

CAPITOLUL 6

DETERMINAREA EXPERIMENTALĂ A TENACITĂȚII LA FISURARE

-
- 6.1. *Semnificația mărimilor utilizate*
 - 6.2. *Aparatura necesară*
 - 6.3. *Configurația probelor utilizate*
 - 6.4. *Fisurarea prin oboseală*
 - 6.5. *Modul de lucru*
 - 6.6. *Validarea rezultatelor încercării*
 - 6.7. *Determinarea K_{Ic} prin indentare*
-

Determinarea experimentală a rezistenței la fisurare este standardizată de ASTM E 399/1997 și se referă la probe din materiale metalice cu o comportare liniar elastică până la rupere. *Scopul încercării* este determinarea valorii critice a factorului de intensitate a tensiunii K_{Ic} în condițiile stării plane de deformare și a deplasării flancurilor fisurii după *modul I*. Această metodă implică încercarea unor probe standardizate, prevăzute cu o creștătură laterală inițială în prelungirea căreia se propagă o fisură prin oboseală. Solicitățile la care sunt supuse probele cu diferite configurații sunt de tracțiune sau încovoiere. Pe parcursul încercării se urmăresc mai multe aspecte. Trebuie trasată dependența forță – deplasarea marginilor creștăturii inițiale. Se stabilește încărcarea corespunzătoare propagării fisurii la o deplasare mai mare cu 2% față de cea corespunzătoare apariției primei neliniarități a graficului forță – deplasare. Valoarea pentru rezistența la fisurare K_{Ic} se determină pe baza unor relații de calcul stabilite ca urmare a analizei tensiunilor elastice corespunzătoare tipului de probă și solicitare utilizate. Validitatea determinării acestei valori depinde, într-o bună măsură, de „ascuțimea” fisurii propagate prin oboseală astfel încât aceasta să aproximeze cât mai bine o fisură reală. În acest sens, nivelul tensiunilor de oboseală pentru prefisurare trebuie să fie cât mai scăzut.

6.1. Semnificația mărimilor utilizate

Mărimea K_{Ic} caracterizează rezistența la fisurare a materialului în condiții de mediu neutre și în prezența unei fisuri severe astfel încât starea de tensiuni în apropierea flancurilor fisurii să inducă o deformare plană iar regiunea deformată plastic de la vârful fisurii să fie mică în comparație cu dimensiunile probei și cu lungimea fisurii. Valoarea determinată pentru K_{Ic} reprezintă valoarea limită, inferioară, a rezistenței la fisurare. Această valoare poate fi utilizată pentru a pune în evidență relația existentă între tensiunea de rupere și mărimea defectului pentru materialul aflat în serviciu.

Pot exista anumite fenomene ce conduc la determinarea unei valori pentru K_{Ic} care să nu fie reprezentativă pentru materialul respectiv. Răspunsul materialului în ceea

ce privește determinarea K_{Ic} este influențat de viteza de încercare și de temperatură. Pe de altă parte, solicitarea ciclică poate cauza propagarea fisurii la valori K_I mai mici decât K_{Ic} . Propagarea fisurii sub solicitare ciclică sau chiar sub solicitare statică menținută un timp îndelungat, trebuie să țină seama și de existența factorilor de mediu sau a agenților corozivi. În exploatare trebuie să se pună în evidență diferențierile care apar în ceea ce privește condițiile de încercare din laborator și cele din exploatare.

Cu certitudine nu se va obține o valoare validă pentru K_{Ic} dacă materialul avut la dispoziție în vederea solicitării nu are mărimea necesară pentru a se executa probele de dimensiunile cerute. În astfel de cazuri, K_{Ic} nu mai reprezintă un concept al Mecanicii liniare a ruperii dar poate fi utilizat pentru măsurători comparative ale tenacității materialelor, atunci când probele sunt de aceeași formă și dimensiune. Chiar dacă probele nu au mărimea necesară pentru *validarea rezultatelor încercării* (descrisă în paragrafele următoare), totuși dimensiunile lor trebuie să permită ca la forța maximă să aibe loc mai degrabă propagarea pronunțată a fisurii decât apariția unei deformații plastice generalizate.

Această metodă de determinare poate fi utilizată în următoarele scopuri:

1. În cercetare și dezvoltare pentru a stabili, în termeni cantitativi, performanța în serviciu a unui material, efectele variabilelor metalurgice (tratamentele termice, compoziția, etc.) sau a operațiilor de fabricare (prelucrarea mecanică, sudarea, etc.) asupra rezistenței la fisurare;

2. În exploatare pentru a stabili materialul corespunzător a fi utilizat în anumite aplicații pentru care trebuie determinată mărimea maxim-admisibilă a defectelor din material;

3. Pentru elaborarea anumitor specificații în ceea ce privește calitatea fabricației, dar numai acolo unde există o bază solidă pentru determinarea valorilor K_{Ic} . Pentru aplicații particulare, valorile stabilite pentru K_{Ic} trebuie puse în concordanță cu solicitarea reală a componentei respective, cu sensibilitatea și precizia metodelor de control nedistructiv utilizate în vederea determinării fisurilor propagate în timpul funcționării.

6.2. Aparatura utilizată

Probele trebuie solicitate pe o mașină de încercat care să aibe dispozitivele necesare pentru înregistrarea variației forță – deplasare. Având în vedere faptul că se pot utiliza diferite configurații ale probelor, dispozitivele de fixare pe mașina de încercat trebuie adaptate la cerințele determinate de respectivele probe. Aceste dispozitive vor asigura, printre altele, o bună aliniere a direcției forțelor aplicate și o perpendicularitate a direcției forțelor relativă la planul fisurii.

Pentru determinarea variației deplasării în timpul solicitării se va utiliza un *traductor de deplasare*, *figura 6.1*.

Mărcile tensometrice utilizate din cadrul acestui dispozitiv trebuie să fie precis și corect poziționate. Trebuie avut în vedere ca acest traductor să nu sufere deteriorări atunci când proba se rupe. Traductorul de deplasare are în componență elementele elastice 1, pe care se lipesc traductorii electrici rezistivi T_1 , C_1 , T_2 și C_2 , elementele 1 fiind rigidizate prin șurubul 3 și piulița 4 de corpul 2. Traductorii electrici rezistivi aplicați pe lamelele elastice 1 trebuie să aibă un factor de sensibilitate de cel puțin 2.

Mărcile tensometrice sunt lipite pe suprafețele supuse la tracțiune și compresiune ale fiecărei lamele și conectate la o punte Wheastone, *figura 6.2*, ce conține rezistențe variabile.

