

CAPITOLUL 5

TENACITATEA LA RUPERE

5.1. *Principiile măsurării K_{Ic}*

5.2. *Factorul de formă Y*

5.3. *Relația între energia disponibilă pentru propagarea fisurii G_{Ic} și energia superficială unitară la fisurare γ_f*

5.4. *Condiții de validitate a încercărilor de tenacitate la fisurare*

Tenacitatea la rupere, care se notează cu K_{Ic} , permite caracterizarea aptitudinii pe care o posedă un material de a rezista la inițierea și propagarea unei fisuri. Introducerea unui astfel de parametru în rezistența materialelor este foarte importantă deoarece, cunoașterea sa permite determinarea mărimii critice a defectului sau mărimea maximă acceptabilă pe care o poate avea un defect într-o structură supusă la tensiuni cunoscute. În acest fel se poate evita ruperea catastrofală chiar dacă nu se utilizează noțiunea de coeficient de siguranță.

Tenacitatea K_{Ic} , este o proprietate intrinsecă a materialului fiind măsurată în termenii factorului de intensitate a tensiunilor pentru *modul I* de rupere. Determinarea unei valori pentru K_{Ic} presupune solicitarea statică a unei probe prefisurată, de anumite dimensiuni, solicitare care produce în cele din urmă o propagare instabilă și catastrofală a fisurii.

5.1. Principiile determinării K_{Ic}

Principiile determinării experimentale a rezistenței la fisurare decurg din relația fundamentală care leagă tensiunea aplicată de mărimea defectelor critice din material.

$$K_{Ic} = \sigma_f \cdot Y \cdot \sqrt{a} \quad (5.1)$$

în care:

- σ_f - tensiunea aplicată la care se produce propagarea instabilă a fisurii;
- Y - factor geometric care depinde de mărimea defectului și de dimensiunile probei;
- a - mărimea critică a defectului.

Rezistența la fisurare este determinată plecând de la proba ce prezintă o fisură artificială ale cărei dimensiuni sunt cu mult superioare defectelor existente în mod natural în material. Tensiunea necesară pentru a se propaga această fisură de dimensiune cunoscută a , permite calculul rezistenței la fisurare K_{Ic} pentru materialul considerat.

Pentru aceasta se pot utiliza mai multe metode [69]:

- metoda analitică;
 - metoda complianței;
 - metoda lucrului mecanic de fisurare.
-

Metoda analitică (relația 5.1) permite determinarea directă a factorului critic de intensitate a tensiunilor - rezistența la fisurare - K_{Ic} , pe când *metoda complianței* și a *lucrului mecanic de fisurare* presupun determinarea în prealabil a energiei de rupere.

Pentru determinarea rezistenței la fisurare se consideră deschiderea fisurii în *modul I*. Aceasta corespunde unei solicitări de tracțiune perpendiculară pe planul fisurii.

Propagarea, cu excepția debutului, trebuie să se producă în aceleași condiții iar după rupere secțiunea trebuie să rămână plană. Se obține această planeitate în cazul solicitărilor plăcilor groase care se găsesc în *stare plană de deformare*: ($\varepsilon_z = 0$). Pentru plăci subțiri, fisura are tendința de a se răsuci ceea ce duce la o suprafață de rupere înclinată, solicitarea devenind în aceste condiții o suprapunere a *modurilor II și I*. Măsurarea tenacității se va face, în aceste condiții, pentru valori ale K_{Ic} superioare lui K_{Ic} . Măsurarea experimentală a lui K_{Ic} necesită o fisurare a probei ale cărei caracteristici trebuiesc foarte bine definite, în special în ceea ce privește lungimea a a fisurii și raza ρ la vârful acesteia. Fisura introdusă în proba utilizată pentru măsurarea rezistenței la fisurare trebuie să aproximeze cât mai fidel posibil o fisură naturală (fisură Griffith). Cu alte cuvinte, raza de curbura de la vârful fisurii trebuie să fie cât mai mică (de ordinul câtorva distanțe interatomice). În caz contrar se poate obține pentru K_{Ic} o valoare subestimată. În plus, zona de la vârful creștăturii trebuie să prezinte o perturbare a legăturilor asemănătoare celei obținute prin fabricare, tensiuni remanente, etc. În cazul materialelor ductile se utilizează, în general, două metode pentru fisurarea probelor.

1. Practicarea unei creștături prin frezare urmată de o încercare la oboseală care să creeze, pornind de la fisura mecanică, o fisură prin oboseală cu respectarea condițiilor cerute anterior, respectiv o rază la vârful fisurii apropiată de zero.

2. Atunci când materialul este conductor (electric), o fisură poate fi creată prin electroeroziune cu ajutorul unui electrod de grosime foarte mică (câțiva μm).

Pentru materialele fragile este dificilă inițierea unei fisuri și controlul propagării sale. Una din metodele mai des întâlnite constă în realizarea unei creștături foarte fine cu ajutorul frezelor diamantate. Grosimile pot fi variabile: de la câteva sutimi de mm la câteva sutimi de μm . Lățimea creștăturii trebuie să țină seama de parametrii microstructurii materialului și nu trebuie să conducă la valori supraestimate ale rezistenței la fisurare. Rezultatele obținute arată că, acest tip de creștătură conduce la apariția microfisurilor la vârful acesteia (smulgerea grăunților de material) și astfel, defectele introduse artificial simulează destul de bine defectele reale; acest lucru este cu atât mai bine verificat cu cât creștătura este mai fină. Pentru a evita distrugerea exagerată a materialului la vârful fisurii se utilizează pentru prelucrare viteze de așchiere mici ($0,3 \div 0,6$ m/sec.). În cazul materialelor vitroase sau a celor compozite care conțin o fază ductilă, trebuie practică o fisură ascuțită pentru a nu avea o anumită "colmatare" a vârfului acesteia, care să se reflecte asupra rezultatului măsurărilor (K_{Ic} aparent $> K_{Ic}$). Acest tip de fisură se poate obține prin mai multe metode:

1- fisurarea prin metoda penei: o pană metalică este introdusă într-o fisură practică anterior astfel încât să se producă o fisură în prelungirea creștăturii.

Dacă se va utiliza acest procedeu la materialele fragile, se poate întâmpla ca fisura să traverseze toată epruveta. Pentru a evita acest inconvenient se aplică sub creștătura mecanică o forță de compresiune astfel încât să se poată evita, și eventual stopa, fisurarea în această zonă;

2. - fisurarea prin șoc termic: fisura este obținută prin deplasarea unui punct cald, pe un anumit traseu stabilit dinainte pe probă. Dacă profilul fisurii obținute nu este regulat, se poate proceda la o încărcare lentă și controlată a fisurii prin solicitarea în același mod a epruvetei;

3 - fisurarea prin propagare controlată plecând de la pre-crestare mecanică;

4 - fisurare plecând de la urmele lăsate prin încercarea de duritate (materiale cu fragilitate ridicată).

Se pot obține probe fisurate dacă epruvetele se decupează din materiale ce conțin microfisuri încă din procesul de fabricare; de exemplu, microfisura indusă în jurul unei găuri cilindrice atunci când piesa este solicitată la compresiune.

Pentru măsurarea K_{Ic} este necesar a se cunoaște cu precizie, nu numai tensiunea aplicată în momentul ruperii, ci și lungimea fisurii a în punctul de instabilitate.

Se pot utiliza diferite metode de măsurare: metode optice, metode rezistente, metode prin ultrasunete, metode bazate pe curenți Foucault, metode bazate pe diferența de capacitate în momentul fisurării, etc.

Semnalăm epruvetele numite de "K constant" în care factorul de intensitate a tensiunilor nu depinde de lungimea a și atunci nu este necesară măsurarea exactă a lungimii fisurii.

5.2. Factorul de formă Y

Pentru măsurarea rezistenței la fisurare pot fi utilizate diferite tipuri de epruvete. Ele sunt concepute astfel încât să corespundă unui anumit mod de deschidere (în general *modul I*) cu o solicitare prin încovoiere sau tracțiune.

Pentru calculul K_{Ic} trebuie determinat mai întâi termenul Y din relația (5.1). Se consideră valoarea lui Y pentru proba crestată și prefisurată (fisura de dinainte de propagare). Această valoare depinde de profunzimea prefisurării, respectiv de termenul a/w în care a este lungimea prefisurii iar w , lățimea probei. Nu se ține cont în calculul valorii pentru termenul Y de factorul de corecție r_y , deci de zona plastică de la vârful fisurii. Valoarea critică a factorului de intensitate a tensiunii ce reprezintă tenacitatea la fisurare K_{Ic} se determină pentru acea valoarea a solicitării pentru care fisura începe să se propage instabil.

Expresia (5.1) se mai poate pune sub forma:

$$K_{Ic} = \sigma_f Y \sqrt{a} = \frac{\sigma_t}{\sqrt{w}} Y^* \text{ cu } Y^* = \sqrt{x} Y \quad (5.2)$$

Observații: Y și Y^* sunt două mărimi fără dimensiuni care se utilizează în mod frecvent. Expresia (5.2) arată că determinarea experimentală a lui K_{Ic} necesită cunoașterea precisă a factorului de formă. Pentru aceasta sunt două posibilități:

1) Se face o încercare de încovoiere a unei epruvete crestate după procedeele normalizate (ASTM) și se consultă datele existente pentru a obține valoarea factorului de formă. Inconvenientul acestui procedeu rezidă în faptul că factorul de formă Y a fost stabilit pentru oțeluri și pentru o geometrie de epruvetă dată. Acest inconvenient conduce în unele cazuri la o etalonare prealabilă.

