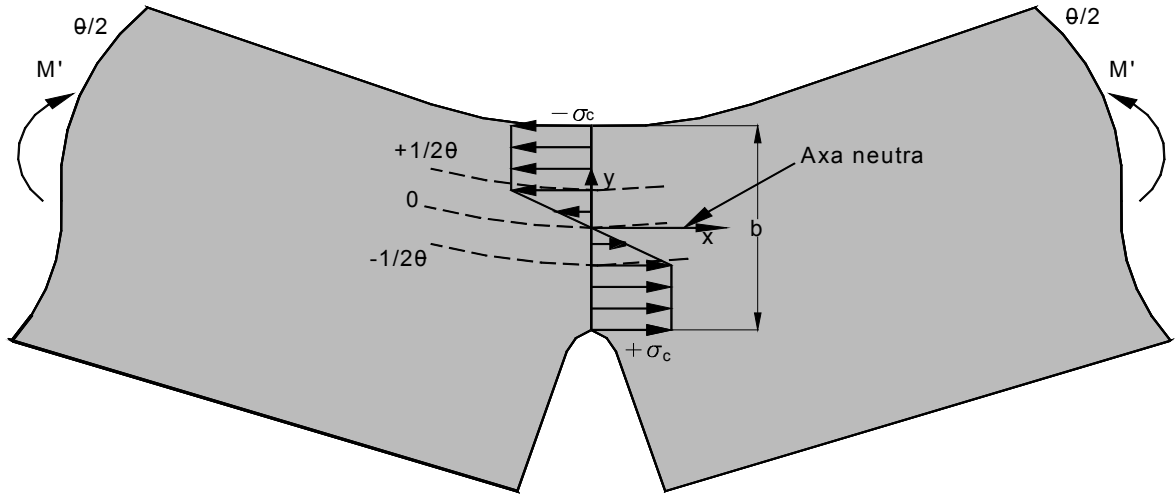


Fig. 7.4. Distribuția tensiunii în zona creștăturii

$$\sigma_x(y) = \begin{cases} \frac{2y}{e} \sigma_c & \text{pentru } |y| < \frac{e}{2} \\ \sigma_c & \text{pentru } \frac{e}{2} < |y| < \frac{b}{2} \end{cases} \quad (7.14)$$

în care y este distanța de la axa neutră. Momentul corespunzător acestei distribuții poate fi considerat ca fiind dat de relația:

$$M' = \int_{-b/2}^{b/2} y \sigma_x(y) dy = \sigma_c \left(\frac{b^2}{4} - \frac{e^2}{12} \right) \quad (7.15)$$

Dimensiunea e este constituită din zona părții crestate deformată doar elastic. Aceasta se poate determina presupunând că axa neutră x ia forma unui arc de cerc iar secțiunea transversală a barei rămâne perpendiculară pe axa neutră și după deformare. Având în vedere aceste presupuneri, deformația ε_x , paralelă cu axa neutră, poate fi scrisă în funcție de y astfel:

$$\varepsilon_x(y) = \frac{2\pi(R-y) - 2\pi R}{2\pi R} = -\frac{y}{R} \quad (7.16)$$

La granița dintre zona elastică și cea plastică, $y = \pm \frac{e}{2}$, valoarea absolută a lui ε_x este aproximativ egală cu $\frac{\sigma_c}{E'}$, în care $E' = E$ pentru starea plană de tensiuni și $E' = \frac{E}{1-\nu^2}$ pentru starea plană de deformații. Astfel, utilizând relația (7.16) va rezulta că:

$$\frac{\sigma_c}{E'} = \frac{e/2}{R} \text{ sau } e \approx \frac{2b\sigma_c}{\theta E'}$$

Substituind această expresie în relația (7.15) vom avea:

$$M' = \frac{b^2 \sigma_c}{4} \left\{ 1 - \frac{4}{3} \left(\frac{\sigma_c}{\theta E'} \right)^2 \right\} \quad (7.17)$$

Această relație se poate scrie sub forma generală:

$$M' = b^2 \cdot F(\theta) \quad (7.18)$$

în care $F(\theta)$ este o funcție ce depinde de unghiul θ și de proprietățile de material: E , ν , σ_c și în cazul materialelor cu ecuisare și de exponentul de durificare n . Se poate scrie acum că:

$$\left(\frac{\partial M'}{\partial b}\right)\theta = 2bF(\theta) = 2\frac{M'}{b} \quad (7.19)$$

Substituind această expresie în relația (7.13) vom găsi:

$$J = \int_0^\theta 2\frac{M'}{b}d\theta = \frac{2}{b} \int_0^\theta M'd\theta = \frac{2}{B(w-a)} \int_0^e Md\theta \quad (7.20)$$

Pentru o bară profund prefisurată putem presupune că zona deformată plastic se restrânge doar în porțiunea nefisurată și ca urmare cele două jumătăți ale barei rămân drepte. Aceste observații permit scrierea ecuației (7.12) sub forma mai practică:

$$J = \frac{2}{Bb} \int_0^v Pdv \quad (7.21)$$

în care P este forța de încărcare definită pe unitatea de grosime iar v este deplasarea pe direcția încărcării.

În cadrul încercării pentru determinarea J_{Ic} , forța P la care se ajunge atunci când se produce fisurarea barei este măsurată în funcție de deplasarea v pe direcția încărcării. Utilizând relația (7.20), integrala J poate fi determinată pentru orice deplasare pe baza determinării ariei de sub curba P - v până la acea deplasare, arie notată cu W . La începutul propagării fisurii din creștătura preexistentă, integrala J este de fapt egală cu J_{Ic} . Ca urmare:

$$J = \frac{2W}{Bb} \text{ și } J_{Ic} = \frac{2W_{cr}}{Bb} \quad (7.22)$$

în care W_{cr} este aria de sub curba P - v la începutul extinderii fisurii.

Ca urmare, în principiu, J_{Ic} poate fi determinat dacă se efectuează doar o singură încercare în care proba este încărcată până când începe propagarea fisurii. Dificultatea constă în faptul că, detectarea începutului propagării fisurii este dificilă. Aparatura utilizată în acest sens este destul de costisitoare și are la bază una din metodele: reducerea de potențial, emisie acustică, ultrasunete, curenți turbionari, etc. Dacă achiziția tuturor datelor, inclusiv a încărcării și deplasării, se face pe calculator, din studiul fișierelor de date obținute se poate determina momentul de început al propagării fisurii. O alternativă ar fi să se facă mai multe încercări, de fiecare dată calculându-se integrala J și trasând diagrama J - Δa . Prin extrapolare se poate obține J_{Ic} atunci când $\Delta a \rightarrow 0$.