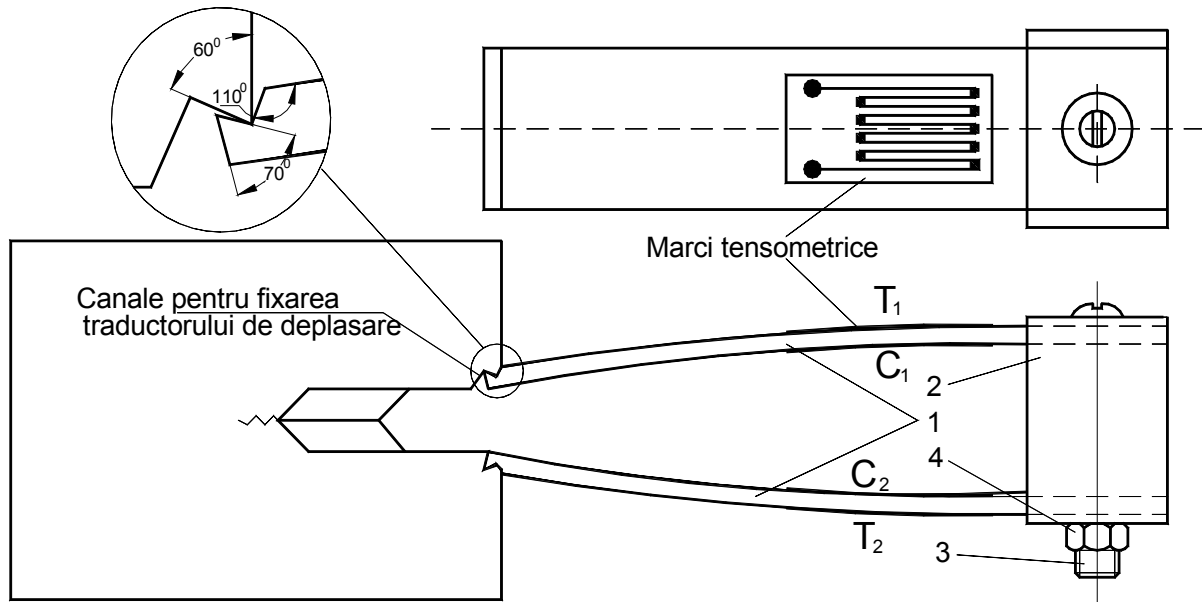


Fig. 6.1. Traductorul de deplasare

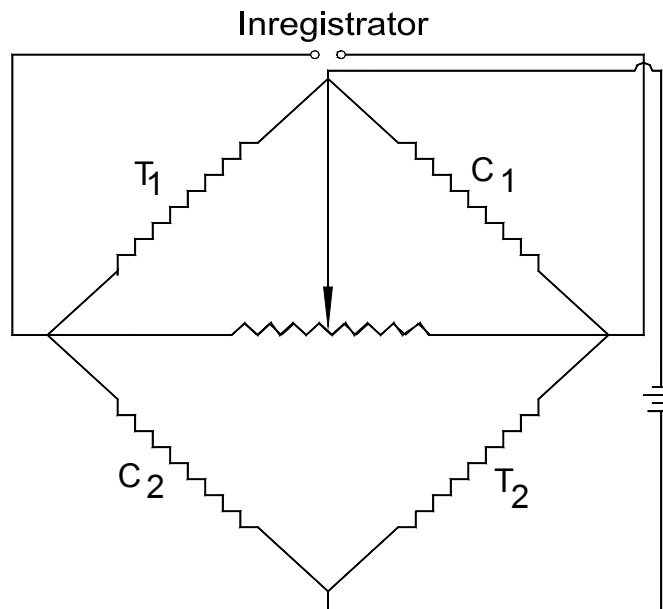


Fig. 6.2. Montajul în care sunt incluse mărcile tensometrice

Materialul din care sunt confecționate lamelele dispozitivului trebuie să aibe un coeficient ridicat al limitei elastice, respectiv raportul (σ/E). Detalii privind dimensiunile pentru lamelele elastice și pentru piesa intermediară sunt prezentate în *figura 6.3*.

Măsurarea forței și a deplasării la deschiderea fisurii se face printr-o înregistrare continuă, preluându-se semnalul de la traductorul de forță și de la traductorul de deplasare. Preciziile traductorului de forță și a înregistratorului trebuie să fie de $\pm 1\%$, iar precizia înregistrării deplasării la deschiderea fisurii sub acțiunea forței aplicate trebuie să fie de cel puțin $3 \cdot 10^{-3}$ mm pentru deplasări de pînă la 0,5 mm și de $\pm 1\%$ din valoarea înregistrată pentru deplasări mai mari.

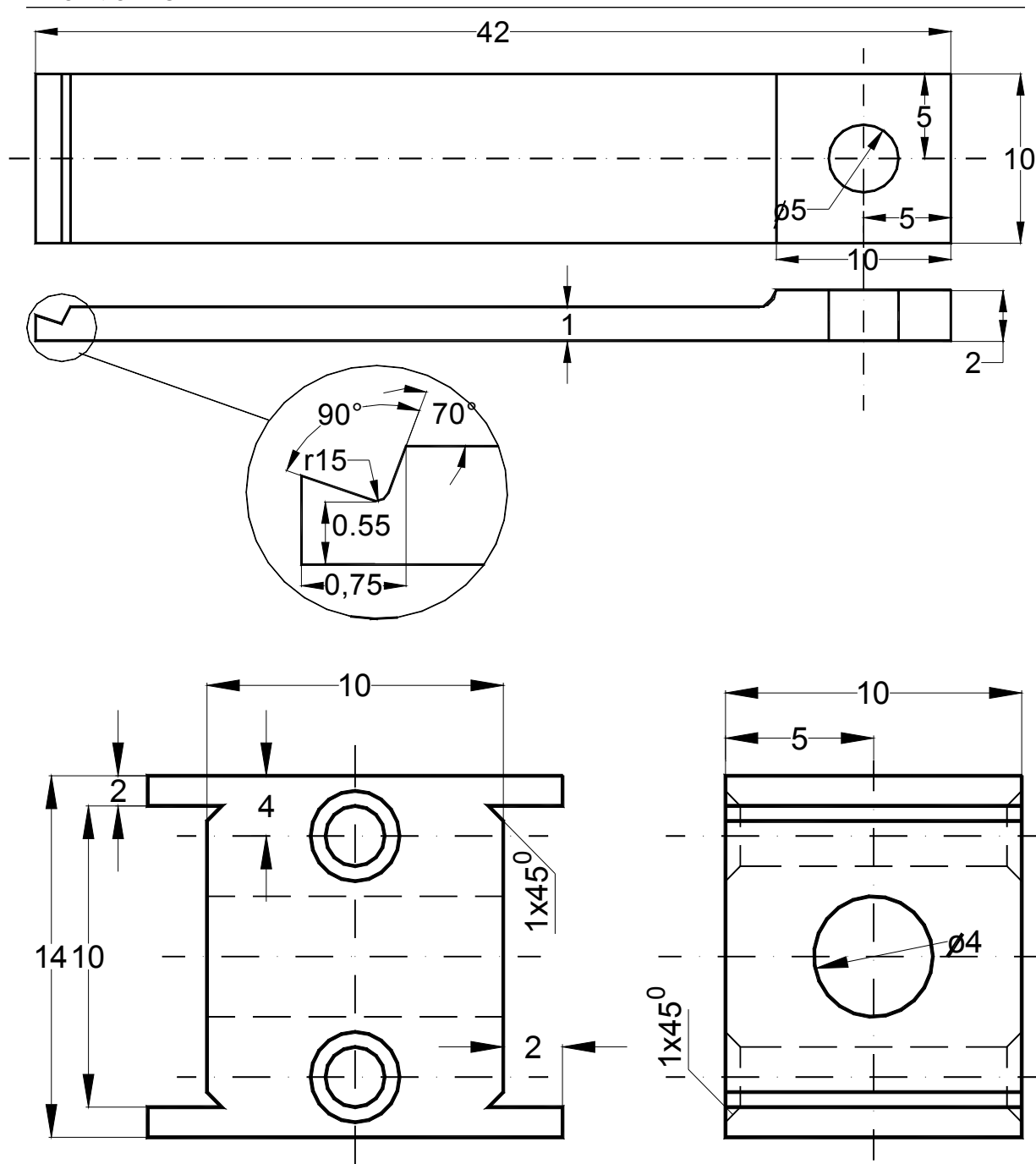


Fig. 6.3. Detalii pentru lamele și piesa intermediară ale traductorului de deplasare

Mărcile tensometrice trebuie să furnizeze un semnal perfect liniar pe domeniul de deplasare în care se lucrează, respectiv 2,5 mm. Liniaritatea semnalului se poate verifica cu ajutorul unui extensometru de calibrare. Pentru calibrare se vor face 10 citiri la intervale egale, pe întreg domeniul de lucru al mărcii. Această procedură de calibrare se repetă de trei ori pentru fiecare marcă, de fiecare dată demontându-se și apoi așezându-se din nou, în degajările respective, dispozitivul de deplasare. Abaterea de la liniaritate, aproximată prin metoda celor mai mici pătrate, trebuie să fie de maximum 0,0025 mm. Nu este necesară o precizie absolută întrucât în cadrul acestei determinări se lucrează mai degrabă cu variații relative decât cu valori absolute.

Traductorul de deplasare se montează în degajările special prelucrate în epruvetă, *figura 6.4 a*, sau cu ajutorul unor piese intermediare conform *figurii 6.4 b*. În cazul degajărilor incluse, punctele de referință în ceea ce privește măsurarea lungimii de încovoiere vor fi cele de la partea frontală a probei. Pentru degajările aplicate se va face modificarea necesară în funcție de grosimea pieselor aplicate.

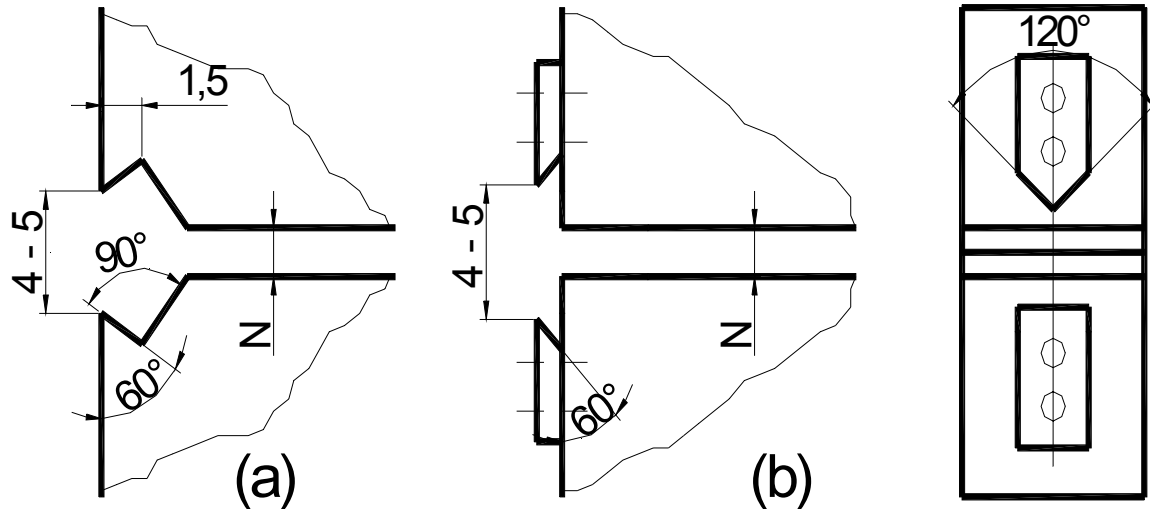


Fig. 6.4. Degajări incluse (a) și aplicate (b)

6.3. Configurația probelor utilizate

6.3.1. Considerații privind alegerea probei

Pentru ca rezultatele obținute în urma aplicării acestei metode de determinare să poată fi considerate valide, atât grosimea B a probelor cât și lungimea fisurii trebuie să îndeplinescă condiția:

$$B, a \geq 2,5 \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_c} \right) \quad (6.1)$$

în care σ_c reprezintă limita de curgere a materialului corespunzătoare temperaturii și vitezei de încercare utilizată pentru determinarea K_{Ic} . Alegerea inițială a grosimii minime a epruvetei se face în funcție de valoarea raportului σ_c/E , conform *tabelului 6.1*.