2. Se trasează curba de etalonare $C=f(x)$ și se deduce factorul de formă Y (sau Y^*).

5.2.1. Determinarea factorului de formă pentru o epruvetă cu creștătură marginală, de tip **S.E.N.B.** (Single Edge Notched Beam Specimen), solicitată la încovoiere, figura 5.1

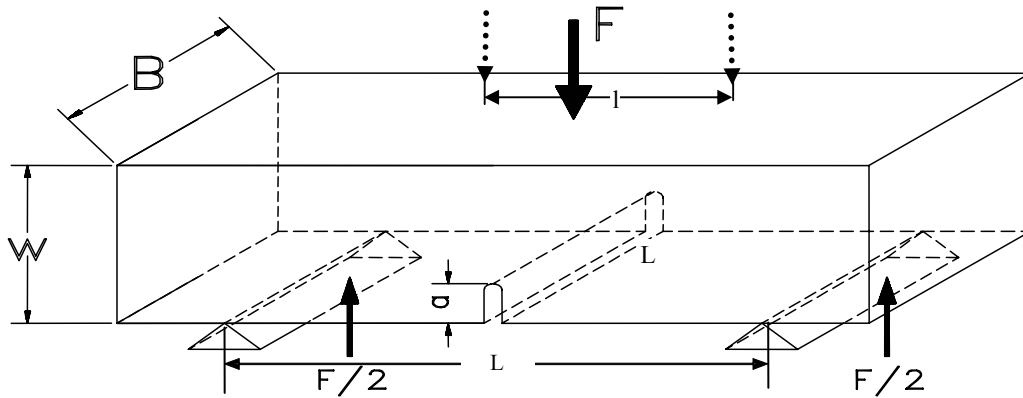


Fig. 5.1 Epruvetă de tip **S.E.N.B.**

- Încovoiere în patru puncte în absența creștăturii.

$$\sigma = \frac{3}{2} \frac{F(L-l)}{BW^2} \quad (5.3)$$

$$\delta = \frac{F}{2} \frac{3(L-l)}{YEBW^3} \left[L^2 - \frac{(L-l)^2}{3} \right] \quad (5.4)$$

în care:

- L - distanța dintre reazeme;
- l - distanța între punctele de aplicație a sarcinilor;
- σ – tensiunea aplicată;
- δ – săgeata maximă a probei la forța F.

La încovoierea în 4 puncte pentru K_{Ic} avem expresia:

$$K_{Ic} = \frac{3}{2} \frac{F_c(L-l)}{BW^2} Y \sqrt{a} \quad (5.5)$$

în care F_c este forța critică la care se produce fisurarea instabilă sau ruperea probei.

Observație: Unii autori dau următoarea relație pentru K_{Ic} :

$$K_{Ic} = \frac{3}{2} \frac{F_c(L-l)}{BW^{\frac{3}{2}}} Y^* \text{ cu } Y^* = \sqrt{x}Y \quad (5.6)$$

Această nouă expresie a factorului de formă poate induce o anumită confuzie dacă nu se face modificarea expresiei cu atenție. S-a văzut anterior că:

$$G_{Ic} = \frac{F_c^2}{2BW} \frac{dC}{dx} \quad (5.7)$$

$$G_{Ic} = \frac{K_{Ic}^2}{E'} \quad (5.8)$$

în care:

$E' = E$ pentru starea plană de tensiuni;

$E' = \frac{E}{1-\nu^2}$ pentru starea plană de deformații.

Expresiile (5.5), (5.7) și (5.8) conduc la:

$$\frac{dC}{dx} = \left[\frac{3(L-l)^2}{W} \right] \frac{xY^2(x)}{2E'B} \quad (5.9)$$

care devine:

$$C(x) = \left[\frac{3(L-l)}{W} \right]^2 \int \frac{xY^2(x)}{2E'B} dx + C(0) \quad (5.10)$$

Așa cum se poate remarca, expresia (5.9) permite definirea factorului de formă relativ la fiecare material și pentru diferite geometrii:

$$Y(x) = \left[\frac{W}{3(L-l)} \right] \sqrt{\frac{2E'B}{x} \frac{dC}{dx}} \quad (5.11)$$

Determinarea experimentală a lui Y constă în a stabili o curbă de etalonare $C=f(x)$ pentru un L/W bine definit, de a ajusta punctele experimentale cu un polinom de grad n și de a deduce factorul de formă în funcție de profunzimea relativă a creștăturii, dpe baza relației (5.11).

Pentru *încovoierea în 3 puncte* este suficient să considerăm $l=0$ în expresiile rezultate din încovoierea în 4 puncte.

Va rezulta:

$$K_{Ic} = \frac{3}{2} \frac{F_c \cdot L}{BW^2} Y \sqrt{a} \quad (5.12)$$

$$\delta = \frac{F}{4E'B} \left(\frac{L}{W} \right)^3 \quad (5.13)$$

$$C(o) = \frac{1}{4E'} \left(\frac{L}{W} \right)^3 \quad (5.14)$$

Metoda de calcul a tenacității se bazează pe variația complianței epruvetelor. Această metodă este riguroasă, necesitând un mare număr de încercări. Poate fi util să se facă o sortare a epruvetelor după diferitele norme, cele mai cunoscute fiind ASTM [341], pentru a utiliza în mod direct valorile parametrului Y care au fost prestabilite. Acestea se pot determina pe baza unei relații de forma:

$$Y = \sum_{n=0}^4 A_n x^n \text{ și } x = \frac{a}{W}$$

Pentru $0,15 \leq x \leq 0,55$, Brown și Srawley [34] au propus următorul tabel, în vederea calculului factorului de formă Y :

Tab. 5.1

Tipul încovoierii	L/w	A ₀	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄
4 puncte	-	1,99	-2,47	12,97	-23,17	24,80
3 puncte	4	1,93	-3,07	14,53	-25,11	25,80

Pentru $x \geq 0,5$ Wilson [69] propune pentru încovoierea în patru puncte relația:

$$Y = \left(\frac{3,99}{6} \right) \cdot x^{\frac{1}{2}} (1-x)^{\frac{3}{2}} \quad (5.15)$$

Pentru încovoierea în 3 puncte, Kendy, Bradt și Pindone [69], propun un factor de formă ai cărui coeficienți depind de L/W :

$$\begin{aligned} A_0 &= 1,9 + 0,0075 \frac{L}{W} & A_2 &= 1540 + 0,2175 \frac{L}{W} \\ A_1 &= -3,99 + 0,08 \frac{L}{W} & A_3 &= -26,24 + 0,2815 \frac{L}{W} \\ A_4 &= 26,38 - 0,145 \frac{L}{W} \end{aligned}$$

5.2.2. Epruvetă cu creștătură marginală în formă de V, figura 5.2

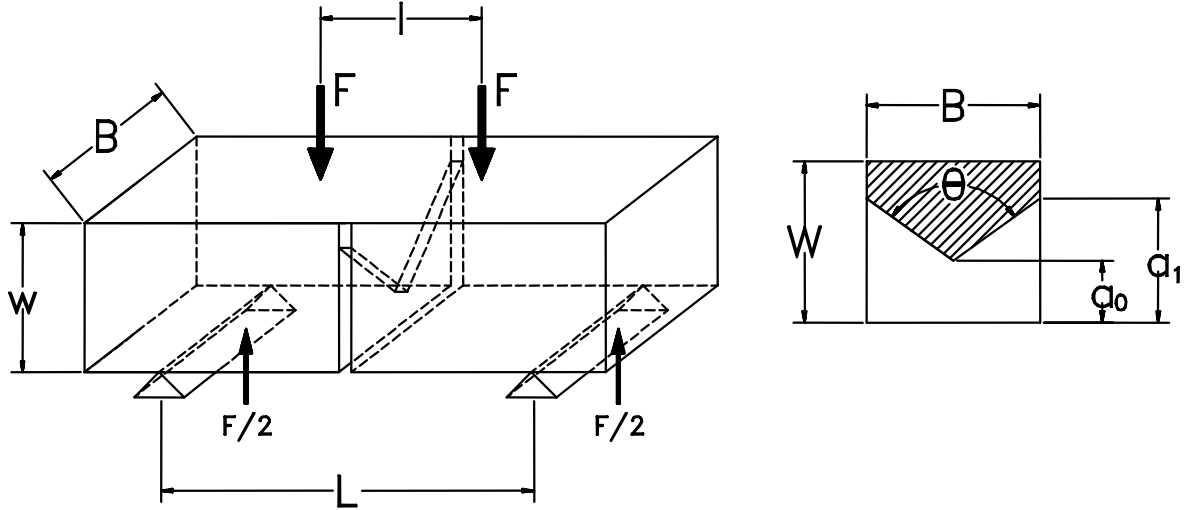


Fig.5.2. Epruvetă cu creștătură în V

- Încovoiere în 4 puncte:

$$K_{lc} = \frac{F_c}{B\sqrt{W}} \cdot Y \quad (5.16)$$

$$Y = \left(3,08 + 5a_0 + 8,33a_0^2 \right) \left(\frac{L-l}{W} \right) \left[1 + 0,007 \left(\frac{L \cdot l}{W} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \left(\frac{a_1 - a_0}{1 - a_0} \right) \quad (5.17)$$

în care:

$$\alpha_0 = a_0/W, \quad \alpha_1 = a_1/W$$

$$\alpha_1 = 1 \text{ și } 0,1 < \alpha_0 < 0,35$$

$$B/W = 0,8 \text{ și } L/W = 7,5; \quad l/W = 2,5$$

De asemenea se poate utiliza și următoarea expresie pentru factorul de formă Y :

$$Y = (2,92 + 4,52\alpha_0 + 10,14\alpha_0^2) \left(\frac{L-l}{w} \right) \left(\frac{\alpha_1 - \alpha_0}{1 - \alpha_0} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5.18)$$