7.4. Încercarea standard pentru determinarea J_{Ic}

Standardul care propune determinarea J_{Ic} este ASTM E813, [10]. Acest standard descrie determinarea J_{Ic} utilizând încercarea de încovoiere prin trei puncte a unei bare cu creștătură de tip SENB și a unei bare compacte de tip CT supuse la tracțiune. Din punct de vedere al geometriei, acestea sunt asemănătoare cu cele utilizate pentru determinarea K_{Ic} (figura 5.1 și figura 5.3) prezentând anumite detalii diferite. Pentru ambele configurații de probe relația de calcul pentru integrala J are forma generală:

$$J = \frac{2W}{bB} f\left(\frac{a}{w}\right)$$

în care $f\left(\frac{a}{w}\right)$ depinde de configurația și dimensiunile probei.

Inercarea standard revizuită

În 1989 a fost publicată o versiune revizuită a standardului ASTM E813 [11]. În acest standard se propune a se utiliza aceeași geometrie a probei dar integrala J este evaluată în mod diferit. Deplasarea pe direcția încărcării este împărțită în două: o parte elastică și una plastică: $v = v_{el.} + v_{pl.}$. În consecință, revizuind ecuațiile (7.11) cu încărcarea P definită pe *unitatea de grosime* se poate scrie:

$$J = \frac{1}{B} \int_0^P \left(\frac{\partial v}{\partial a} \right)_P dP = \frac{1}{B} \int_0^P \left(\frac{\partial v_{el.}}{\partial a} \right)_P dP + \frac{1}{B} \int_0^P \left(\frac{\partial v_{pl.}}{\partial a} \right)_P dP = J_{el.} + J_{pl.} \quad (7.23)$$

Dacă se consideră complianța probei, componenta elastică a deplasării va fi:

$$v_{el.} = c \cdot P \quad (7.24)$$

Ca urmare, vom avea:

$$J_{el.} = \frac{1}{B} \int_0^P \left(\frac{\partial v_{el.}}{\partial a} \right)_P dP = \frac{1}{B} \int_0^P \left(\frac{\partial (c \cdot P)}{\partial a} \right)_P dP = \frac{P^2}{2B} \frac{\partial c}{\partial a} = G = \frac{1-\nu^2}{E} k_I^2 \quad (7.25)$$

Intrucât probele SENB și CT au aceeași geometrie ca și cele folosite pentru determinarea K_{Ic} , K_I poate fi calculată utilizând relațiile (5.23) și (5.29). Utilizând același raționament ca cel prezentat în secțiunea anterioară, partea plastică a lui J , $J_{pl.}$ poate fi raportat la aria de sub curba P - $v_{pl.}$. Până la valoarea curentă a lui $v_{pl.}$, standardul ASTM utilizează relația:

$$J_{pl.} = \frac{\eta W_{pl.}}{B_N b}$$

unde: - η este un factor ce depinde de lucrul mecanic $W_{pl.}$ efectuat pentru deformarea

plastică $\left\{ \begin{array}{l} 2 \text{ pentru proba SENB} \\ 2 + 0,522 \frac{B_N}{W} \text{ pentru proba CT} \end{array} \right.$

- B_N reprezintă grosimea netă a probei care este egală cu B dacă nu sunt prezente creștături laterale.

Figura 7.5 ilustrează modul în care este calculat lucrul mecanic $W_{pl.}$

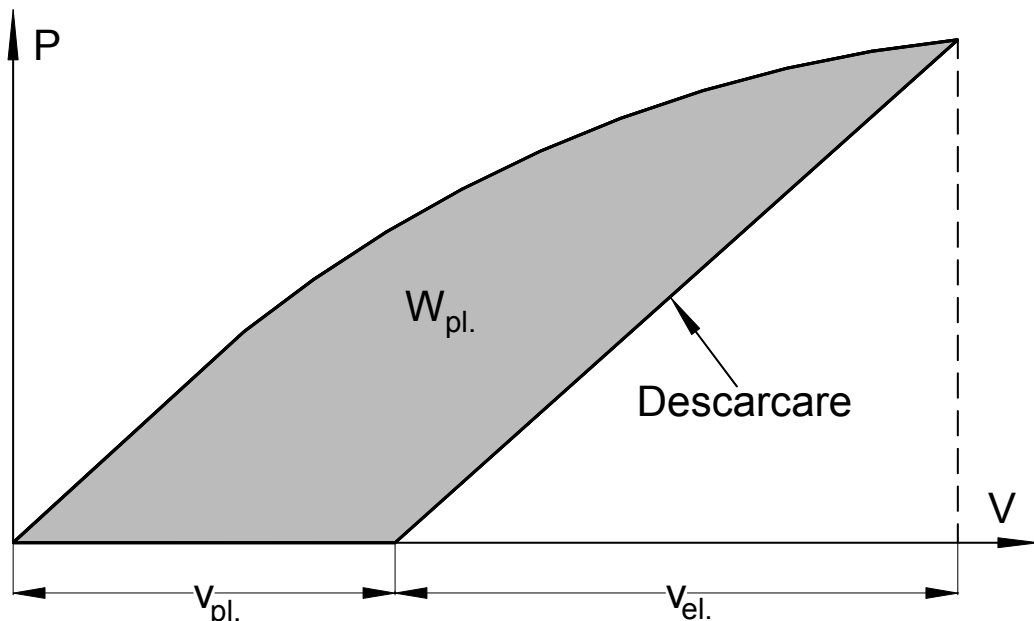


Fig. 7.5. Reprezentarea lucrului mecanic pentru deformarea plastică

Mai întâi este determinat lucrul mecanic total W prin integrarea curbei $P-v$ fiind extrasă apoi partea elastică. Această parte este egală cu $\frac{P \cdot v_{el}}{2}$ sau, utilizând complianța C a probei, egală cu $\frac{CP^2}{2}$. În mod clar, C trebuie să fie determinat din afara acestei proceduri. De notat de asemenea că valoarea lui C depinde de lungimea curentă a fisurii. C poate fi determinat fie prin calculul cu formula dată în standardul ASTM care este în funcție de lungimea fisurii, dimensiunile probei și modulul lui Young, fie prin măsurarea directă pe baza descărcării parțiale în timpul încercării.