Dacă se obține în final, pe baza încercărilor, o valoare dată de relația $2,5 \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_c} \right)$

care să conducă la o grosime a probei inferioară celei utilizate se va repeta încercarea cu o probă de grosime mai mică. Pe de altă parte, dacă dispunem de un material astfel încât să nu poată fi verificată *relația (6.1)*, atunci nu se pot face determinări care să conducă la un rezultat valid pentru K_{Ic} , pe baza acestei metode.

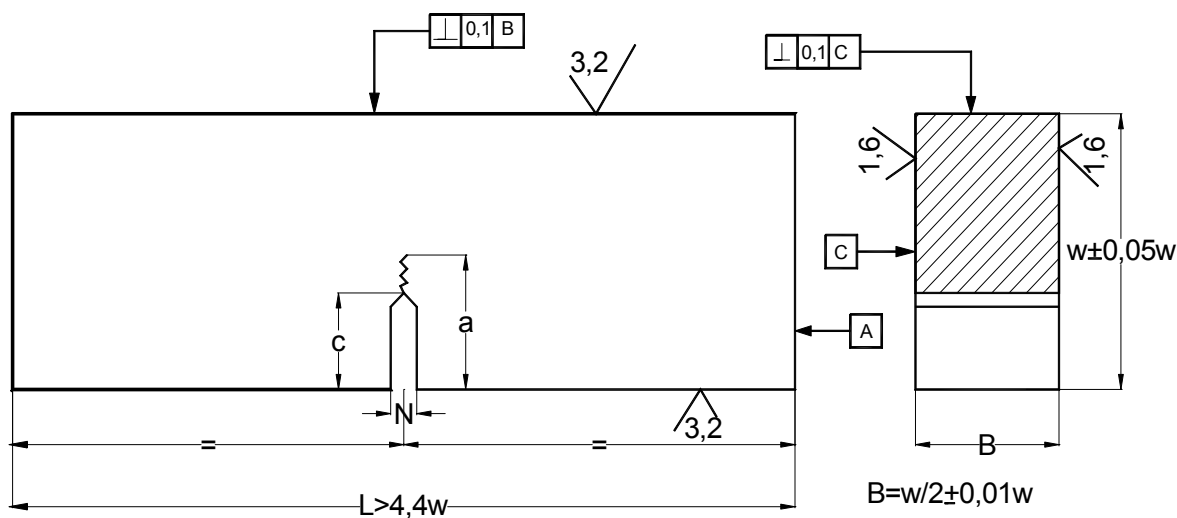
Epruvetele pe care se determină tenacitatea la rupere K_{Ic} pot fi epruvete de încovoiere sau de tracțiune; ambele tipuri conținând o creștătură, ce are în prelungire o fisură propagată prin oboseală.

Tab. 6.1.

Valoarea raportului $\frac{\sigma_c}{E}$	Grosimea epruvetei B [mm]
$\leq 0,0050$	100
0,0050...0,0057	75
0,0057...0,0062	63
0,0062...0,0065	50
0,0065...0,0068	44
0,0068...0,0071	38
0,0071...0,0075	32
0,0075...0,0080	25
0,0080...0,0085	20
0,0085...0,01	12,5
$\geq 0,0100$	6,5

6.3.2. Epruveta de încovoiere

Proba standard de încovoiere conține o singură creștătură laterală în prelungirea căreia există o fisură propagată prin oboseală, *figura 6.5*.

**Fig. 6.5. Proba utilizată pentru încovoiere**

Abaterile dimensionale și rugozitatea suprafețelor prelucrate sunt indicate în *figura 6.5*. Tratamentele termice se aplică înainte de prelucrările de finisare a epruvetelor, finisare la care se prescrie un adaos de prelucrare de 0,05 mm pentru fiecare suprafață a epruvetei. Lățimea W a probei precum și lungimea fisurii trebuie măsurate cu o precizie ridicată. Abaterile de la dimensiunile exacte nu trebuie să depășească 0,5% din dimensiunea respectivă. Fisura practică în prelungirea creștăturii epruvetelor se propagă pe mașini de încercat la solicitări variabile

sinusoidale, axiale sau de încovoiere. Dimensiunile probelor de încovoiere care pot fi utilizate pentru determinarea K_{Ic} sunt date în *tabelul 6.2*. Este de dorit ca fisura prin oboseală să se fixeze pe același sistem de rezemare ca la încercarea finală pentru determinarea K_{Ic} . Bara se fixează pe două reazeme cilindrice cu posibilitatea de rotire axială și este solicitată prin intermediul unui dorn cu partea terminală tot cilindrică, *figura 6.6*. Distanța S dintre reazeme este egală, cel puțin, cu $4W$.

Tab. 6.2

Tipul	Grosimea B [mm]	Lățimea W [mm]	Lungimea fisurii a [mm]	Lățime max. creștătură N [mm]	Lungime creștătură C [mm]
10	10	20	9,0...11,0	1,3	5,0...8,0
25	25	50	22,5...27,5	3,2	12,5...20
50	50	100	45...55	6,5	25...40
75	75	150	67,5...82,5	9,7	37,5...60
100	100	200	90...110	13	50...80

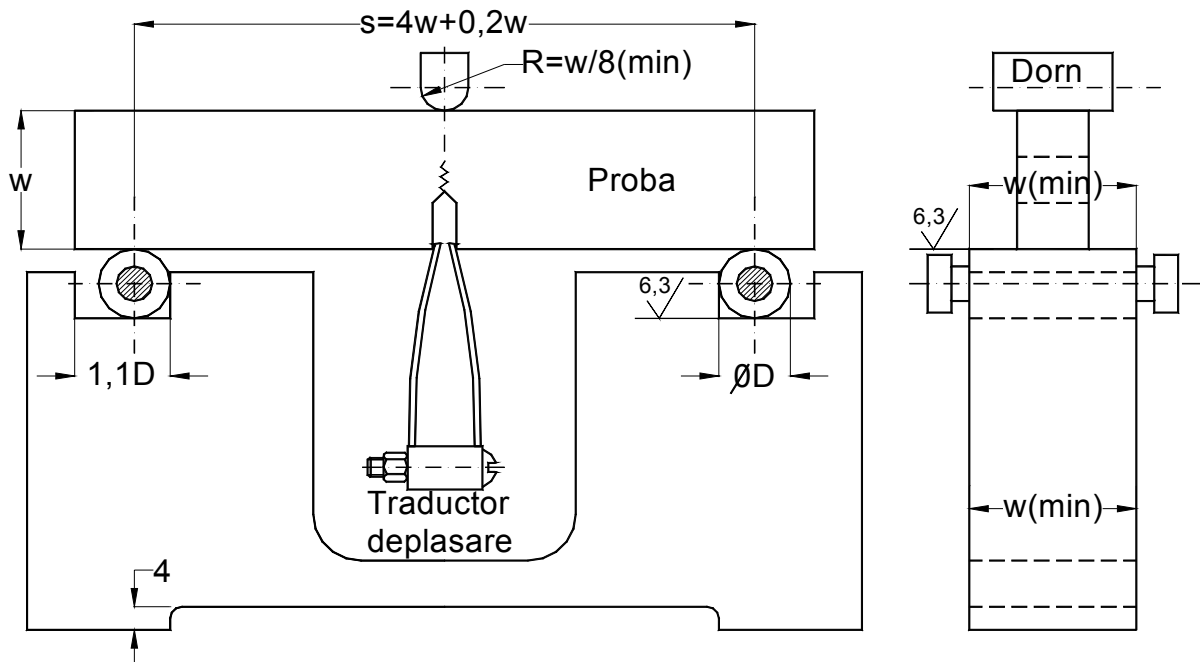


Fig. 6.6. Configurația rezemării probei de încovoiere

Reazemele sunt proiectate astfel încât să se minimizeze frecarea cu proba, permițând rolelor să se rotească ușor atunci când proba este solicitată. O atenție deosebită trebuie acordată direcției de acțiune a forței care trebuie să fie la mijlocul distanței dintre reazeme. Abaterea în acest caz trebuie să fie mai mică de 1% din distanța dintre reazeme. De asemenea, fisura practică probei trebuie poziționată cât mai exact, la mijlocul distanței dintre reazeme, pe direcția de acțiune a forței. Abaterea de la paralelism dintre axele rolelor de rezemare și axa creștăturii epruvetei nu trebuie să depășească 2° . Aplicarea sarcinii se face lent, continuu, progresiv și fără șocuri, astfel încât viteza de variație a factorului de intensitate a tensiunii să fie cuprinsă în intervalul $dK_I/dt = [0,55 \div 2,75]$ (MPa·m^{1/2})/sec. Pentru o grosime standard a probei de 25 mm, viteza de încărcare va fi cuprinsă în intervalul 0,3-1,5 kN/sec.