- Încovoiere în 3 puncte:

$$K_{lc} = \frac{F_c}{B\sqrt{W}} \cdot Y_c(\alpha_0) \quad (5.19)$$

în care:

$$Y_c(\alpha_0) = 8,00 - 20,23\alpha_0 + 31,79\alpha_0^2 - 23,01\alpha_0^3 - 193,4\alpha_0^4$$

$$0,01 \leq \alpha_0 \leq 0,4 \quad (\alpha_0 = a_0/W)$$

$$\frac{L}{W} = Y, \quad \frac{W}{B} = 1,5 \quad \text{și} \quad \theta = 60^\circ$$

$$\alpha_1 = \alpha_0 + \frac{2}{3} \cos \frac{\theta}{2}$$

$$\alpha_1 = \alpha_0 + \frac{1}{\sqrt{3}} \quad (\theta = 60^\circ)$$

5.2.3. Epruveta de tracțiune compactă cu o singură laterală, figura 5.3

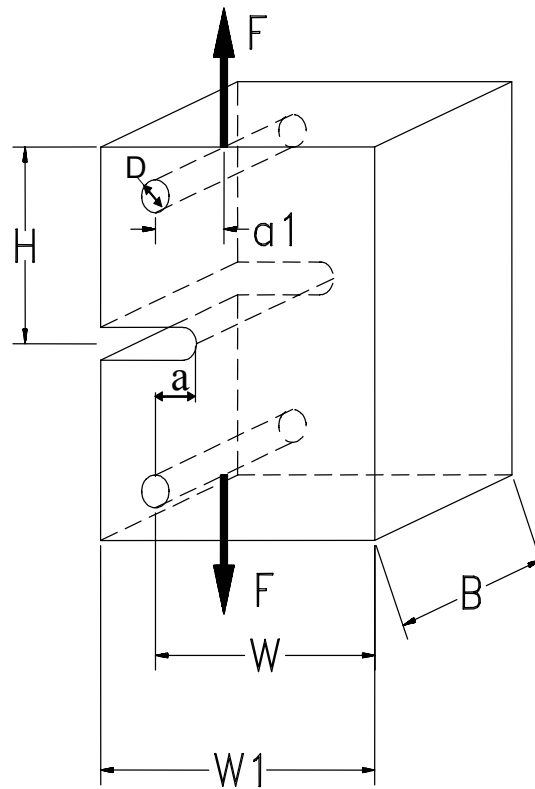


Fig.5.3. Epruveta de tracțiune compactă (C.T.)

Pentru acest tip de epruvetă tenacitatea la fisurare este dată de relația:

$$K_{Ic} = \frac{F_c}{BW} \cdot Y \sqrt{a} \quad (5.20)$$

pentru: $W=2B$; $W_1 = 2,5B$; $H = 1,2 B$; $D=0,5 B$ și

$$Y = 29,6 - 185,5x + 635x^2 - 1017x^3 + 638,9x^4 \quad (5.21)$$

în care $x = \frac{a}{W}$.

5.2.4. Epruvetă în dublă consolă cu crestătură (D.C.B)

Aceste epruvete, *figura 5.4*, pot avea sau nu canale marginale pentru ghidarea propagării fisurii după un plan perpendicular pe direcția sollicitării. Relațiile de calcul pentru K_{Ic} sunt:

$$K_{Ic} = \frac{F_c a}{BH^{\frac{3}{2}}} \cdot Y \quad \text{sau} \quad K_{Ic} = \frac{F_c a}{H(B_m BH)^{\frac{1}{2}}} \cdot Y \quad (5.22)$$

$$\text{cu } Y=3,46 \left[1,32 \left(\frac{H}{a} \right) + 0,542 \left(\frac{H}{a} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5.23)$$

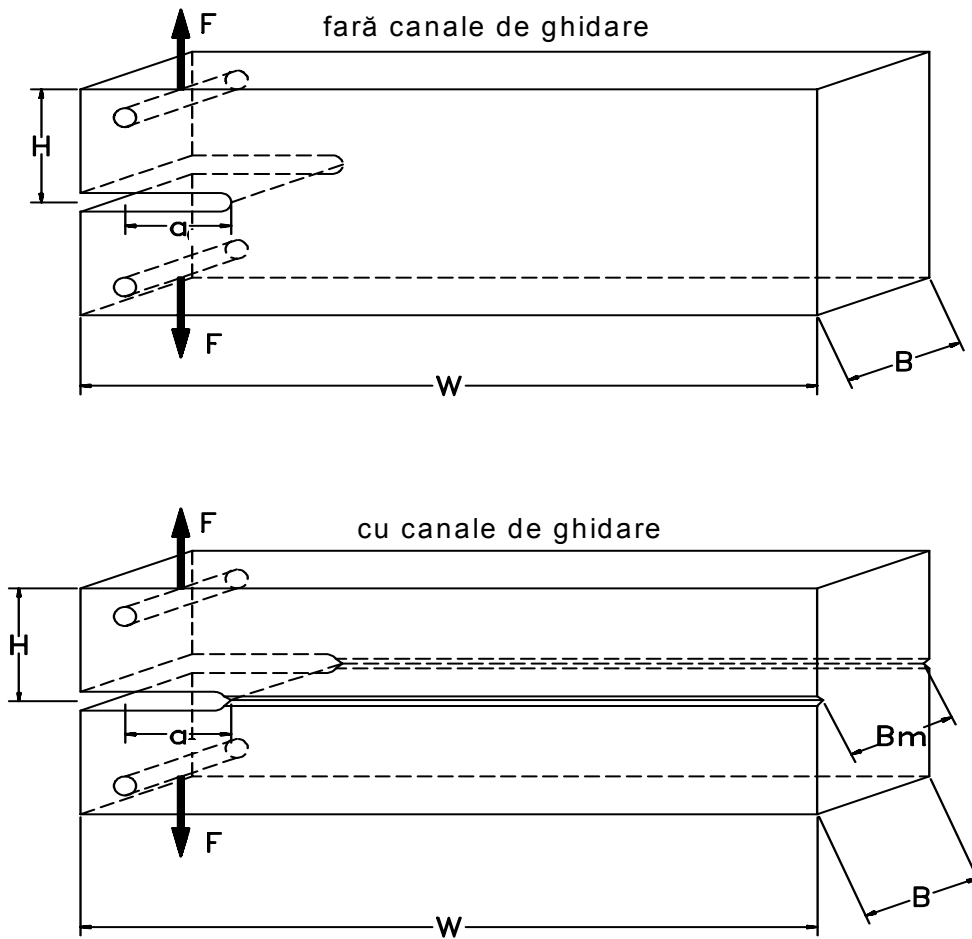


Fig.5.4. Epruvetă D.C.B.

Acestor patru tipuri de epruvete, li se pot adăuga și alte tipuri pentru care valoarea lui K_{Ic} este independentă de lungimea fisurii a .

5.2.5. Epruvete cu K constant

Aceste epruvete, sunt foarte utilizate pentru materiale cu o structură grosieră (poroasă) sau pentru măsurarea K_{Ic} la temperatură înaltă. Aceste epruvete sunt utile pentru măsurarea vitezei de propagare a fisurii (creșterea lentă sau subcritică). Acestea sunt:

a)- epruvetă de dublă torsiune cu canal de ghidare, **D.T.** (double torsion).

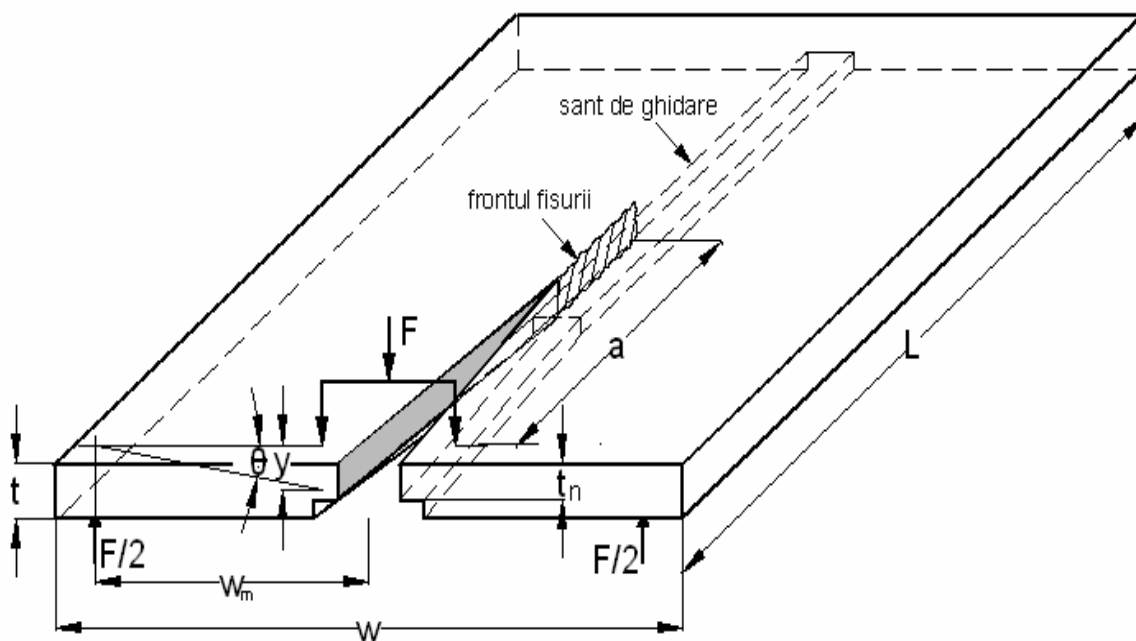


Fig. 5.5. Epruvetă de tip **D.T.**

Factorul critic de intensitate a tensiunii este:

$$K_{Ic} = FW_m \left[\frac{3(1+\nu)}{Wt^3a} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5.24)$$

b)- Epruvete de clivaj cu canale laterale în formă de V, **T.D.C.B.** (Tapered Double Cantilever Beam).