Procedeu pentru determinarea J_{Ic}

Pașii necesari a fi parcurși în vederea determinării J_{Ic} sunt următorii:

- 1) Selectarea tipului de probă (probă de încovoiere cu creștătură sau probă compactă) și pregătirea desenelor de execuție;
- 2) Fabricarea probei;
- 3) Prefisurarea prin oboseală;
- 4) Confecționarea dispozitivului pentru măsurarea deplasării la deschiderea fisurii;
- 5) Încercarea probei (încovoiere, respectiv tracțiune);
- 6) Analiza datelor obținute pe baza încercării;
- 7) Determinarea provizorie a J_{Ic} (J_Q);
- 8) Încercarea finală pentru validarea J_{Ic} .

Atât pentru proba de încovoiere (SENB) cât și pentru cea de tracțiune (CT), lungimea fisurii inițiale (creștătura plus prefisura obținută prin oboseală) trebuie să fie mai mare de $0,5W$ pentru a fi siguri de validitatea formulei utilizată în vederea calculului integralei J . Lungimea maximă este $0,75W$, în timp ce valoarea optimă, utilizată cel mai mult în experimente, este considerată a fi $0,6W$. O trăsătură specială a determinării J_{Ic} este aceea că dispozitivul cu mărci tensometrice trebuie poziționat pe direcția solicitării. Pentru proba CT forma creștăturii inițiale este diferită de cea utilizată pentru determinarea K_{Ic} , *figura 7.6*.

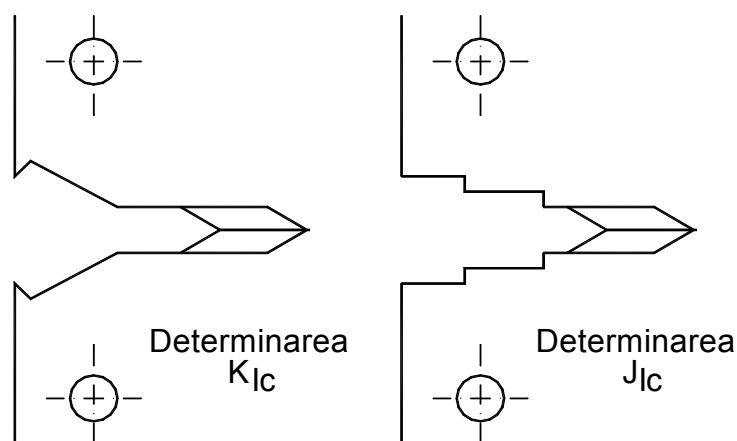


Fig. 7.6. Creștătura inițială a probei C.T.

Trebuie notat faptul că, creștătura inițială pentru determinarea J_{Ic} nu este recomandată în mod absolut. Același lucru este valabil și pentru proba SENB. Experiența a arătat că o creștătură inițială dreaptă este de obicei suficientă.

În vederea obținerii unui vârf ascuțit al fisurii, proba trebuie să fie prefisurată prin oboseală, cu încărcarea maximă nedepășind 40% din limita de încărcare pentru colapsul plastic P_L care poate fi calculat astfel:

$$\begin{cases} \text{proba SENB} & P_L = \frac{4B(W-a)^2 \sigma_0}{3S} \\ \text{proba CT} & P_L = \frac{B(W-a)^2 \sigma_0}{(2W+a)} \end{cases}$$

În care σ_0 este numită tensiune de curgere și este în mod obișnuit media dintre limita de curgere σ_c și rezistența la tracțiune σ_m . În cadrul încercării pentru determinarea J_{Ic} trebuie luate anumite precauții în cadrul controlului deplasărilor în vederea obținerii unei propagări stabile a fisurilor pentru toate încercările. În acest sens este de preferat să se utilizeze o mașină de încercat cu control electronic asupra deplasărilor.

Pentru determinarea J_{Ic} pe baza încercării unei singure probe trebuie utilizate anumite tehnici în vederea măsurării propagării curente a fisurii în timpul încercării, acest lucru permițând determinarea curbei de rezistență J .

O metodă frecvent utilizată pentru monitorizarea lungimii fisurii o reprezintă tehnica complianței cu descărcare. După încărcarea probei, până să apară mici propagări ale fisurii, se face o descărcare parțială și subsecvențială, *figura 7.7*.