6.3.3. Epruveta de tractiune

Epruveta de tracțiune sau epruveta compactă – CT (compact tension) are o singură creastă laterală în prelungirea căreia se induce o fisură prin oboseală care să fie ca aspect cât mai apropiată de fisurile reale. Configurația și dimensiunile generale ale acestei probe sunt prezentate în *figura 6.7*.

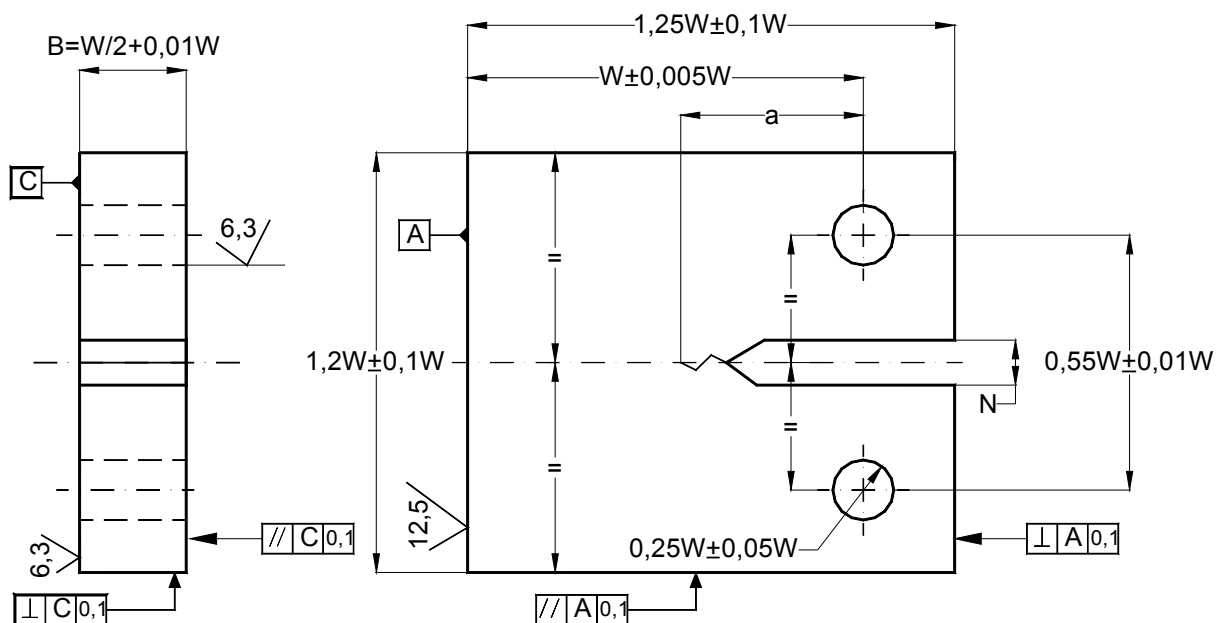


Fig. 6.7. Proba de tractiune - CT

Abaterile dimensionale și rugozitatea suprafețelor prelucrate sunt indicate în *figura 6.7*. Tratamentele termice se aplică înainte de prelucrările de finisare a epruvetelor, finisare la care se prescrie un adaos de prelucrare de 0,05 mm pentru fiecare suprafață a epruvetei. Lățimea W a probei precum și lungimea fisurii trebuie măsurate cu precizie ridicată. Abaterile de la dimensiunile exacte nu trebuie să depășească 0,5% din dimensiunea respectivă.

Fisura în prelungirea creștăturii epruvetelor se propagă pe mașini de încercat la solicitări variabile sinusoidale axiale sau de încovoiere. Dimensiunile probelor de încovoiere care pot fi utilizate pentru determinarea K_{Ic} sunt date în *tabelul 6.2*. Dispozitivul pentru încercarea la tracțiune este prezentat în *figura 6.8*. Proba se prinde de furcile dispozitivului prin intermediul a două bolțuri care permit rotirea probei în timpul încercării.

Dimensiunile relative și toleranțele ce trebuie respectate la construcția dispozitivului sunt prezentate în *figura 6.8*. Materialul din care se confecționează atât furcile cât și bolțurile care compun dispozitivul trebuie să fie un oțel cu limita de curgere de aproximativ 1930 MPa.

Se încarcă probă compactă cu o astfel de viteză încât creșterea coeficientului de intensitate a tensiunilor să se păstreze în intervalul $[0,55 \div 2,75 \text{ (MPa} \cdot \text{m}^{1/2})/\text{sec.}]$. Pentru o probă standard, cu raportul $W/B=2$, viteza de solicitare, care să respecte indicațiile de mai sus trebuie să fie cuprinsă între $[0,34\text{--}1,7 \text{ kN/sec.}]$.

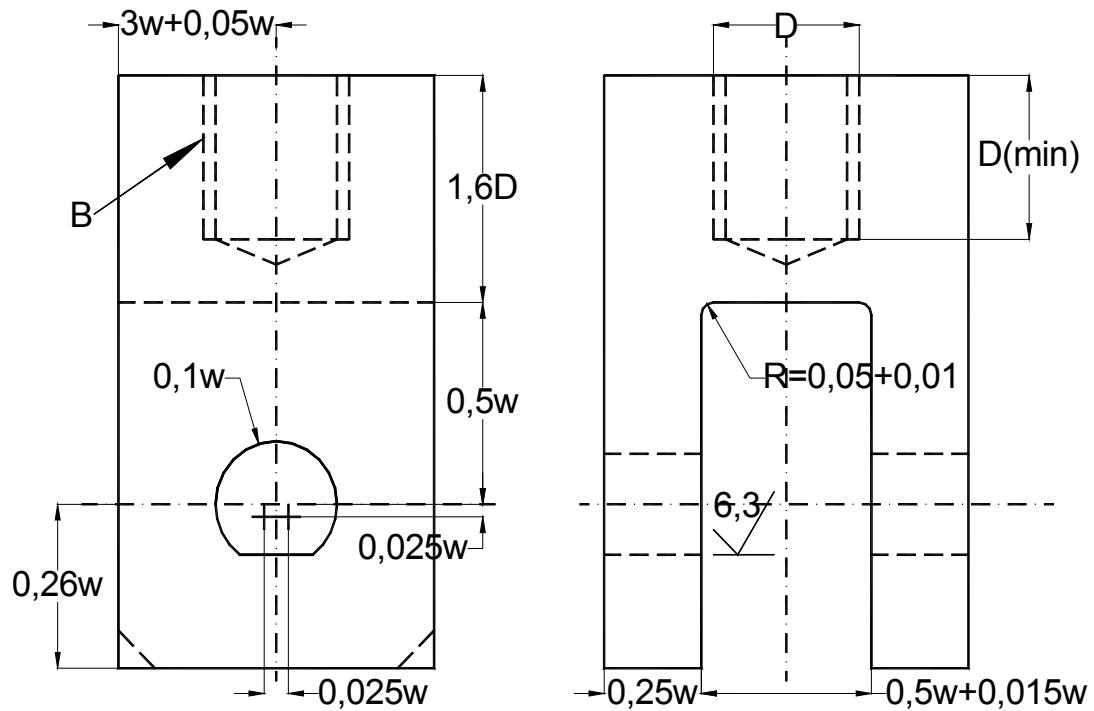


Fig. 6.8. Dispozitivul de solicitare la tracțiune

6.4. Fisurarea prin oboseală

În figura 6.9 sunt prezentate trei forme ale creștăturii inițiale și ale fisurii de oboseală.