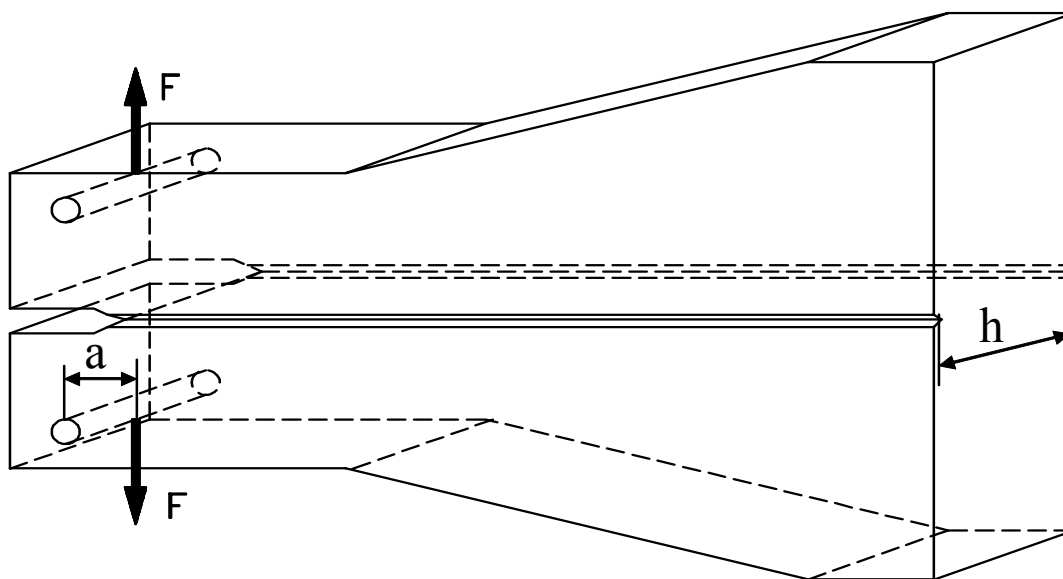


Fig. 5.6. Epruvetă de tip **T.D.C.B**

Factorul critic de intensitate a tensiunii este:

$$K_{lc} = 2F \left(\frac{m}{b \cdot a} \right)^{\frac{1}{2}} \text{ cu } m = \frac{1}{h} + \frac{3a^2}{h^2} \quad (5.25)$$

Pentru a avea un K cu valoare constantă epruveta trebuie astfel aleasă încât să prezinte un m constant.

c)- Epruvetă cu canale laterale pentru care avem momentul constant (CM)

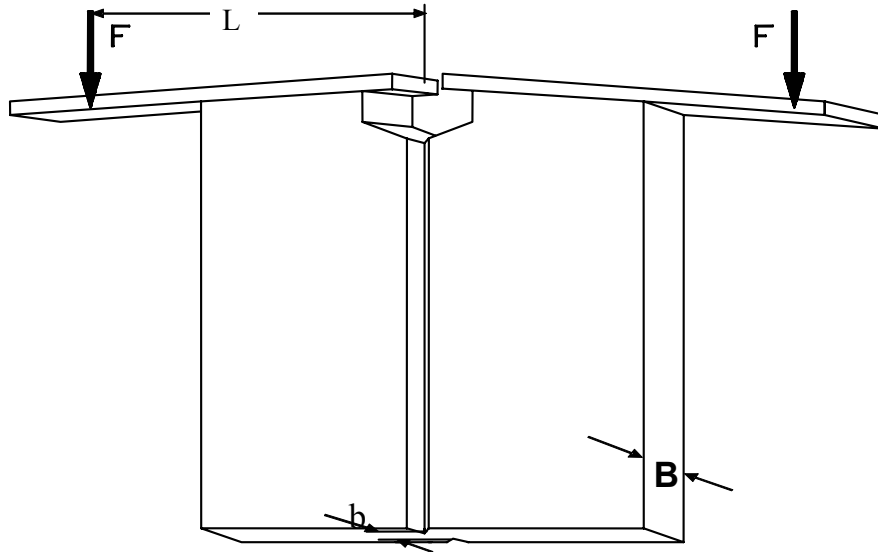


Fig. 5.7. Epruveta de tip C.M.

Factorul critic de intensitate al tensiunii este:

$$K_{lc} = \frac{F \cdot L}{\sqrt{I \cdot b}} \text{ sau } K_{lc} = \frac{F \cdot L}{\sqrt{I \cdot B}} \quad (5.26)$$

în funcție de prezența sau nu a creștăturii pe toată lungimea epruvetei. I este momentul de inerție al brațului prin care se face solicitarea.

Alegerea unei configurații de epruvetă în vederea determinării K_{lc} pentru un material dat va depinde de condițiile concrete de experimentare și fabricare:

- facilități de fabricare;
- dificultatea de a face o măsurătoare precisă (funcție de material, de condițiile exterioare cum ar fi temperatura de încercare sau cea a mediului înconjurător);
- cantitatea de material disponibil.

Trebuie ca dimensiunile epruvetei să fie astfel alese încât încercarea să fie reprezentativă pentru microstructura materialului. Mai mult, geometria epruvetei trebuie să respecte anumite reguli fundamentale fără de care încercarea nu ar putea fi considerată valabilă.

În general, în cazul metalelor și aliajelor metalice apare tendința de a se utiliza cel mai adesea epruveta C.T. (care consumă cel mai puțin material).

În cazul materialelor fragile (oțeluri de scule, refractare, fonte, ceramice) se utilizează în general epruveta S.E.N.B. (care este ușor de fabricat).

Epruveta D.C.B. este de asemenea utilizată atunci când se dorește studierea atât a inițieri cât și a propagării fisurii.

5.3. Relația între energia disponibilă pentru propagarea fisurii G_{lc} și energia superficială unitară la fisurare γ_f

În condițiile determinării lui $Y(x)$, relația (5.11), **Turner** [69] a arătat că se pot lega γ_f și G_{lc} introducând o corecție geometrică pentru cazuri concrete de solicitare și probe finite. S-a văzut anterior că:

$$\gamma_f' = \frac{1}{2B(W-a)} \int_0^{u_f} F du$$

Pentru un comportament liniar, energia disponibilă pentru propagarea fisurii este:

$$W_e = \int_0^{u_f} F du = \frac{1}{2} F_f u_f = \frac{1}{2} F_f^2 C(x) \quad (5.27)$$

în care:

F_f este forța la care fisura începe să se propage;

u_f reprezintă deplasarea punctelor de aplicație a forței la atunci când aceasta ajunge la valoarea F_f . Din relația (3.27) deducem:

$$\frac{1}{2} F_f^2 = \frac{BW G_{lc}}{\frac{dC}{dx}}$$

și ca urmare:

$$W = \frac{W B G_{lc} C(x)}{\frac{dC}{dx}} \quad (5.28)$$

Având în vedere următoarea notație:

$$\phi(x) = \frac{C(x)}{\frac{dC}{dx}} \quad (5.29)$$

și faptul că din relația (5.10) rezultă:

$$\frac{dC}{dx} = \left[\frac{3(L-l)}{W} \right]^2 \frac{xY^2(x)}{2E'B}$$

vom avea:

$$\phi(x) = \frac{\int xY^2(x)dx + 2E'BW \left[\frac{W}{3(L-l)} \right]^2 C(o)}{xY^2(x)} \quad (5.30)$$

cu

$$C(o) = \frac{u(o)}{F} = \frac{3}{2} \frac{L-l}{YEBW^3} \left[L^2 - \frac{(L-l)^2}{3} \right] \quad (5.31)$$

În final:

$$\gamma_f' = \frac{B W G_{lc} \Phi(x)}{2B(W-a)} = \frac{G_{lc} \phi(x)}{2(1-x)} \quad (5.32)$$

$$\gamma_f' = \frac{\eta G_{lc}}{2} \quad (5.33)$$

$$\eta = \frac{\phi(x)}{1-x} \quad (5.34)$$

de unde:

$$G_{Ic} = \frac{2\gamma_f'}{\eta} \quad (5.35)$$

Factorii ϕ și η sunt dați în funcție de geometria epruvetei și pot fi determinați plecând de la relațiile (5.30) și (5.34).

Se poate determina γ_f' pe baza căruia se obține G_{Ic} . Pentru aceasta este suficient să se traseze variația energiei disponibile W_e în funcție de B (grosimea probei) și W (lățimea probei) și ϕ sau ($2\gamma_f'$) în funcție de η , de unde se poate apoi deduce ușor mărimea critică a lui G_{Ic} .

5.4. Condiții de validitate a încercărilor de tenacitate la fisurare

Fie măsurarea tenacității, ca factor critic de intensitate a tensiunilor, pentru un anumit material. Pentru ca valoarea lui K , găsită experimental, să fie valoarea critică a unui material este necesar să fie îndeplinite anumite condiții. Ele sunt în principal în număr de trei:

1. Prima este legată de dimensiunile epruvetei: grosime și lățime;
2. Condiții legate de geometria și mărimea fisurii: lungimea și raza la vârful creștăturii;
3. Comportamentul macroscopic al epruvetei la rupere (dacă ruperea nu este brutală) pe baza căruia are loc validarea încercării și definirea încărcării critice.

Determinarea K_{Ic} se face plecând de la formulele stabilite în cadrul Mecanicii Liniare a Rupării, defectul considerat fiind fisura creată artificial. Aceste formule nefiind valabile decât în domeniul elastic, este important să avem aceleași condiții de deformare atât timp cât deformația plastică nu se manifestă la nivelul global al probei. Ca urmare, epruveta în ansamblul său trebuie să se comporte elastic.

5.4.1. Dimensiunile epruvetei

Principalele dimensiuni ale epruvetelor SENB, CT și DCB ce trebuie avute în vedere sunt: B - grosimea și W - lățimea.