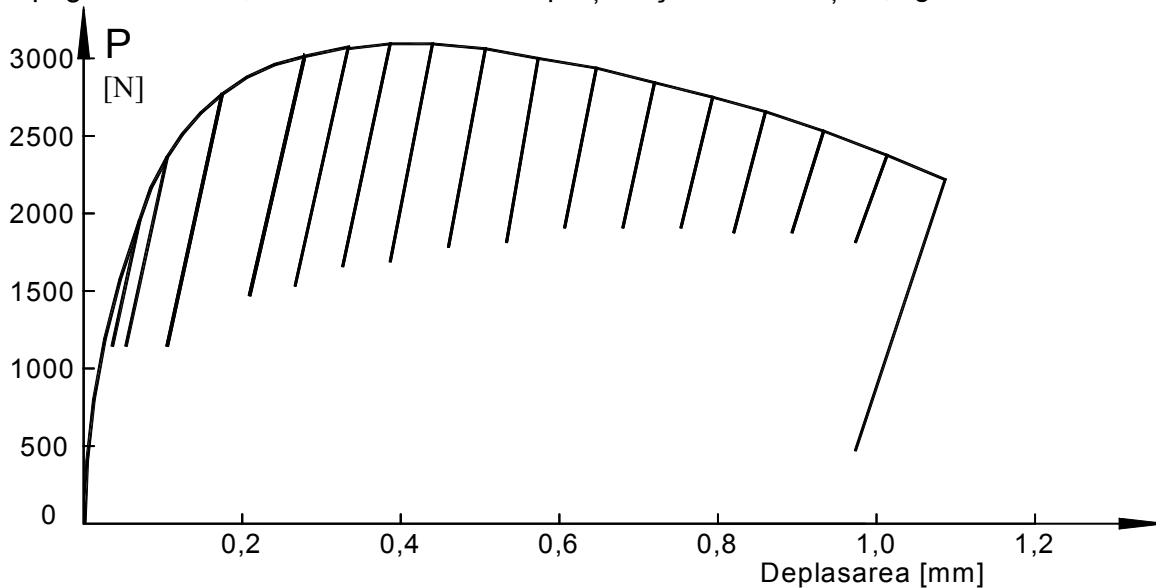


Fig. 7.7. Exemplu pentru tehnica complianței la descărcare

Pentru a evita o anumită influență a plasticității asupra rezultatelor încercării, descărcarea maximă trebuie să fie mai mică de 50% din încărcarea curentă sau de aproximativ 20% din P_L . În diagrama încărcare-deplasare ($P-v$), acest procedeu de încărcare este reflectat în prima parte a liniei complianței elastice pentru descărcare. Din rezultatele complianței elastice C , poate fi calculată lungimea instantanee a fisurii a și ca urmare poate fi calculată propagarea fisurii ca fiind $\Delta a = a - a_0$. ASTM E 813 prezintă formularea ecuației pentru dimensiunea lungimii fisurii a/W relativă la dimensiunea complianței pentru probele SENB și CT. Valorile curente pentru a , Δa , P și curba $P-v$ până la deplasarea curentă conduc la un punct de pe curba $J-\Delta a$. Prin respectarea acestui proces de un număr de ori, se poate obține curba de rezistență J pe baza unei singure încercări. Un dezavantaj al acestei metode îl constituie faptul că, acuratețea liniei de complianță la descărcare necesită echipament corespunzător și suficientă îndemânare experimentală. Atât pentru determinările în care se utilizează mai multe probe cât și în cazul determinării în care se utilizează o singură probă, după măsurarea fisurii propagate proba se rupe. De notat că, pentru procedeul ce utilizează o singură

epruvetă, aprecierea lungimii fisurii propagate este determinată în mare măsură de acuratețea tehnicii complianței la descărcare. Pentru a putea măsura fisura propagată, trebuie să se facă distincție între propagarea Δa și fisurarea reziduală ce apare la ruperea prin deschiderea probei după încercare, *figura 7.8*.

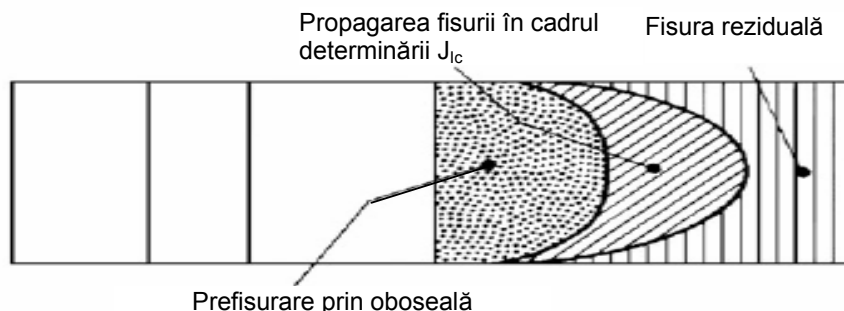


Fig. 7.8. Schematizarea propagării fisurii

De obicei, probele utilizate la determinarea J_{Ic} sunt relativ subțiri astfel că apare o tendință de „aplatizare” a vârfului fisurii, atât în cadrul prefisurării cât și în cazul încercărilor efective. Experiența a arătat că, pentru obținerea unor valori corecte pentru J și J_{Ic} este necesar a se lua media a cel puțin 9 măsurători pentru a și Δa , cu spații egale de-a lungul grosimii probei.

Analiza datelor experimentale și determinarea J_{Ic}

Analiza datelor experimentale are în vedere calculul valorilor lui J pentru anumite creșteri Δa ale fisurii. Partea elastică a fiecărei valori a lui J , J_{el} , se poate calcula cu relația (7.25) prin substituirea valorii lui K_I corespunzătoare încărcării și lungimii fisurii în momentul în care se atinge valoarea Δa a propagării fisurii.

Dreapta de ecuație $J=2\sigma_0 \cdot \Delta a$ și curba aproximativă sunt influențate de lucrul mecanic de „întărire”. Pentru un lucru mecanic de „întărire” mai mare, panta dreptei inițiale este mai mică, iar curba J - Δa este mai abruptă. În aceste condiții șansele de eroare în ceea ce privește estimarea J_Q sunt mai mari, *figura 7.9*.

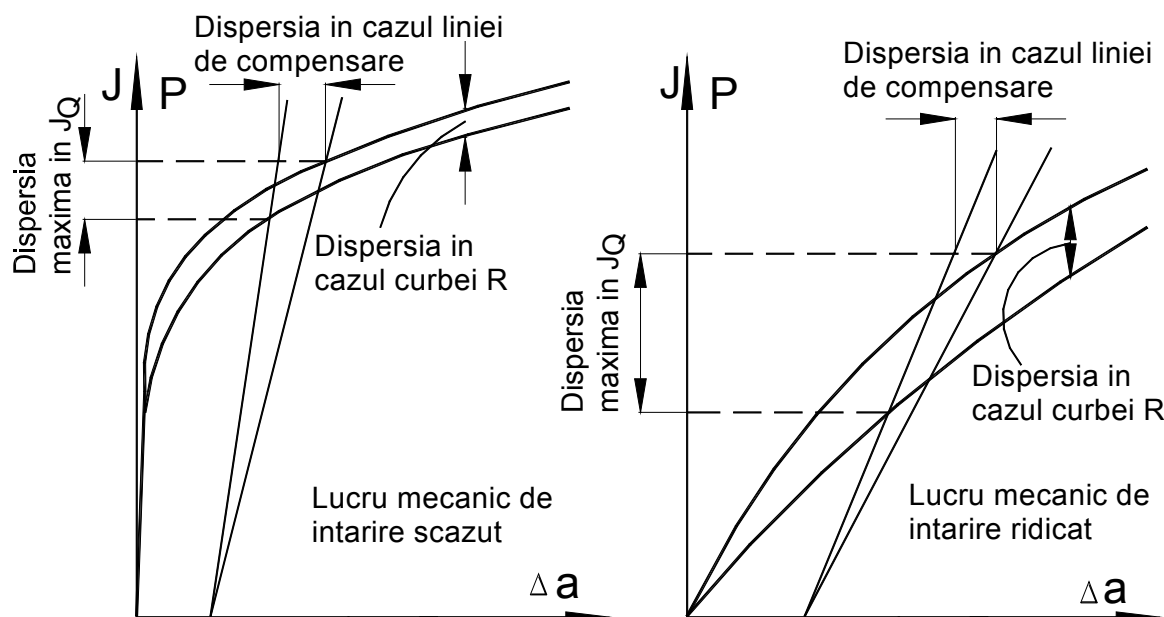


Fig. 7.9. Influența lucrului mecanic de întărire asupra erorii de estimare a J_Q

În cadrul standardului ASTM acest inconvenient este eliminat într-o oarecare măsură dacă se impune condiția ca panta curbei în J_Q să fie mai mică decât σ_0 .

Dreapta inițială are ecuația $J = \delta_t \cdot \sigma_0$. În concordanță cu standardul ASTM aceeași dreaptă are ecuația $J = M \cdot \delta_t \cdot \sigma_0$ în care $M = 1 \div 3$, de obicei $M = 2$. În aceste condiții, panta acestei drepte este mai abruptă și ca urmare va rezulta o supraestimare a lui J_Q , arătată în figura 7.10. Experimentele arată că supraestimarea lui J_Q poate fi mai mare de 10%.