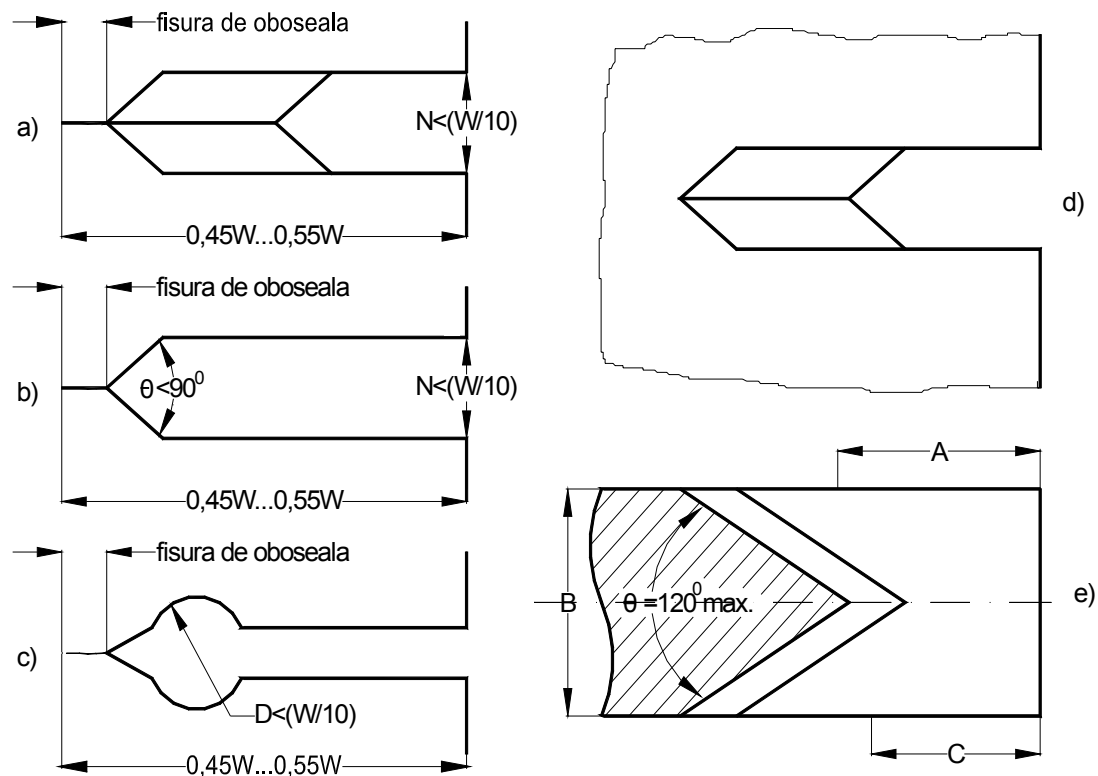


Fig. 6.9. Tipuri de creștături

Propagarea fisurii prin oboseală trebuie să se facă la nivele scăzute ale solicitării. Ca urmare, raza de la vârful creștăturii în V prefabricată prin frezare (de exemplu) trebuie să fie de cel mult 0,08 mm. În cazul în care creștătura este prevăzută cu o gaură, în partea finală se practică un concentrator de tensiuni ascuțit. La prelucrarea vârfurilor canalelor trebuie luate anumite precauții, astfel încât planul fisurii de oboseală să se orienteze în lungul creștăturii. Experiența arată că este improbabil ca prin fisurarea de oboseală să se obțină o reproductibilitate totală a fisurii reale și mai mult, aceasta chiar să simuleze o fisură naturală în vederea obținerii unor rezultate satisfăcătoare pentru K_{Ic} . O creștătură și o fisură prin oboseală se pot obține pentru majoritatea materialelor metalice. Sunt totuși materiale fragile care nu pot fi prefisurate prin oboseală întrucât la aceste materiale apare ruperea imediat după inițierea fisurii de oboseală. Pentru aceste materiale, indicații privind determinarea K_{Ic} se vor prezenta mai târziu în acest capitol.

O prefisură de oboseală se produce prin încărcarea ciclică a unei probe cu creștătură, având un raport între tensiunea minimă și cea maximă care să ducă la un coeficient de asimetrie a ciclului cuprins în intervalul $1 \div 0,1$. Numărul de cicluri este, în mod obișnuit, cuprins între 10^4 și 10^6 depinzând de mărimea probei, forma creștăturii și nivelul intensității tensiunilor. Valoarea tensiunii maxime în etapa finală a creșterii fisurii nu trebuie să depășească 60% din tensiunea utilizată pentru determinarea K_{Ic} . Un anumit număr de cicluri din numărul total necesar pentru producerea prefisurării prin oboseală este consumat pentru inițierea fisurii în zona vârfului creștăturii, restul se utilizează pentru creșterea fisurii la lungimea cerută. Dacă numărul total de cicluri necesar pentru obținerea fisurii de oboseală este mare, se poate presupune că aceasta se datorează numărului mare de cicluri necesar pentru inițierea fisurii și ca urmare, viteza de propagare a fisurii este mică. Inițierea mai devreme a fisurii de oboseală se poate face astfel:

- Prin executarea unei creștături asemănătoare celei din *figura 6.9a*;
- Prin executarea unei creștături foarte ascuțite, *figura 6.9b*;
- Prin încărcarea statică a probei astfel încât vârful creștăturii să fie comprimat pe direcție perpendiculară în raport cu planul fisurii ce urmează să se propage dar fără a se introduce tensiuni care să depășească limita de curgere a materialului;
- Prin utilizarea unui coeficient de asimetrie $R < 0$.

Se recomandă trasarea a câte două linii pe fiecare parte a probei, perpendiculare pe planul fisurii de oboseală care urmează să se propage. *Linia cea mai apropiată* de vârful creștăturii trebuie să indice lungimea minimă a fisurii de oboseală și nu trebuie să fie la o distanță mai mică de 2,5% din lungimea totală a creștăturii și fisurii de oboseală, respectiv de 0,0125W. *Linia cea mai depărtată* trebuie să fie la 97,5% din lungimea finală a fisurii. Când cea mai avansată urmă a fisurii aproape că a atins linia care marchează 97,5% din lungimea totală a fisurii, solicitarea maximă trebuie redusă astfel încât raportul dintre factorul maxim de intensitate a tensiunii și modulul lui Young, K_{max}/E , să nu depășească valoarea $0,00032 \text{ m}^{1/2}$. Pe de altă parte, K_{max} nu trebuie să fie mai mare de 60% din valoarea K_Q determinată în testul preliminar (ce va fi discutat ulterior) dacă acest K_Q va conduce la o valoare valabilă pentru K_{Ic} .

Se recomandă ca valoarea maximă a încărcării inițiale în vederea prefisurării să fie aleasă astfel încât, factorul maxim de intensitate a tensiunilor în porțiunea inițială a ciclului de oboseală să nu depășească 80% din valoarea K_{Ic} estimată pentru material. Valori mai mari pentru K pot conduce la viteze mari, nedorite, de creștere a fisurii. Valoarea minimă a încărcării se alege astfel încât coeficientul de asimetrie a ciclului să

fie cuprins între -1 și +0,1. Valori spre -1 vor conduce la o propagare mai rapidă a fisurii. În aceste condiții trebuie luate măsuri în ceea ce privește rezemarea corespunzătoare a probelor.

În absența unor factori de mediu favorizanți, variația frecvenței de lucru a solicitării de oboseală, dacă valoarea acesteia este sub 100 Hz, nu se cunoaște a avea influență semnificativă asupra propagării fisurii. Inițierea și propagarea fisurii de oboseală trebuie observate cu atenție. Dacă inițierea fisurii nu este observată pe ambele laturi ale probei, înainte ca fisura să se propage semnificativ se oprește solicitarea pentru a se determina cauza și a remedia această comportare asimetrică. Uneori, simpla inversare a probei în dispozitivul de prindere poate rezolva această problemă. Dacă fisura de oboseală se induce la o temperatură T_1 , iar solicitarea propriu-zisă va avea loc la temperatura T_2 , K_{max} nu trebuie să depășească valoarea $0,6 \left(\frac{\sigma_{c1}}{\sigma_{c2}} \right) K_Q$ în care σ_{c1} și σ_{c2} sunt limitele de curgere la temperaturile T_1 respectiv T_2 .

6.5. Modul de lucru

6.5.1. Măsurători

Este recomandat a se efectua cel puțin trei încercări în aceleași condiții pentru a verifica repetabilitatea încercărilor. Probele trebuie să aibe configurația și toleranțele figurate pe desene. În ceea ce privește proba de încercat, de tracțiune sau de încovoiere, se au în vedere următoarele dimensiuni: grosimea B , lungimea fisurii a și lățimea probei W .

Se măsoară grosimea B cu o abatere maximă de 0,025 mm și se calculează ca o medie a trei măsurători efectuate la distanțe egale de la marginea cu creștătură până la vârful fisurii.

Se măsoară lungimea fisurii a , după rupere, în trei poziții: pe margini și la mijloc. Se face media acestor măsurători pentru a calcula K_Q .

Pentru lungimea fisurii sunt următoarele cerințe:

- pentru creștătura din *figura 6.9a* (cu detalii în *figurile 6.9d și e*), fisura de oboseală trebuie să pornească în același timp de la ambele fețe ale probei;
- cele trei măsurători efectuate nu trebuie să difere față de medie cu mai mult de 10%;
- planul fisurii trebuie să se mențină pe aceeași direcție cu planul median al creștăturii.

Lățimea W a probei trebuie măsurată cu o precizie ridicată. Abaterea de la dimensiunea exactă nu trebuie să depășească 0,5% din dimensiunea respectivă.

Viteza de solicitare, în cazul solicitării statice, trebuie să fie astfel aleasă încât să determine o creștere a factorului de intensitate a tensiunilor în intervalul $0,55 \div 2,75$ (MPa·m^{1/2})/sec. Se trasează graficul de variație a forței în raport cu deplasarea. Panta inițială a porțiunii liniare trebuie să fie cuprinsă între 0,7 și 1,6. Dacă este necesar se vor atașa traductoarelor, amplificatoare de forță sau de deplasare, pentru a putea determina pe grafic forța P_Q cu o abatere de cel mult 1%. Pentru siguranță, citirea forței P_{max} se face de pe cadranul mașinii de încercat trecându-se pe grafic. Măsurarea forței și a deplasării la deschiderea fisurii se face printr-o înregistrare continuă, înregistrându-se semnalul de la traductorul de forță în funcție de semnalul traductorului de deplasare. Preciziile traductorului de forță și a înregistratorului trebuie să fie de $\pm 1\%$, iar precizia

Înregistrării deplasării la deschiderea fisurii sub acțiunea forței aplicate trebuie să fie de cel puțin $3 \cdot 10^{-3}$ mm pentru deplasări de până la 0,5 mm și de $\pm 1\%$ din valoarea înregistrată pentru deplasări mai mari. De asemenea, traductorul de deplasare trebuie să asigure o deformare liniară a lamelelor pentru o cursă de minimum 2,5 mm.