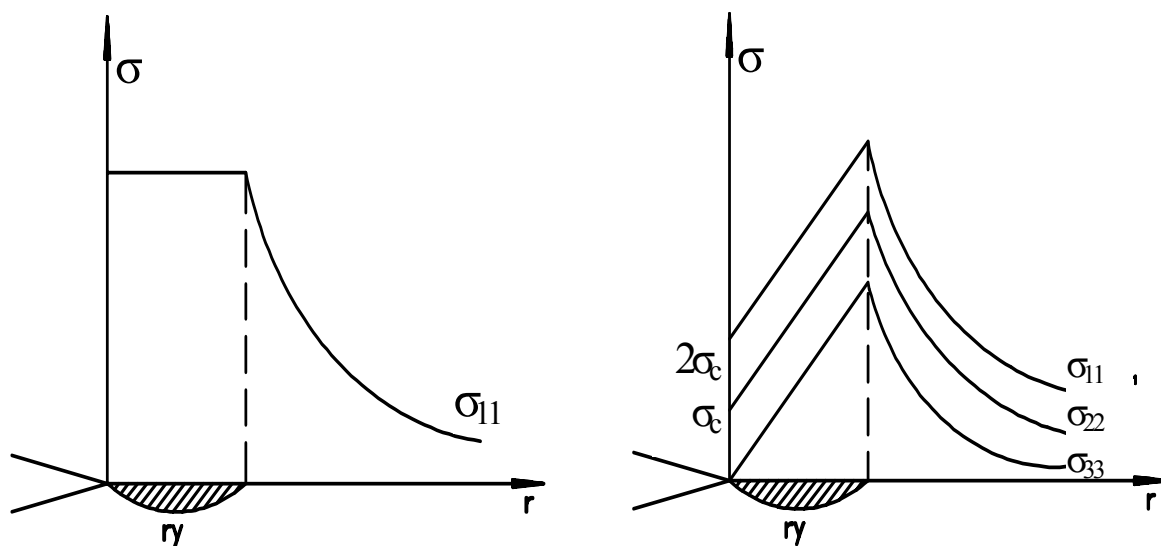
Deformația în imediata vecinătate a fisurii nu este niciodată perfect elastică, apărând o anumită plasticitate care poate deveni foarte importantă, în special la temperaturi înalte. Este suficient să se considere o fisură de mărime echivalentă ($a+r_y$), în care r_y este raza zonei plastice, pentru a ține cont de efectele plasticității, (plasticitate localizată), figura 5.8.

Valoarea lui r_y este în funcție de tenacitatea materialului (K_{Ic}) și de limita de curgere σ_c :

$$r_y = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{k_1}{\sigma_c} \right)^2 \quad \text{stare plană de tensiuni} \quad (5.36)$$

$$r_y = \frac{1}{6\pi} \left(\frac{k_1}{\sigma_c} \right)^2 \quad \text{stare plană de deformații} \quad (5.37)$$

în care σ_c are valoarea maximă pentru $K_I = K_{Ic}$



a) stare plană de tensiuni

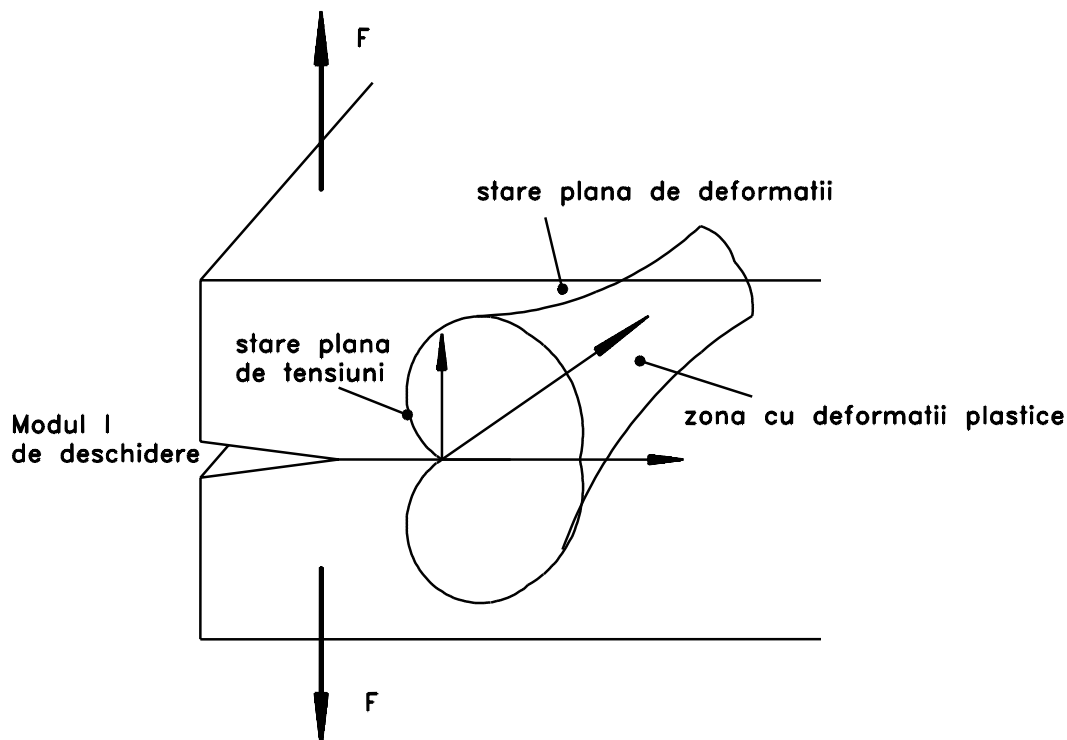
b) stare plană de deformății

Fig.5.8. Zona plastică de la vârful fisurii

Pentru a rămâne în condițiile de validitate (comportamentul macroscopic al epruvetei să fie de tip elastic), grosimea epruvetei trebuie să fie superioară mărimii zonei plastice. Aceasta din urmă, (zona plastică) este proporțională cu $(K_{IC}/\sigma_c)^2$, condiția scriindu-se astfel:

$$B \geq \alpha(K_{IC}/\sigma_y)^2 \quad \text{cu} \quad \alpha \geq 2,5 \quad (5.38)$$

În vecinătatea fisurii se stabilește un câmp de deformății plane, *figura 5.9*.

**Fig. 5.9. Morfologia zonei de deformăție în cursul propagării unei fisuri (modul I)**

În materialele nefragile sau în prezența unei zone de disipare a energiei în frontul fisurii, zona de deformare plastică tinde să relaxeze tensiunile și conduce la regiuni mai dezvoltate în tensiuni plane la suprafața probei. În aceste condiții are loc formarea unei suprafețe de rupere cu marginile mai mari sau mai mici: prezența unei suprafețe de rupere mai mult sau mai puțin înclinată este semnificativă pentru tendința de rotire a planului fisurii, *figura 5.10*. Această rotire a planului fisurii în timpul propagării se produce atunci când zona plastică de la vârful fisurii nu este neglijabilă (vizavi de dimensiunile epruvetei). Măsurarea tenacității se poate face, în aceste condiții, pentru valorile K_{Ic} superioare lui K_{Ic} (în afară de grosimile foarte mici ale probei).

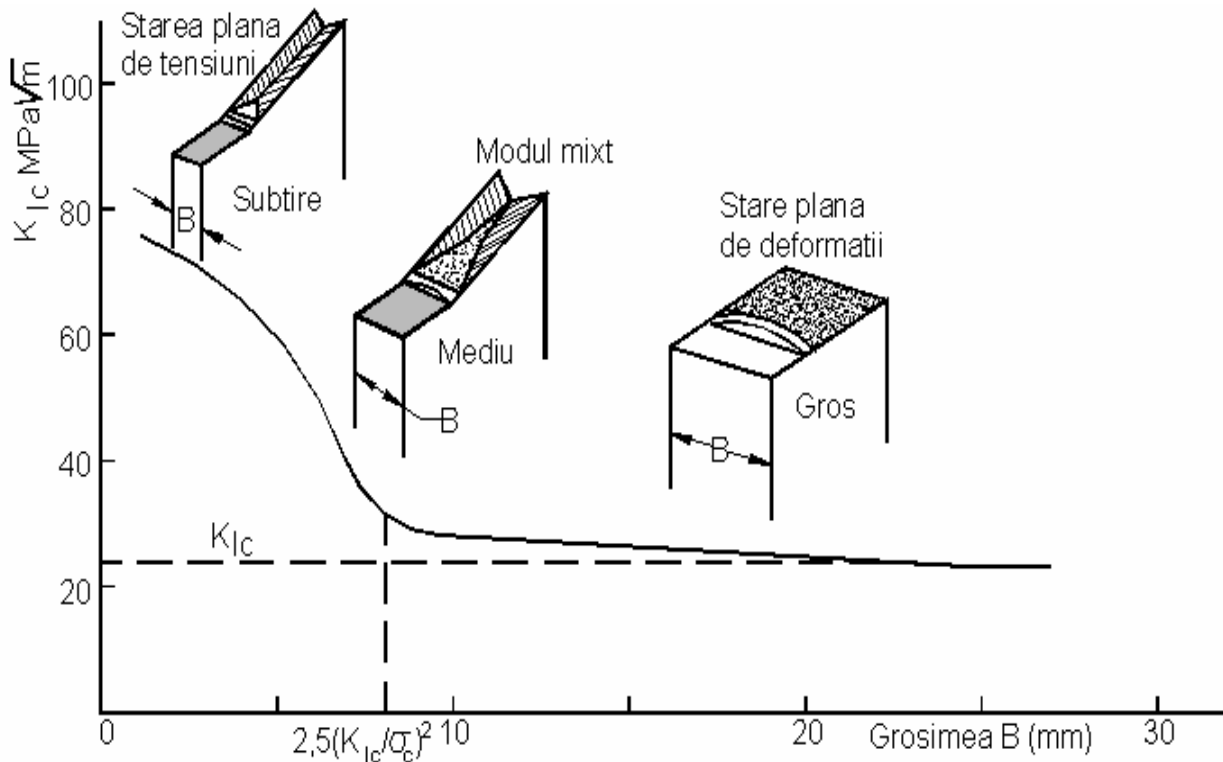


Fig.5.10. Variația K_{Ic} în funcție de grosimea epruvetei

Se consideră în general că propagarea fisurii are loc în *modul I* atunci când grosimea B este superioară valorii $2,5\left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_c}\right)^2$.