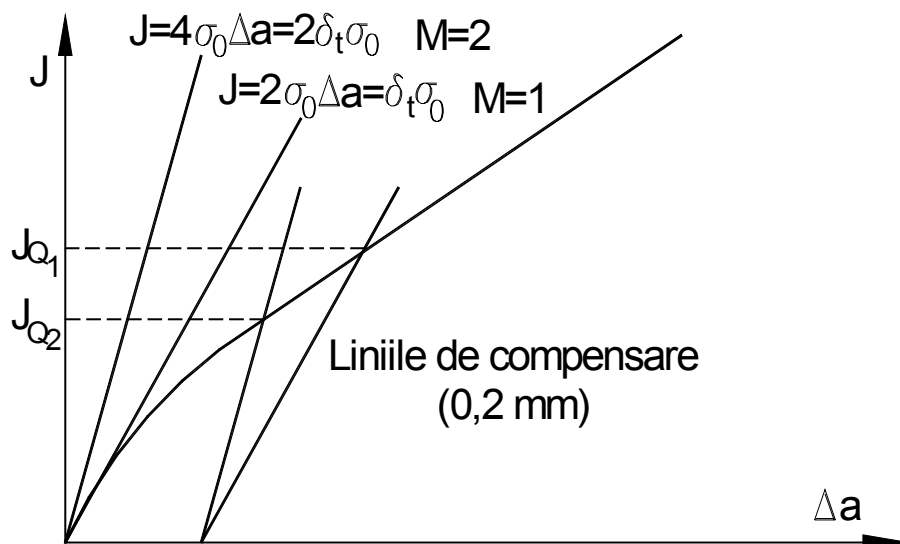


Fig. 7.10. Influența relației dintre J și δ_t asupra lui J_Q

Linia de excluziune de la 0,15 mm asigură faptul că Δa este mai mic de 0,15 mm și integrala J poate fi determinată cu o destul de bună acuratețe. Linia de excluziune de la 1,5 mm asigură faptul că Δa este în general mai mică de 6% din lungimea zonei nefisurate pentru probele SENB și CT propuse pentru determinarea J_{Ic} și acest lucru arată că, până la această valoare a propagării fisurii, relația pentru integrala J , ecuația (7.25), rămâne valabilă. Trebuie să notăm faptul că, procedeul de încercare în concordanță cu ASTM E813 permite determinarea numai a J_{Ic} (sau J_Q). Sunt standardizate de asemenea procedee de încercare pentru determinarea curbei de rezistență J în ansamblu, implicând creșteri mari ale propagării stabile a fisurii în vederea determinării J_{Ic} . Cu ajutorul curbei rezultate, se cuantifică efectul creșterii stabile a fisurii în materialul cu o anumită rezistență la fisurare în regim elasto-plastic. Procedeul utilizat pentru determinarea J_{Ic} descris în această secțiune este restricționat la cazurile propagării fisurii pe baza mecanismelor de distrugere ductilă. În orice caz, integrala J se poate utiliza, de asemenea, pentru a caracteriza începutul ruperii fragile înainte sau în timpul propagării stabile a fisurii. Restricțiile impuse în ceea ce privește constrângerile de la vârful fisurii vor fi în acest caz mai severe. Se pot combina cele trei tipuri de măsurători ale rezistenței la fisurare într-un singur set de reguli experimentale. Sunt incluse aici determinarea K_{Ic} , J_{Ic} , curba de rezistență J , δ_{t-crit} , și de asemenea valorile critice pentru integrala J și δ_t în cazul fisurării fragile. Ideea desprinsă de aici este că, poate fi posibilă evaluarea rezistenței la fisurare utilizând un singur procedeu experimental, și în același timp se minimizează riscul invalidării rezultatelor încercării din cauza comportării aleatorii a materialului.

Dacă evaluarea unui parametru critic de fisurare eșuează este posibil de a determina un alt parametru utilizând aceleași date experimentale.

7.5. Mărimea necesară probei pentru determinarea K_{Ic}

Deși nu face parte din cadrul încercărilor MREP, se va acorda o anumită atenție determinării K_{Ic} pentru materialele cu rezistență ridicată, având în vedere faptul că sunt puncte comune cu determinarea curbelor de rezistență J .

K_{Ic} este un criteriu de fisurare cu care se poate lucra pentru materiale cu rezistență mare. Mărimea probelor necesară pentru validarea K_{Ic} este diferită pentru o comportare diferită a materialelor. Pentru materialele slab rezistente dar cu duritate mare, K_{Ic} nu se poate determina în mod convenabil pentru că mărimea necesară a probei pentru validarea încercărilor poate fi prea mare. Pentru materialele ductile, materiale la care are loc o propagare stabilă a fisurii până înainte de rupere, K_{Ic} este definit în punctul în care extinderea stabilă a fisurii Δa este de 2% din lungimea fisurii inițiale, a . Mărimea necesară pentru probă, în termenii lungimii fisurii, este dată de relația:

$$a \geq 2,5 \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_c} \right)^2 \quad (7.26)$$

Combinând această relație cu $\Delta a = (0,02 \cdot a)$ (în cazul curgerii plastice) vom avea:

$$\Delta a \geq 0,05 \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_c} \right)^2 \quad (7.27)$$

relație care trebuie îndeplinită pentru a se putea obține o valoare validă pentru K_{Ic} . Tot în vederea examinării mărimii necesare pentru probă, este convenabil de a scrie pe K în termenii integralei J . Pentru valori arbitrare ale lui J , vom avea:

$$\Delta a \geq 0,05 \frac{E}{1-\nu^2} \frac{J}{\sigma_c^2} \quad (7.28)$$

sau:

$$J \leq 20(1-\nu^2) \frac{\sigma_c^2}{E} \Delta a \quad (7.29)$$

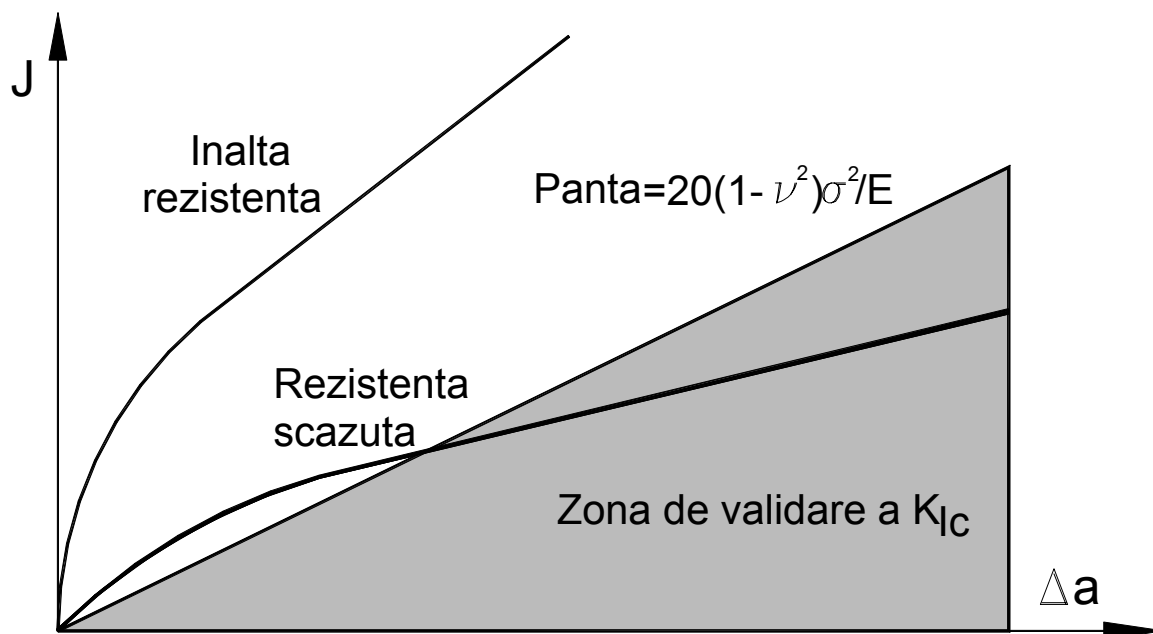


Fig. 7.11. Schematizare care arată zona de validare a K_{Ic}

În funcție de creșterea absolută a propagării fisurii, Δa , această relație dă valoarea maximă a lui J pentru care ar fi îndeplinită și mărimea necesară a lui K_{Ic} cu respectarea lungimii fisurii. Această condiție este prezentată în *figura 7.11* prin aria marcată sub curba $J-\Delta a$. În această figură, curbele de rezistență J sunt trasate pentru materiale cu înaltă și slabă rezistență la fisurare. Ca urmare, dacă nu se ia în considerare mărimea probei, validarea K_{Ic} este permisă totuși pentru anumite materiale numai dacă, pentru o anumită propagare a fisurii curba de rezistență J se află în zona marcată din *figura 7.11*. În mod clar, pentru materialele cu rezistență înaltă, K_{Ic} nu poate fi determinat atunci când se utilizează o probă de dimensiuni mari. Pentru materialele cu rezistență scăzută, dacă toate celelalte cerințe sunt îndeplinite, se poate determina mărimea necesară a probei pentru validarea K_{Ic} chiar dacă ar fi necesare uneori probe de mărimi nerealiste.

Pentru aliajele din aluminiu și pentru oțeluri de înaltă rezistență, se poate obține ușor o valoare validă pentru K_{Ic} prin determinări pe probe cu mărimi obișnuite. Pentru oțeluri cu duritate mare, dar slab rezistente este destul de dificil de a se determina, pe probe obișnuite, o valoare validă pentru K_{Ic} .

7.6. Incercarea standard pentru determinarea $\delta_{t \text{ crit.}}$

Probelor standard pentru determinarea *deplasării la deschiderea fisurii* (crack opening displacement - COD) solicitate la încovoiere prin trei puncte și având creștătură (SENB), precum și proba compactă (CT) le-a fost descrisă configurația în secțiunea 5.3. Pentru probele CT este permisă utilizarea unui anumit tip de creștătură inițială în vederea determinării J_{Ic} (*figura 7.6*). Este de preferat ca raportul W/a să fie în jur de 2 dar pot exista anumite abateri în jurul acestei valori. În principiu, grosimea B trebuie să fie egală cu cea utilizată în exploatare iar probele să nu aibe canale laterale. Sunt permise excepții dacă se poate demonstra că grosimi mai mici nu afectează rezistența la fisurare sau dacă se poate stabili o relație bine determinată între grosimea probei și rezistența la fisurare. Este important de notat că valorile lui $\delta_{t \text{ crit.}}$ rezultate ca urmare a aplicării acestei metode pot fi afectate de geometria și mărimea probei. De aceea sunt necesare anumite precauții atunci când se compară rezultatele preluate din diferite surse.

7.6.1. Expresii pentru calculul lui $\delta_{t \text{ crit.}}$

Măsurarea directă a lui $\delta_{t \text{ crit.}}$ la vârful fisurii este imposibilă. Ca urmare, se utilizează un traductor de deplasare (pensetă cu marcă tensometrică) pentru măsurarea deplasării la deschiderea fisurii, v_g , în apropierea suprafeței probei. Se presupune că în zona nefisurată ($b=W-a$) se produc deformații plastice. Ca urmare, se presupune că flancul fisurii se rotește cu un anumit unghi, centrul de rotație stabilindu-se în interiorul zonei nefisurate la $(r \cdot b)$. În *figura 7.12* este prezentat un exemplu în care o pensetă cu mărci tensometrice se poate atașa la muchiile ascuțite de la suprafața probei.

Din *figura 7.12* se poate deduce că δ_t poate avea expresia:

$$\delta_t = \frac{r \cdot b}{r \cdot b + a + z} v_g \quad (7.30)$$

în care distanța z reprezintă distanța de la suprafața probei la vârful pensetei tensometrice. Dacă penseta tensometrică se montează în canale frezate în interiorul probei, z va fi negativă.