6.5.2. Interpretarea graficului forță-deplasare

Înregistrarea forță – deplasare, obținută în timpul încercării, poate avea una din formele din *figura 6.10*. Aprecierea rezultatelor încercării pentru determinarea tenacității la rupere K_{Ic} , constă în determinarea valorii *tenacității la rupere calculată* K_Q , pe baza înregistrării forță – deplasare. Valoarea calculată a tenacității la rupere se determină pe baza *forței critice* P_Q , care se obține astfel:

- se trasează o secantă OB având panta cu 5% mai mică decât panta porțiunii inițiale a înregistrării forță – deplasare (OA);
- forța ce corespunde intersecției secantei OB cu curba înregistrată se notează P_5 .

Dacă înregistrarea forță – deplasare este de tipul I, *figura 6.10*, adică toate valorile forței ce preced pe P_5 sunt mai mici, atunci se consideră $P_Q = P_5$. Dacă se înregistrează un maxim al forței ce precede forța P_5 (înregistrări de tipul II și III în *figura 6.10*), atunci valoarea forței de calcul P_Q se ia egală cu valoarea forței maxime din înregistrare ce precede P_5 . Neliniaritățile ce apar pe porțiunea inițială a înregistrării, datorită așezării traductorului de deplasare, se neglijează.

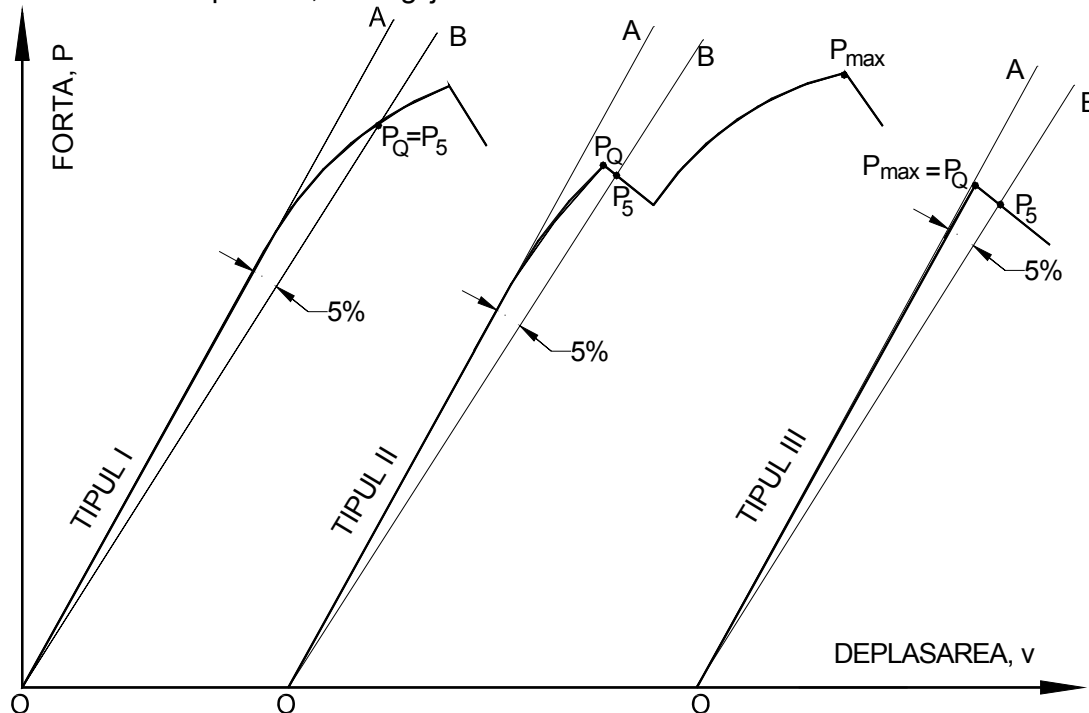


Fig. 6.10. Principalele tipuri de curbe caracteristice

Se calculează raportul P_{max}/P_Q și dacă acesta este mai mic de 1,10 se procedează la calculul lui K_Q .

Tenacitatea la rupere calculată K_Q se determină pe baza următoarelor relații:

— pentru epuveta sollicitată la tracțiune:

$$K_Q = F_Q \frac{f\left(\frac{a}{W}\right)}{BW^{\frac{1}{2}}} \quad (6.2)$$

unde:

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = 29,6\left(\frac{a}{W}\right)^{\frac{1}{2}} - 185,5\left(\frac{a}{W}\right)^{\frac{3}{2}} + 655,7\left(\frac{a}{W}\right)^{\frac{5}{2}} - 1017\left(\frac{a}{W}\right)^{\frac{7}{2}} + 638,9\left(\frac{a}{W}\right)^{\frac{9}{2}} \quad (6.3)$$

— pentru epruveta solicitată la încovoiere:

$$K_Q = \frac{1}{10} \sqrt{10} F_Q \frac{L}{BW^{\frac{3}{2}}} f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (6.4)$$

unde:

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{3\left(\frac{a}{W}\right)^{\frac{1}{2}} \left[1,99 - \left(\frac{a}{W}\right) \left(1 - \frac{a}{W}\right) \left(2,15 - 3,93\left(\frac{a}{W}\right) + 2,7\left(\frac{a}{W}\right)^2 \right) \right]}{2\left(1 - 2\frac{a}{W}\right) \left(1 - \frac{a}{W}\right)^{\frac{3}{2}}} \quad (6.5)$$

După calculul valorii K_Q se verifică dacă:

$$B, a \geq 2,5 \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_c} \right)^2 \quad (6.6)$$

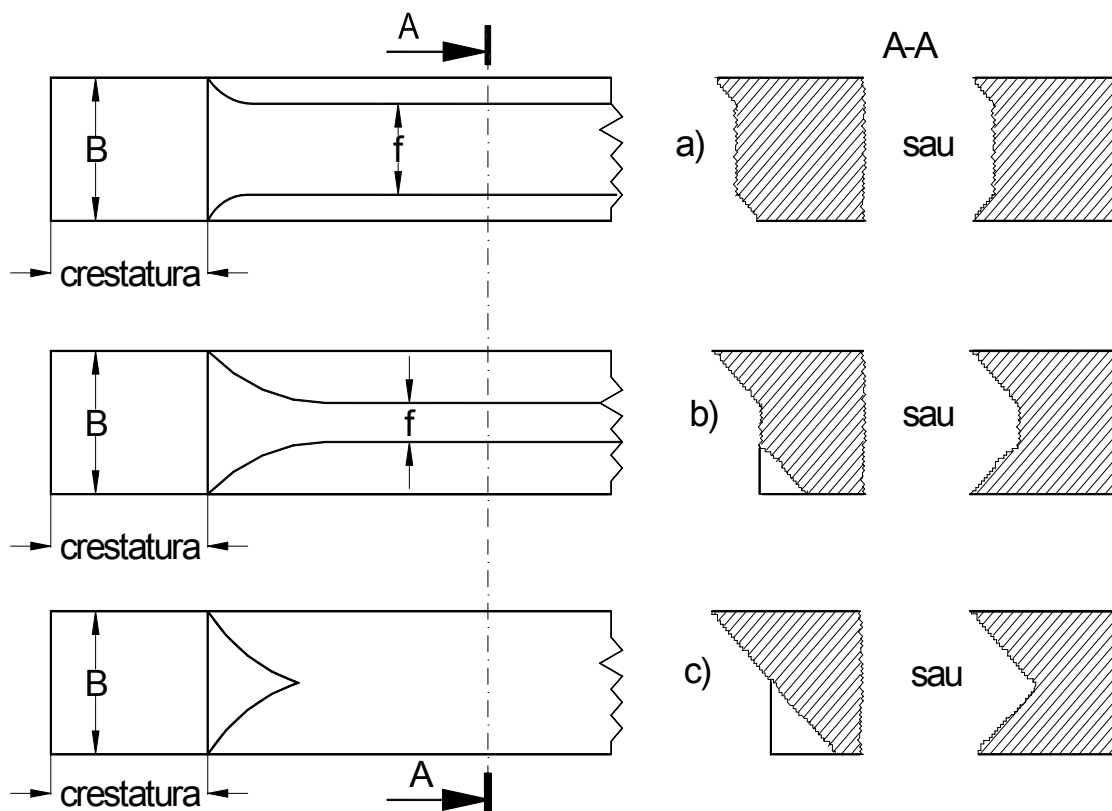


Fig. 6.11. Tipuri de rupere

În cazul respectării condiției (6.6) valoarea critică a factorului de intensitate a tensiunii K_{Ic} se consideră ca fiind egală cu valoarea calculată a factorului de intensitate a tensiunii K_Q , deci:

$$K_{Ic} = K_Q \quad (6.7)$$

Dacă nu se respectă condiția (6.6) încercarea trebuie reluată pe epruvete de dimensiuni mai mari, care să respecte condițiile stării plane de deformare.