În concluzie, nu există o interferență a zonei plastice cu suprafața epruvetei și pe de altă parte solicitarea rămâne în cadrul stării plane de *deformație* dacă grosimea epruvetei satisface condiția:

$$B \geq 2,5\left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_c}\right)^2 \quad (5.39)$$

S-a pus condiția prealabilă ca, la încercările pentru determinarea tenacității, probele să nu prezinte o deformare plastică de ansamblu. Pentru o epruvetă ce conține o fisură care este supusă la solicitare exterioară, planul de fisurare (Q), *figura 5.11*, este cel în care deformarea plastică riscă să se generalizeze și să se întindă pe toată lățimea. În cazul unei plăci cu fisură centrală supusă unei tensiuni exterioare σ , se poate arăta că nu există deformare plastică generalizată decât dacă este respectată următoarea inegalitate:

$$\frac{K_{Ic}}{\sigma_c \sqrt{W}} < f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (5.40)$$

Termenul $\frac{K_{Ic}}{\sigma_c \sqrt{W}}$ trece printr-un maxim atunci când fisura ocupă o treime din lăţime. Pentru această valoare a lui a/W , concluzia stabilită mai sus se scrie astfel:

$$W > 5 \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_c} \right)^2 \quad (5.41)$$

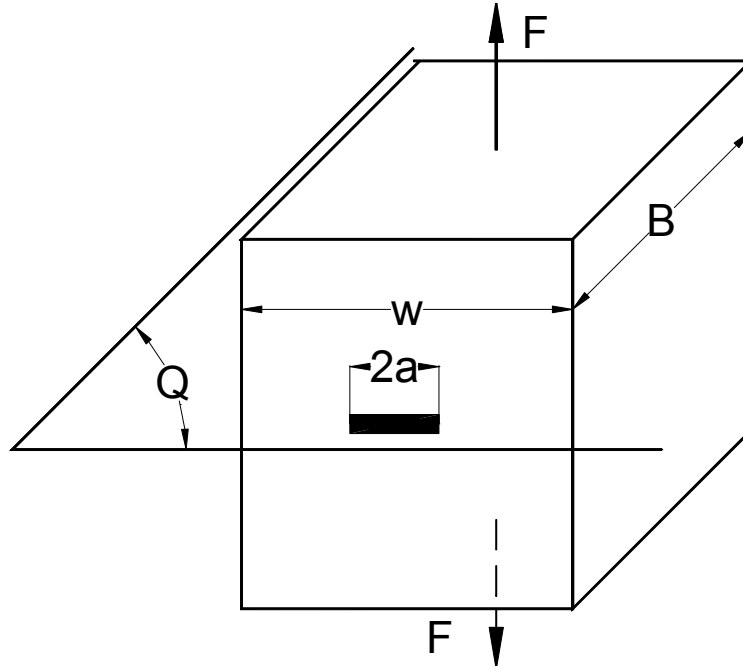


Fig.5.11. Placă cu fisură centrală

În aceste condiții este necesar ca lăţimea epruvetei W să aibe o valoare suficientă pentru a nu exista deformare plastică generalizată înainte ca fisura să se propage.

5.4.2. Dimensiunile și geometria fisurii

În cazul unei plasticități limitate la vârful fisurii (modelul Irwin), profilul tensiunilor în vecinătatea fisurii poate corespunde unei fisuri fictive de lungime $(a+r_y)$, trunchiată la valoarea $\sigma_y = \sigma_c$. Câmpul tensiunilor astfel stabilit nu este valabil decât în imediata vecinătate a fisurii, adică, pentru o distanță foarte mică în fața vârfului acesteia. În consecință, întinderea zonei plastice trebuie să fie mică în fața fisurii. În general se admite că trebuie să avem:

$$\frac{a}{r_y} \geq 50 \quad (5.42)$$

Această condiție trebuie să fie satisfăcută în cazul încercărilor pentru determinarea tenacității în care r_y este dat de relația:

$$r_y = \frac{1}{50} \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_c} \right)^2 \quad (5.43)$$

Pentru a se respecta această condiție, mai trebuie să avem și o stare plană de deformare și de asemenea să avem *modul I* de deschidere a fisurii. Astfel:

$$a > 2,5 \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_c} \right)^2 \quad (5.44)$$

în care a este lungimea fisurii inițiale înainte de propagare. Această condiție este considerată ca fiind imperativă pentru validarea încercării.

Influența valorii profunzimii relative a fisurii, $\frac{a}{W}$, asupra valorii măsurate a lui K_{Ic} nu este sistematică.

O valoare admisă în mod obișnuit, care ține cont de întinderea zonei plastice este: $W-a=a$. Aceasta corespunde unei valori pentru care $\frac{a}{W} = 0,5$. În fapt, polinoamele Y definite pentru diferite tipuri de epruvete sunt calculate pentru un domeniu a/W dat. Astfel în cazul epruvetelor SENB, parametrul Y dat de Brown și Seawley (ASTM) este stabilit pentru $0,1 < a/W < 0,5$, experiența arătând că, cele mai bune rezultate sunt obținute pentru $a/W \approx 0,4$ (se obține un minim de dispersie a rezultatelor).

Un parametru foarte important în ceea ce privește geometria fisurii este *raza de la vârful creștăturii*, ρ .

Raza de la vârful creștăturii trebuie să fie cât mai mică posibil pentru a ne apropia de condițiile fisurii Griffith. Această condiție este în general respectată atunci când fisura este realizată prin oboseală, prin șoc termic sau prin propagare lentă, dar cu o prefisurare mecanică.

Irwin a arătat că, pentru o tensiune nominală σ dată, factorul de intensitate a tensiunilor este dat prin:

$$K_I = \lim_{\rho \rightarrow 0} \frac{\sqrt{\pi}}{2} \sigma \sqrt{\rho} \quad (5.45)$$

în care ρ este raza la vârful creștăturii.

De aici se deduce că pentru o valoare finită a lui ρ , factorul K_I depinde de rădăcina pătrată a razei de la vârful creștăturii. Acest lucru se verifică experimental și se poate observa pentru anumite materiale la care, pentru o valoare inferioară unei valori ρ_0 , curba $K_{IQ}=f(\sqrt{\rho})$ prezintă un palier orizontal.

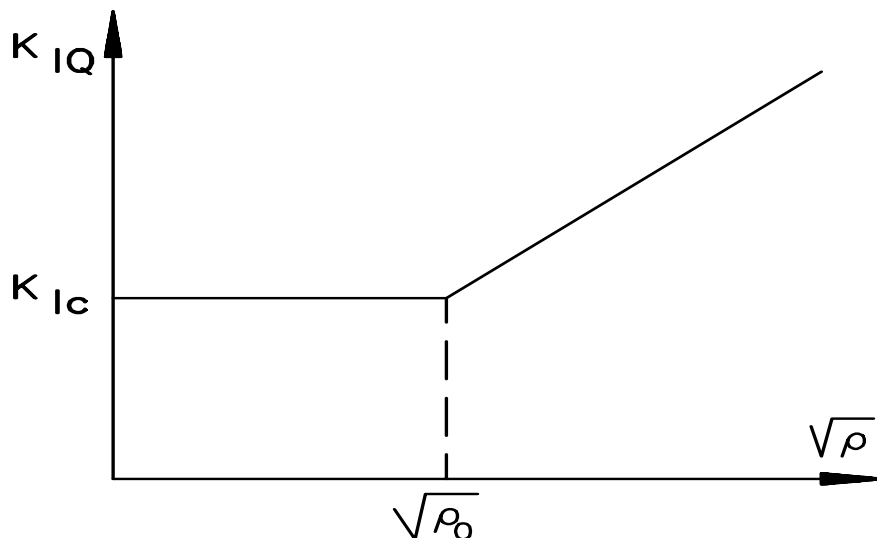


Fig.5.12. Variația factorului de intensitate a tensiunii cu raza la vârful creștăturii

În acest caz:

$$K_{IQ} = K_{Ic} + A(\rho) \quad (5.46)$$

unde $A(\rho)$ este în funcție de raza fisurii: $A(\rho) = 0 \quad \rho \leq \rho_0$
 $A(\rho) \neq 0 \quad \rho > \rho_0$.

în care ρ_0 este numită acuitatea (ascuțirea) limitei efective, iar pentru $\rho \leq \rho_0$ valoarea lui K_{IQ} măsurată corespunde cu cea măsurată pentru K_{Ic} .

Pentru a fi siguri că nu măsurăm valori supraestimate ale tenacității ($K_{IQ} > K_{Ic}$) se vor utiliza diferite raze la vârful creștăturii și ne vom asigura că tenacitatea măsurată este independentă de ρ . Epruvetele de încercare normalizate (SENB, CT și DCB) au dimensiunile astfel încât: $B=a=W/2$ ceea ce permite ca din cele trei condiții privind grosimea și lățimea epruvetei și lungimea fisurii, să rămână una singură.

5.4.3. Deviația în raport cu comportamentul linear elastic: determinarea încărcării critice și limita de validitate.

Condițiile de dimensiuni și de geometrie fiind amintite anterior, calculul riguros al lui K_{Ic} necesită cunoașterea precisă a mărimii defectului și a încărcării critice în același moment, al ruperii.

Plasticitatea fiind presupusă în totalitate absentă la nivelul **global** al probei, *măsurarea complianței* permite legarea mărimii fisurii de rigiditatea epruvetei în momentul ruperii.

Fie P^* valoarea solicitării critice pentru care fisura începe să se propage. În cele ce urmează se evidențiază cazurile pentru care ruperea poate fi brutală (catastrofală) sau controlată (începând cu o propagare lentă).