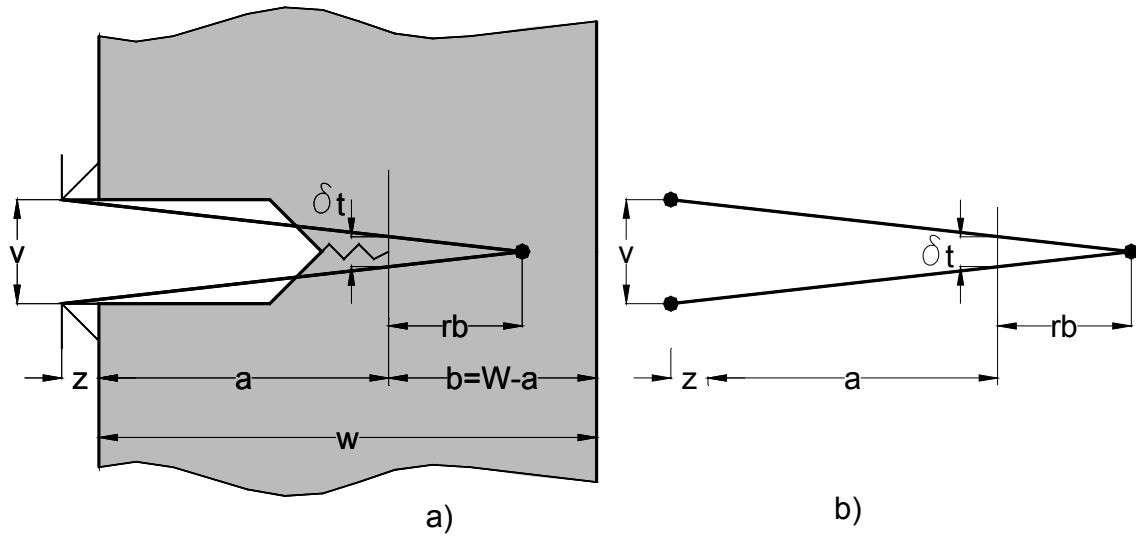


Fig. 7.12. Deplasarea la deschiderea vârfului fisurii

Deși această relație pare simplă, apar totuși două probleme:

- 1) *Valoarea factorului de rotație r .* Experimentele arată o varietate semnificativă în ceea ce privește valorile utilizate pentru r . Acest lucru se întâmplă din cauză că determinarea necesită tehnici complicate cum ar fi metoda pensetei cu două mărci sau infiltrarea în fisură a cauciucului plastic sau siliconat. Pentru determinarea standard a COD lui r i se atribuie valoarea 0,4 pentru proba SENB și 0,46 pentru proba CT.
- 2) *Interpretarea deplasării v_g a pensetei cu mărci tensometrice.* Creșterea v_g , în raport cu punctul de zero stabilit inițial, se datorează atât efectului de deschidere elastică a fisurii cât și rotației în jurul punctului amintit anterior. Ca urmare, dacă se consideră v_g determinat numai de rotația flancurilor fisurii (ecuația 7.30) se poate ajunge la rezultate eronate. În aceste condiții v_g trebuie separat într-o parte elastică v_{el} și o parte plastică v_{pl} , arătate schematic în figura 7.13.

3)

Numai partea elastică a deplasării este substituită în ecuația (7.36), astfel:

$$\delta_t = \frac{v_{pl} \cdot r \cdot b}{r \cdot b + a + z} v_g \quad (7.31a)$$

Din motive de acuratețe, *partea plastică* v_{pl} nu este utilizată, iar *contribuția elastică* la δ_t este calculată în concordanță cu expresia dată de Mecanica Liniar-Elastică a Rupurii pentru COD:

$$\delta_{el} = \frac{k_I^2}{E\sigma_c} \left(\frac{1-\nu^2}{2} \right) \quad (7.31b)$$

și ca urmare vom avea:

$$\delta_t = \delta_{el.} + \delta_{pl.} = \frac{k_I^2}{E\sigma_c} \left(\frac{1-\nu^2}{2} \right) + \frac{v_{pl.} \cdot r \cdot b}{r \cdot b + a + z} v_g \quad (7.32)$$

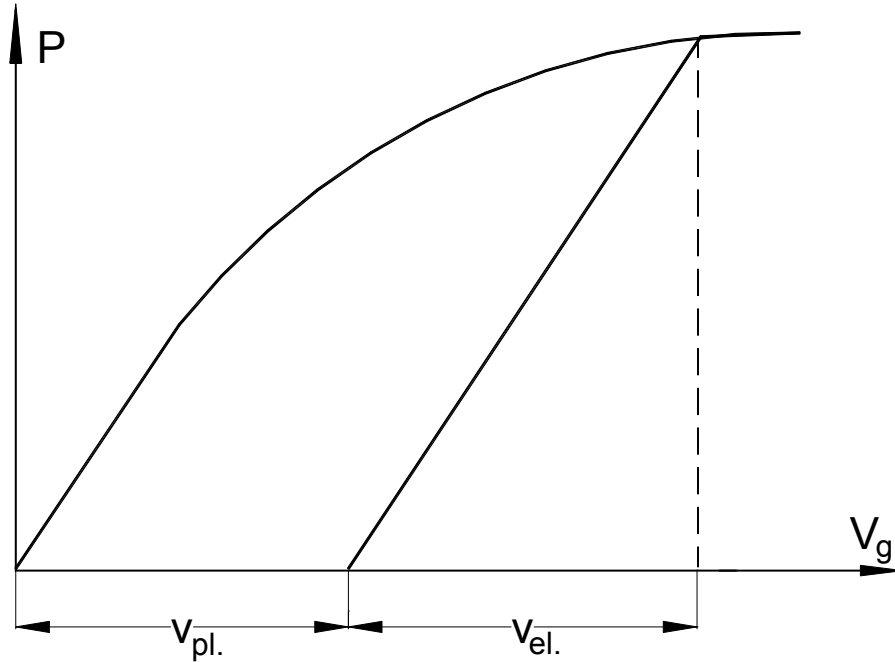


Fig. 7.13. Separarea deplasării totale la deschiderea fisurii v_g în componentele elastică $v_{el.}$ și plastică $v_{pl.}$

Trebuie remarcat faptul că valoarea lui K_I din ecuația (7.32), se obține din relațiile standard pentru probele SENB și CT, respectiv ecuațiile (5.23) și (5.28), prin substituirea lungimii inițiale a fisurii a și încărcarea pentru care este determinată $v_{pl.}$.

7.6.2. Procedul de determinare a COD

Pașii necesari în cadrul încercării pentru determinarea COD sunt următorii:

1. Proiectarea și elaborarea desenelor de execuție ale probelor;
2. Fabricarea probelor;
3. Prefisurarea prin oboseală;
4. Confecționarea dispozitivelor de fixare a pensetei tensometrice pentru măsurarea deplasării la deschiderea fisurii;
5. Solicitarea probelor (încovoiere – SENB sau tracțiune – CT);
6. Analiza înregistrării forță – deplasare pentru determinările $\delta_{t \text{ crit.}}$.

Procedul utilizat pentru prefisurarea prin oboseală este similar cu cel utilizat la determinarea K_{Ic} . Prefisurarea prin oboseală se face pentru un ciclu la oboseală cu un coeficient de asimetrie a ciclului R cuprins între 0 și 0,1. În cazul determinării J_{Ic} sarcina maximă de încărcare nu trebuie să depășească 40% din sarcina la care apare deformarea plastică pentru probele SENB și respectiv CT. Aceste cerințe sunt necesare pentru a asigura o ascuțime suficientă a prefisurii cu limitarea deformațiilor plastice remanente în regiune din imediata vecinătate a vârfului fisurii.