Se poate stabili și caracterul ruperii după aspectul suprafeței de rupere a epruvetelor, *figura 6.11*.

Aspectul ruperii reprezintă o informație suplimentară și trebuie reliefat pentru fiecare probă.

6.6. Validarea rezultatelor încercării

Validarea rezultatelor are o importanță foarte mare, deoarece numai respectându-se toate condițiile impuse se poate aprecia valoarea factorului de intensitate a tensiunii K_{Ic} , ca o caracteristică a materialului. Dacă în orice fază a încercării una din condițiile de validare nu este satisfăcută, încercarea se întrerupe, ea reluându-se după asigurarea condițiilor de validare.

Condițiile de validare trebuie să respecte următoarea ordine:

1. Se verifică dimensiunile și toleranțele prescrise pentru epruvetă, înainte de propagarea prin oboseală a fisurii;
2. După propagarea prin oboseală a fisurii se verifică dacă lungimea fisurii propagate îndeplinește condițiile:
- 3.

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

4. După efectuarea încercării se verifică dacă:
 - 3.a) epruvetele îndeplinesc următoarele condiții:
 - diferența dintre două măsurători ale lungimii fisurii, independente de locul de măsurare, este mai mică de 2,5W%;
 - frontul fisurii este mai îndepărtat cu maximum 2,5W% sau cu 1,25 mm față de muchia creștăturii prelucrate;
 - orice porțiune a suprafeței fisurii are o înclinație mai mică de 10° față de planul creștăturii prelucrate;
 - fisura nu este ramificată;
 - 3.b) înclinarea porțiunii inițiale a înregistrării forță – deplasare este cuprinsă între 40 – 60°;
 - 3.c) este îndeplinită condiția de liniaritate a diagramei în punctul de evaluare a forței F_Q , calculând raportul $F_M/F_Q \leq 1,1$, unde F_M este forța maximă a încercării din timpul solicitării statice a epruvetei până la rupere;
 - 3.d) factorul de intensitate maximă a tensiunii la propagarea fisurii prin oboseală K_f verifică relațiile (6.6) și (6.7);
 - 3.e) se respectă condiția (6.6).

După unii autori, în cazul în care nu se îndeplinește condiția (6.6), tenacitatea la rupere se notează cu K_c și se numește tenacitate la rupere în condițiile nerespectării stării plane de deformare.

Limitări ale metodei K_{Ic}

Metoda K_{Ic} privind determinarea tenacității la rupere nu se poate aplica materialelor cu comportare elasto-plastică, acesta fiind principalul dezavantaj al metodei. Un alt dezavantaj îl reprezintă costul destul de ridicat, ținând cont că, pentru a respecta condițiile stării plane de deformare sunt necesare epruvete de dimensiuni mari, iar realizarea prefisurării prin oboseală ridică mult costul încercării. Aceste dezavantaje pot fi înlăturate prin folosirea epruvetelor cu creștătură Chevron.

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

6.7. Determinarea K_{Ic} prin indentare

Măsurarea tenacității la fisurare prin indentare sau utilizarea încercării de duritate, prezintă interes pentru numeroase materiale și în special pentru cele cu fragilitate ridicată dar care au și o structură fină și omogenă. Această determinare se caracterizează prin consum redus de material, ușurința încercării, etc.

Se disting, în special, două metode pentru măsurarea tenacității prin indentare:

- metoda măsurării directe a lungimii fisurii generate ca urmare a indentării;
- metoda defectului inițial atunci când pătrunderea este utilizată pentru a se putea controla propagarea fisurii după ce proba se supune și la încovoiere sau tracțiune.

În cele două cazuri, defectul artificial creat reprezintă o amprentă de microduritate, Vickers sau Knoop. Studiul zonei elasto-plastice în vecinătatea amprenteii permite calculul K_{Ic} .

6.7.1. Metoda măsurării directe

Pentru determinarea K_{Ic} prin această metodă este necesară stabilirea expresiei tensiunilor din apropierea urmei lăuate după pătrundere (Vickers de ex.). Procedul folosit în acest caz poartă numele de metoda microfisurării (MF) și conduce la determinarea rezistenței (tenacității) la fisurare în apropierea unei zone distruse mecanic prin indentare. Utilizarea microdurității în vederea determinării rezistenței la fisurare presupune un volum mic de material, încercarea fiind relativ simplă. Limitele metodelor care utilizează măsurarea lungimii fisurii în vederea determinării rezistenței la fisurare, constau în derivarea empirică a relației pentru K_{Ic} și de aici necesitatea găsirii unor factori de calibrare determinați prin alte metode decât MF. Metoda microfisurării, (MF), utilizează rezultatele *analizei tensiunilor* în urma pătrunderii (Vickers), raportate la mărimea încărcării și a dimensiunii urmei lăuate după pătrundere. După pătrunderea de tip Vickers, în suprafața materialului rămâne o urmă de tipul celei prezentate în *figura 6.12*. Microfisurile propagate pot fi găsite în lungul liniilor diagonale ale urmei lăuate, pornind chiar de la vârful piramidei. Rezolvarea problemei privind starea deformată a semispațiului, adică a corpului de dimensiuni foarte mari limitat de un plan, la acțiunea unei forțe concentrate normală pe acest plan, a fost dată de Boussinesq.

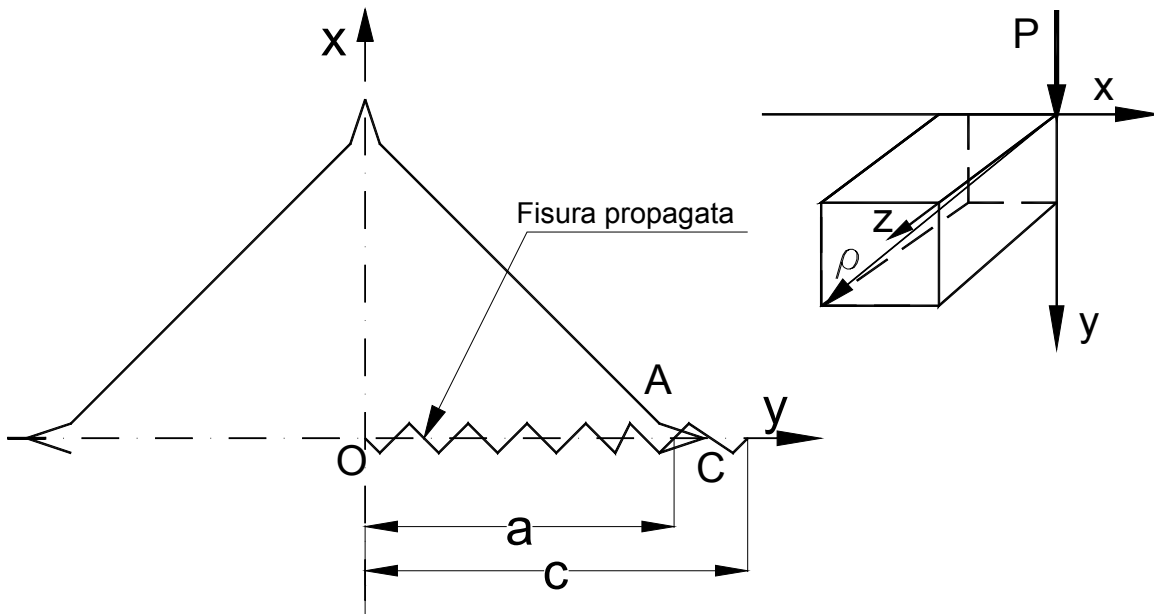


Fig. 6.12. Sistemul de coordonate al soluției Boussinesq pentru pătrunderea Vickers

Se consideră un corp elastic de dimensiuni mari în raport cu zona care urmează să fie supusă acțiunii de pătrundere a sarcinii, *figura 6.13*. Pe planul limită este aplicată sarcina normală P . Suprafața pe care este distribuită această sarcină este atât de mică încât poate fi considerată un punct. Se alege originea coordonatelor în punctul de aplicație a forței concentrate P , iar planul care limitează corpul considerat, ca plan de coordonate xOy . Axa z este dirijată spre interiorul corpului. În acest caz, starea de tensiune a corpului într-un punct oarecare A , de coordonate cilindrice z, r, φ , nu depinde de unghiul polar φ .