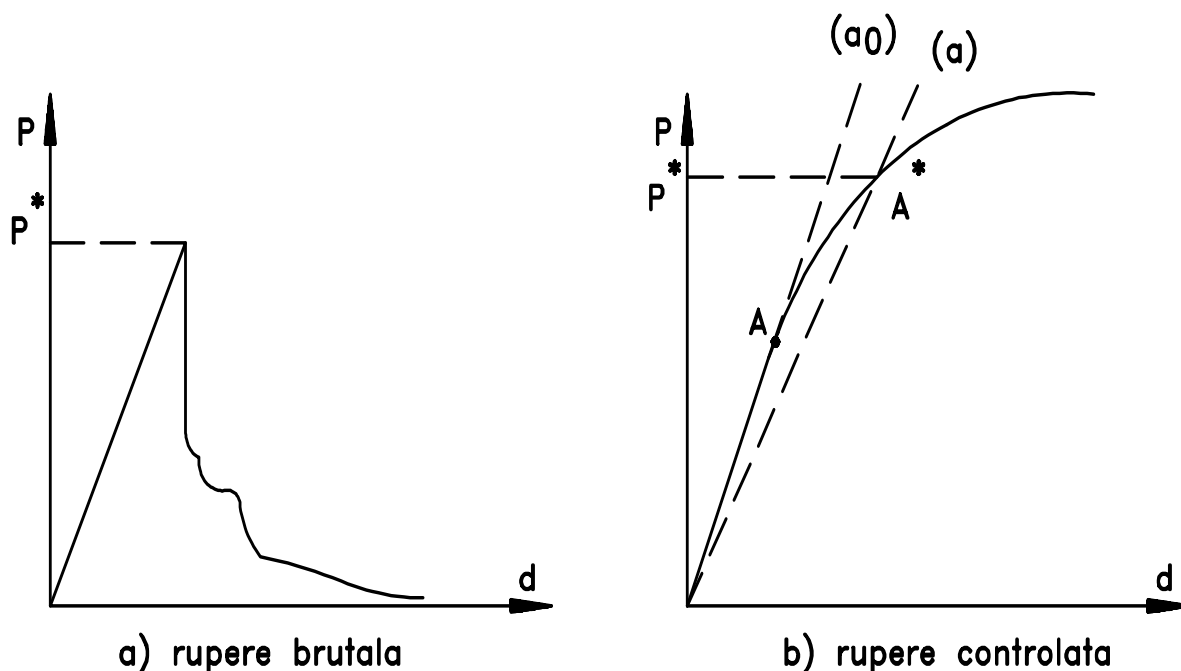


Fig.5.13. Diagrama forță deplasare în cadrul unei încercări de tenacitate

Cazul unei rupei brutale (figura 5.13a)

Încărcarea maximă se determină fără dificultăți: $P^* = P_{\max}$. Valoarea lui K_{Ic} se deduce pentru P_{\max} și lungimea a pentru fisură, în momentul ruperii.

Cazul în care începutul fisurii este cu propagare lentă (figura 5.13b)

Presupunem că diagrama $P - d$ are o creștere constantă. Problema este de a determina încărcarea critică P^* . O metodă a fost stabilită de Srawley [281] și normalizată prin ASTM E399.

Într-o primă aproximare se poate admite că forma înregistrată a diagramei se datorește creșterii fisurii. Se procedează atunci ca la măsurarea limitei elastice convenționale (la 0,2%):

- se alege limita elastică convențională (la 0,2%);
- se alege pentru P^* valoarea pentru care fisura se alungește într-o anumită cantitate care este fixată la 2% P^* ;
- în aceste condiții se obține fără probleme punctul A^* (figura 5.13b), datorită etalonării prealabile din care a rezultat curba de complianță $C(a)$ a probei considerate.

Pentru epruvetele normalizate, în diagrama $P-d$ o creștere a fisurii cu 2% corespunde în fapt cu o diminuare a pantei cu 5% (încercarea de încovoiere) sau cu 4% (încercarea de tracțiune). Dacă materialul prezintă numai un fenomen de creștere lentă a fisurii (fără dezvoltarea zonei plastice) este suficient să se determine P^* și lungimea reală corespunzătoare a defectului, pentru a putea calcula K_{Ic} .

În cazul în care există o anumită plasticitate (comportament elasto-plastic) este imposibil de a distinge propagarea adevărată a fisurii de dezvoltarea zonei plastice. În aceste condiții se dorește elaborarea unei metode de "extragere", considerând o alungire de 2% a fisurii de unde va rezulta P^* . Astfel vom avea pentru propagarea fisurii cu valoarea da , următoarea relație:

$$da > r_y \text{ pentru } \Delta a_{(app)} = da + r_y = 0,02 \cdot a \quad (5.47)$$

Variația corespunzătoare a complianței va fi:

$$dC(a) = \frac{\partial C}{\partial a}(da + r_y) \quad (5.48)$$

Figura 5.14 exprimă geometric această variație.

Se presupune că segmentul CB corespunde efectului zonei plastice, iar BA al celei corespunzătoare propagării reale a fisurii.

Condiția $da > r_y$, pentru o încărcare P^* se traduce geometric prin: $B^*A^* > C^*B^*$. Să încercăm să exprimăm această relație plecând de la curba înregistrată în cadrul unei încercări:

- CB este proporțional cu P^3 (atât timp cât r_y este proporțional cu P^2).
- încărcarea $0,8 \cdot P^*$ este suficient de mică pentru a nu avea încă o propagare adevărată a fisurii
- C'A' se datorește numai zonei plastice.

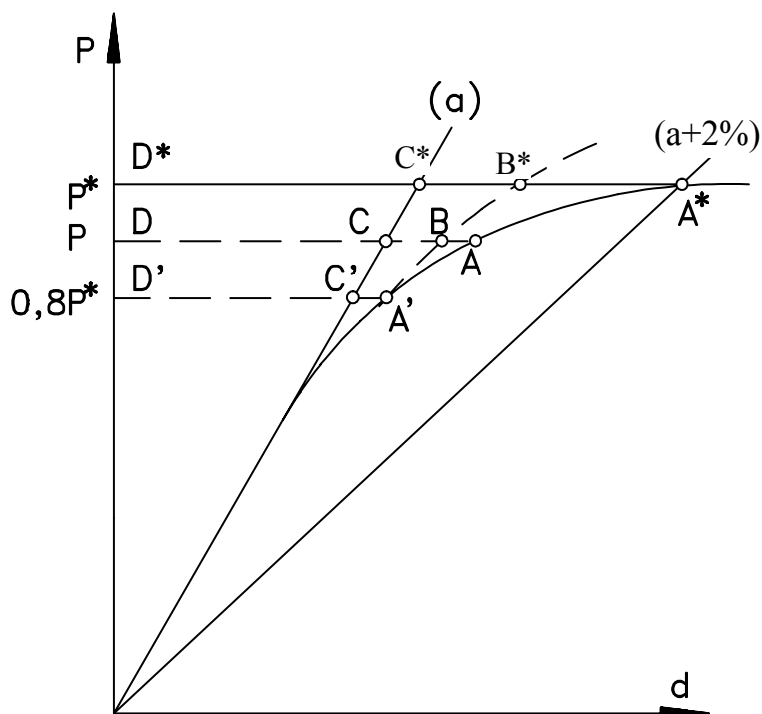


Fig. 5.14. Curba forță-deplasare

Ca urmare vom avea:

$$\frac{C^*B^*}{C'B'} = \left(\frac{1}{0,8} \right)^3 \approx 2 \quad (5.49)$$

iar condiția $da > r_y$ se scrie în funcție de curba înregistrată astfel:

$$A^*C^* > 2A'B' \quad (5.50)$$

Dacă există un maximum între P^* și $0,8P^*$ aceasta va fi valoarea considerată ca încărcare la rupere convențională (P_Q), cazurile B și C din figura 5.15.

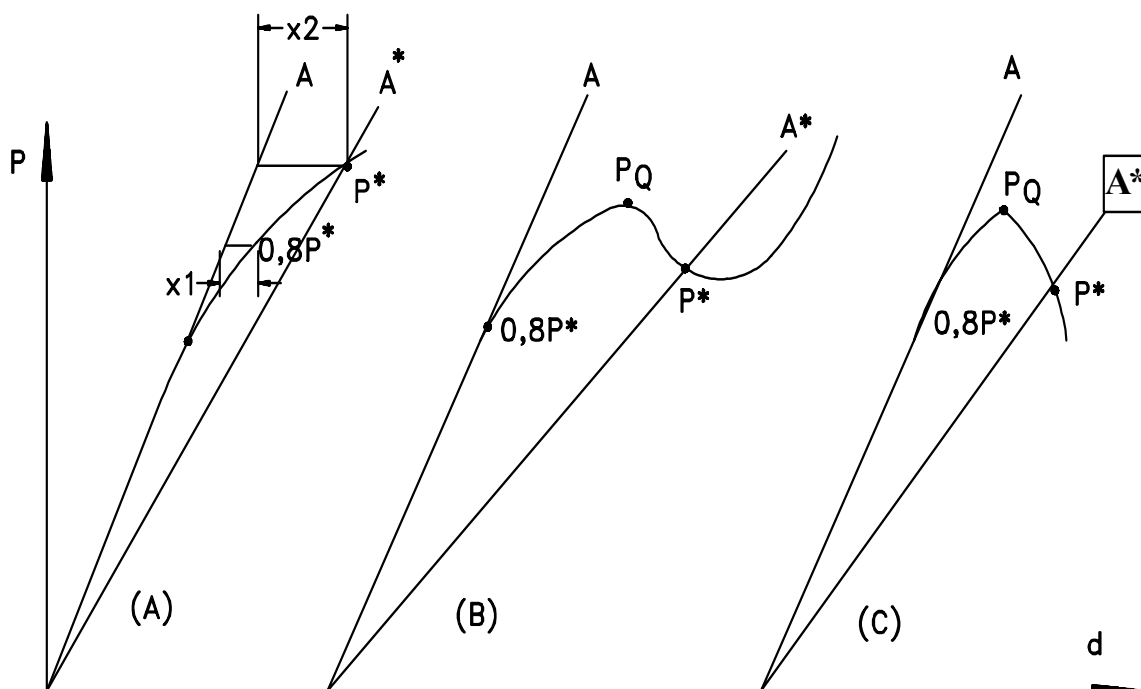


Fig. 5.15. Diferite tipuri de curbe caracteristice

Raportul deviației de la liniaritate între P^* (valoarea X_2) și $0,8 P^*$ (valoarea X_1) trebuie să fie mai mare ca 4.