În timpul determinării COD proba este încărcată controlând deplasarea și înregistrând atât încărcarea cât și deplasarea la deschiderea fisurii. Viteza de încărcare

trebuie fixată astfel încât, creșterea factorului de intensitate a tensiunii cu timpul $\frac{dk_I}{dt}$ să fie cuprinsă între (0,5 și 0,3) $\frac{MPa\sqrt{m}}{s}$. Această creștere este definită în mod arbitrar, pe baza încărcării statice, în același fel ca la determinarea K_{Ic} .

Intrucât viteza de creștere $\frac{dK_I}{dt}$ este măsurată în regiunea elastică a curbei încărcare – deplasare, această procedură poate conduce la diferențieri mari în ceea ce privește viteza de încărcare pentru probele ductile: dacă viteza de încărcare a mașinii de încercat este menținută constantă, viteza de deplasare va crește mult în zona plastică a curbei de încărcare – deplasare; dacă, pe de altă parte, viteza de deplasare a mașinii de încercat este menținută constantă, viteza de încărcare va scădea în regiunea plastică.

S-a arătat că solicitarea cu viteze de încărcare mici în regiunea plastică a diagramei încărcare-deplasare poate conduce la valori mici ale COD.

După încercare trebuie examinată suprafața rezultată în urma ruperii. Procedeu de determinare a lungimii prefisurării la oboseală și cerințele care trebuie respectate pentru obținerea unor rezultate valabile ale încercării sunt aceleași ca în cazul încercării pentru determinarea J_{Ic} . În plus, este necesar a se stabili dacă în timpul încercării se produce o extindere stabilă a fisurii și de a evalua relația între creșterea extinderii fisurii și posibila comportare la fisurare: o propagare inițial instabilă urmată de oprirea fisurii.

7.6.3. Analiza înregistrării forță-deplasare

Înregistrările forță deplasare pot apărea în șase forme diferite. Acestea sunt prezentate schematic în figura 7.14.

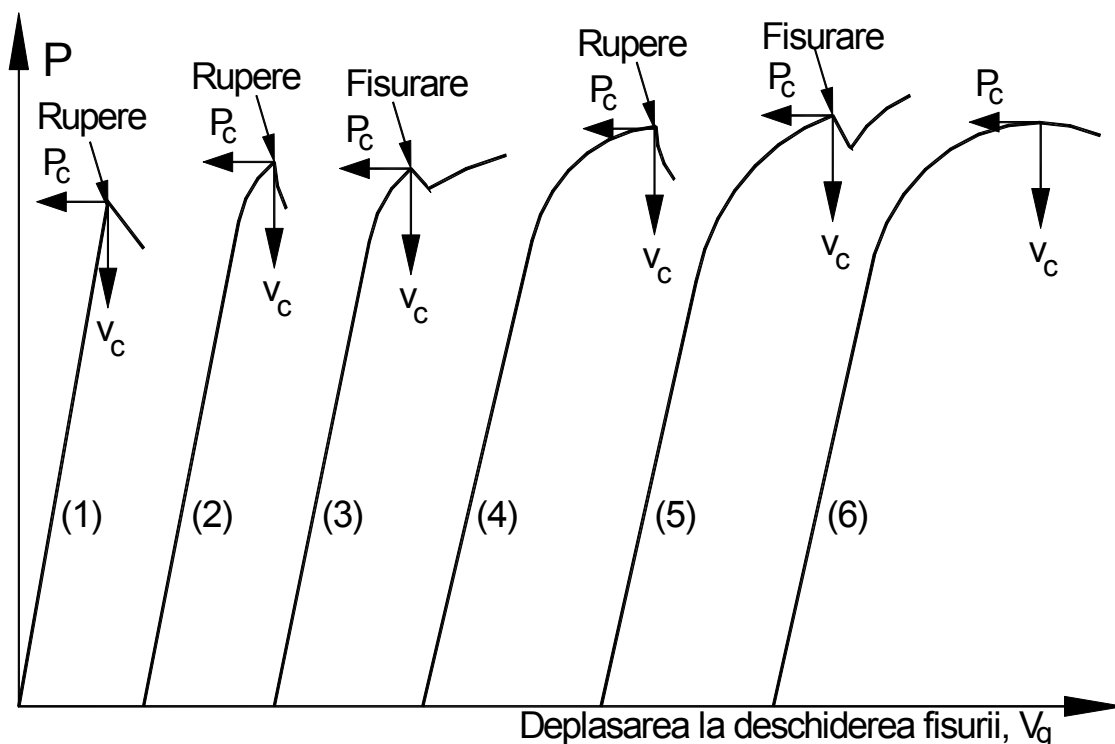


Fig. 7.14. Tipuri de grafice încărcare-deplasare la deschiderea fisurii obținute în timpul încercării pentru determinarea COD

Înainte de a clasifica o curbă încărcare – deplasare trebuie să decidem dacă fisurarea este „semnificativă”. În cazul în care, după examinarea suprafeței fisurate, se observă că extinderea fisurii depășește 4% din lungimea zonei nefisurate b , fisurarea se consideră „semnificativă”. Cazurile 1, 2 și 3 se tratează în mod similar. Curbele din cazurile 1 și 2 sunt monoton crescătoare, nefiind pusă în evidență plasticitatea și nici propagarea stabilă a fisurii înainte de rupere. Cazul 3 arată o fisurare semnificativă datorată propagării bruște a fisurii urmată de oprirea acesteia. În aceste cazuri $\delta_{t \text{ crit.}}$ se consideră ca fiind δ_c care este calculat cu relația (7.32), utilizând pentru forță valoarea P_c , iar pentru deplasare valoarea v_c . Cazurile 4 și 5 pot fi de asemenea tratate împreună. Înainte de instabilitate, care poate fi determinată fie de rupere fie de o fisurare semnificativă, apare propagarea stabilă a fisurii. Acest lucru ar trebui remarcat după examinarea suprafeței rupte. În aceste cazuri $\delta_{t \text{ crit.}}$ este calculat ca fiind δ_u pentru valorile (P_u, v_u) . Cazul 6 este relevant pentru materialele extrem de ductile pentru care extinderea stabilă a fisurii are loc dincolo de încărcarea maximă P_m : $\delta_{t \text{ crit.}}$ se calculează ca fiind δ_m corespunzător punctului (P_m, v_m) .