În general se poate considera ca solicitare critică valoarea lui P_{\max} , cu condiția ca

$$\frac{P_{\max}}{P^*} \leq 1,1 \quad (5.51)$$

Pentru ca încercarea efectuată în vederea determinării lui K_{Ic} să fie valabilă, trebuie mai întâi să respectăm condițiile asupra dimensiunilor epruvetei. Dacă sunt îndeplinite aceste condiții și dacă diagrama încărcare-deplasare se abate de la liniaritate, trebuie verificat criteriul geometric (abaterea de la liniaritate se ia între P^* și $0,8 P^*$). Dacă nu sunt îndeplinite condițiile de validitate se intră în domeniul comportamentului elasto-plastic (Mecanica neliniară a ruperii): în aceste condiții ruperea trebuie caracterizată pe baza altor criterii.

Tenacitatea la rupere, exprimată în termenii K_{Ic} sau G_{Ic} corespunde punctului de instabilitate a fisurii supuse la o anumită tensiune. În cazul unei propagări instabile (catastrofale) utilizarea unui astfel de criteriu (K_{Ic}), este de ajuns pentru a caracteriza comportamentul la rupere al materialului. Din contră, dacă propagarea este stabilă, adică există în interiorul materialului mecanisme de absorbție a energiei care controlează propagarea fisurii, numai criteriul K_{Ic} nu este suficient. Trebuie să se definească tenacitatea (K sau G) pentru fiecare creștere Δa a fisurii: acest lucru conduce la curbele de rezistență determinate în cadrul propagării unei fisuri sau curbele R (K_R , G_R) care permit caracterizarea comportamentului unor asemenea materiale (criteriul inițierii propagării). Conform rezultatelor experimentale, viteza de încercare nu are o influență sensibilă asupra parametrului K_{Ic} . Viteza obișnuită de solicitare pentru materialele fragile corespunde unei viteze a traversei mașinii de încercat de 0,1 mm/min. În fapt, dacă viteza de solicitare este prea lentă, se pot produce diferite fenomene care vor perturba măsurarea lui K_{Ic} :

- modificarea lungimii defectului a_0 (creștere lentă);
- modificarea proprietăților materialului în fața fisurii;
- fenomene la vârful fisurii care modifică: raza la vârful creștăturii, curgerea plastică, reacția chimică, etc..

Dacă viteza de solicitare este prea rapidă, comportamentul materialului este de tip șoc și se poate utiliza atunci un coeficient dinamic, K_{ID} .

5.4.4. Influența grosimii epruvetelor asupra tenacității la rupere

În cele ce urmează se va analiza influența grosimii epruvetelor asupra tenacității la rupere K_{Ic} . Tenacitatea la rupere a unui material depinde de volumul de material capabil a se deforma plastic înainte de rupere. În aceste condiții este de așteptat ca tenacitatea la rupere să depindă direct de grosimea epruvetei încercate, *figura 5.16*.

Atunci când epruveta este subțire, de exemplu are grosimea B_1 , posibilitățile de apariție a deformațiilor plastice la vârful fisurii sunt reduse astfel încât, în condițiile *stării plane de tensiune* va predomină o tenacitate ridicată. Când epruveta continuă să se subțieze, tenacitatea la rupere începe să se micșoreze deoarece se reduce treptat volumul de material capabil să înmagazineze energie de deformație plastică.

Pe de altă parte, dacă grosimea epruvetei crește, aceasta poate avea ca efect o mărire a tensiunii σ_3 (σ_z) având ca efect o diminuare a deformațiilor plastice după această direcție. În aceste condiții specifice *stării plane de deformație*, zona deformată plastic de la vârful fisurii este cu mult mai mică, iar tenacitatea la rupere scade brusc.

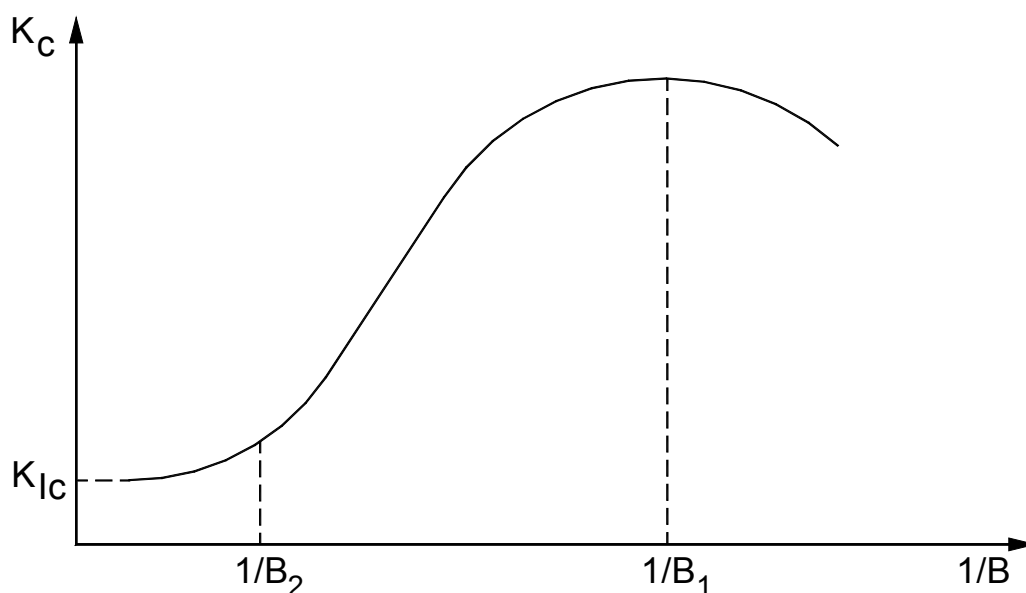


Fig. 5.16. Variația tenacității la rupere funcție de grosimea epruvetei

Un aspect foarte important este legat de stabilirea nivelului cel mai scăzut al tenacității la rupere, care este reprezentată de factorul critic de intensitate a tensiunii pentru starea plană de deformare, notat K_{Ic} . Această mărime se obține în laborator prin încercări pe epruvete cu grosimea mai mare decât B_2 .

Pe baza celor de mai sus se poate arăta că tenacitatea la rupere K_c pentru starea plană de tensiune include atât proprietățile materialului cât și geometria epruvetei încercate, în timp ce K_{Ic} este dependent numai de proprietățile materialului. Această tranziție care apare de la starea plană de tensiune spre starea plană de deformare sau invers poate fi analizată și în funcție de raportul dintre raza enclavei plastice calculată pentru starea plană de tensiune și grosimea epruvetei r_p/B , figura 5.17.

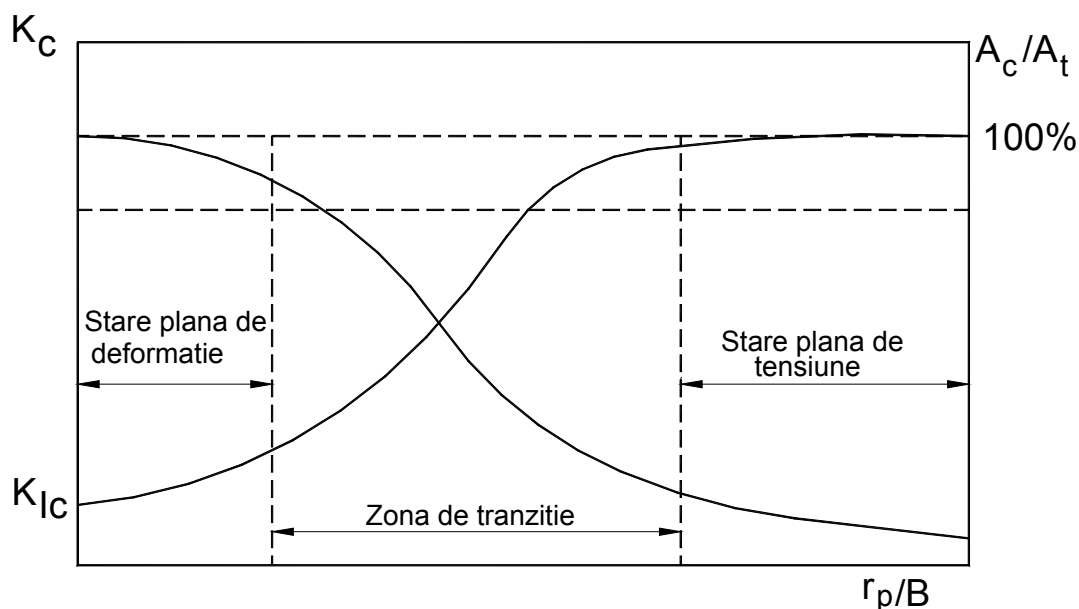


Fig. 5.17. Tranziția stare plană de deformare-stare plană de tensiune

Experimental s-a constatat că starea plană de deformare apare atunci când $r_p/B < 0,1$, respectiv starea plană de tensiune are un caracter dominant când $r_p/B \geq 1$. Trebuie subliniat faptul că grosimea necesară pentru a asigura condițiile stării plane de tensiune sau de deformare depinde și de limita de curgere a materialului. Astfel, dacă limita de curgere a unui material în urma unor tratamente termice crește de două ori, pentru a obține condițiile stării plane de deformare în condițiile în care K_{Ic} rămîne neschimbat, se impune ca grosimea epruvetei să fie micșorată de patru ori. De asemenea, o epruvetă cu grosime mică poate îndeplini condițiile stării plane de deformare dacă materialul are o limită de curgere ridicată, respectiv o secțiune cu grosime mare poate să nu îndeplinească condițiile stării plane de deformare dacă limita de curgere este scăzută. Cele de mai sus se iau în considerare prin aceea că la determinarea experimentală a lui K_{Ic} pentru alegerea epruvetei se impune condiția:

$$B \geq 2,5(K_{Ic} / \sigma_c)^2$$