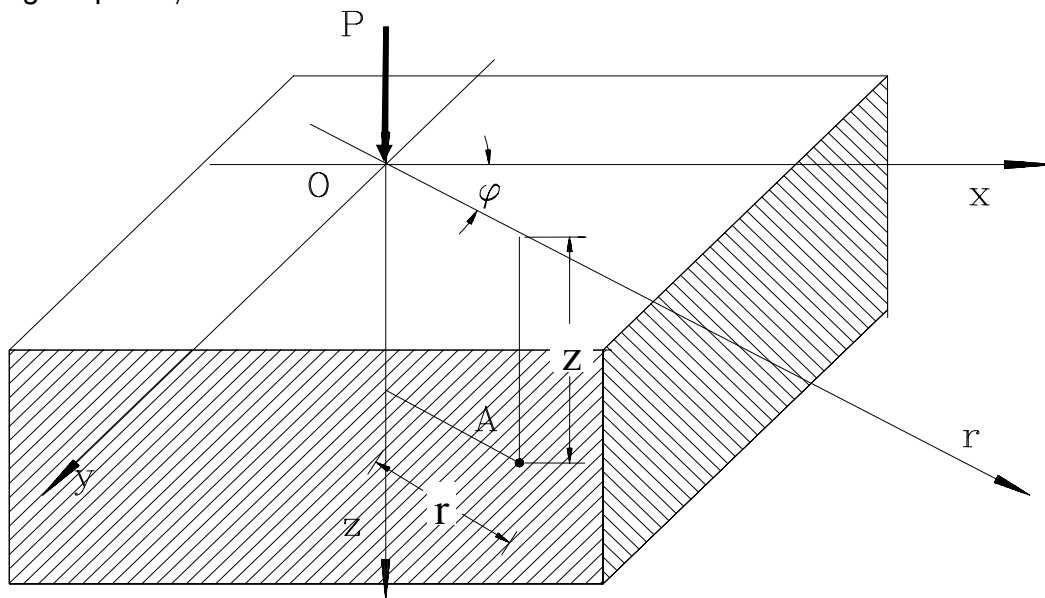


Fig. 6.13. Model cu aplicarea sarcinii și sistemul de coordonate Boussinesq

Se duce, prin originea coordonatelor, planul tOz , perpendicular pe planul rOz , *figura 6.14*.

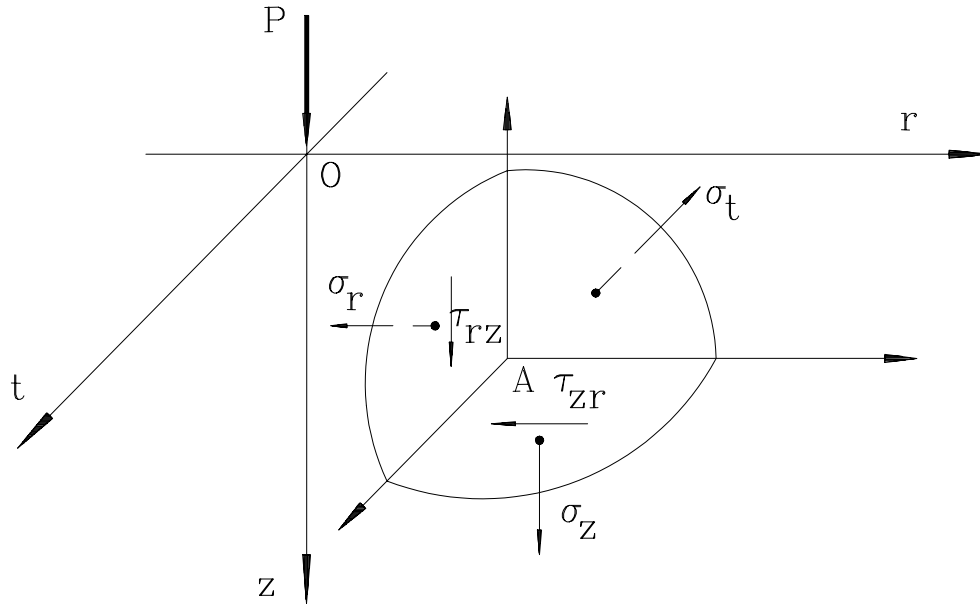


Fig. 6.14. Starea de tensiuni în imediata vecinătate solicitării

În punctul A al planului rOz , există următoarele componente ale tensiunilor: tensiunea normală σ_t la planul rOz , tensiunea normală σ_r la un plan paralel cu tOz , tensiunea normală σ_z la plan paralel cu rOt și tensiunile tangențiale τ_{rz} și τ_{zr} care sunt egale între ele. Acestor ultime tensiuni le corespunde o lunecare în planul rOz care nu strică simetria axială a stării de deformare a corpului. Deoarece în planul rOz nu există tensiuni tangențiale, rezultă că acesta este un plan principal. Problema care se pune este de a determina toate aceste tensiuni pentru orice punct $A(r,z)$ al corpului ca funcții de coordonatele z și r ale punctului.

După unele calcule se obțin expresiile tensiunilor în punctul arbitrar $A(r,z)$ al semispațiului ca fiind:

- tensiunea radială
$$\sigma_r = \frac{P}{2\pi} \left[\frac{1-2\nu}{\rho(\rho+z)} - \frac{3zr^2}{\rho^5} \right] \quad (6.8)$$

- tensiunea cicumferențială:
$$\sigma_t = \frac{P}{2\pi} (1-2\nu) \left[\frac{z}{\rho^3} - \frac{1}{\rho(\rho+z)} \right] \quad (6.9)$$

- tensiunea axială:
$$\sigma_z = -\frac{P}{2\pi} \frac{3z^3}{\rho^5} \quad (6.10)$$

- tensiunea tangențială:
$$\tau = -\frac{P}{2\pi} \frac{3rz^2}{\rho^5} \quad (6.11)$$

În planul $z=0$ și $\rho=r$ apar următoarele tensiuni principale:

$$\sigma_1 = \frac{P}{2\pi} \frac{1-2\nu}{r^2}; \quad \sigma_2 = 0; \quad \sigma_3 = -\frac{P}{2\pi} \frac{1-2\nu}{r^2} \quad (6.12)$$

În originea coordonatelor, adică în punctul de aplicație a forței concentrate, toate tensiunile σ_r , σ_t , σ_z și τ sunt infinite. Relația (6.9) se va folosi pentru determinarea expresiei rezistenței la fisurare K_{Ic} având în vedere faptul că tensiunea circumferențială este cea care conduce la deschiderea fisurii în *modul I*.

În cazul urmei lăstate după identarea Vickers, tensiunea critică de fisurare va fi dată de relația:

$$\sigma_{Ic} = \frac{(1-2\nu)P}{2\pi(2a^2)} \ln \frac{a^2 + c^2}{c^2} \quad (6.13)$$

Astfel, pentru rezistența la fisurare, K_{Ic} , (factorul critic de intensitate al tensiunii în *modul I* de fisurare), se poate utiliza relația:

$$K_{Ic} = \frac{(1-2\nu)P_c}{2\sqrt{2\pi}a^3} \ln \frac{a^2 + c^2}{c^2} \quad (6.14)$$

Ca urmare, principalele mărimi care trebuie avute în vedere sunt: mărimea sarcinii aplicate P_c – *valoarea ei critică*, mărimea semidiagonalei urmei lăstate, a , și lungimea fisurii, c .

Sarcina critică se determină pe baza mai multor încercări și se calculează cu relația:

$$P_c = P_o + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i \quad (6.15)$$

unde P_c este media sarcinilor critice de pătrundere, P_i este valoarea sarcinii critice de pătrundere, N este numărul de încercări iar P_o este valoarea primei sarcini de încercare. Pentru a găsi o valoare cât mai exactă a sarcinii critice de solicitare, numărul de încercări trebuie să fie mai mare de 20.

În literatura de specialitate se consideră că metoda care furnizează cele mai exacte rezultate este metoda fisurării prin oboseală (IF), dacă aceasta se execută cu cea mai desăvârșită acuratețe. Această presupunere se bazează pe absența tensiunilor remanente din apropierea urmei lăstate prin pătrunderea în suprafață. Astfel, această din urmă metodă se ia ca referință pentru următoarele comparații ce vor fi făcute.

În *tabelul 6.3* sunt cuprinse rezultatele obținute prin metoda identării Vickers și calculate cu relația (6.14). Se observă că, rezultatele obținute sunt foarte apropiate de cele obținute prin metoda (IF).

Relațiile, pentru comparația datelor prezentate în tabel, sunt determinate pentru metodele: rezistenței la pătrundere (SM) și metoda fisurării directe (DCM). Aceste relații sunt:

$$\begin{aligned} SM : K_{Ic} &= (0.59 \pm 0.12) \left(\frac{E}{H} \right)^{\frac{1}{8}} \left(\sigma P^{\frac{1}{3}} \right)^{\frac{3}{4}} \\ DCM : K_{Ic} &= (0.016 \pm 0.004) \left(\frac{E}{H} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{P}{c^{\frac{3}{2}}} \right) \end{aligned} \quad (6.16)$$

în care σ este rezistența la pătrundere, E modulul de elasticitate longitudinal și H duritatea Vickers – $H=P/(2a^2)$.

Tab. 6.3

Materiale	P _c [N]	a [μm]	c [μm]	σ _{tc} [MPa]	K _{lc} [MPam ^{1/2}]			
					MF	SM	DCM	IF
Sialon	50,9	41,6	75,2	374	6,06	3,52	3,31	5,12
Duralumina	19,8	25,0	40,4	490	6,15	3,10	2,36	5,83
Alumina (999)	26,5	36,3	66,4	251	3,78	2,36	1,80	4,71
Sticlă S-L	1,37	13,3	25,4	89,5	0,82	0,63	0,34	0,80
Silicon carbid (presat la cald)	21,6	25,1	49,2	376	4,75	3,05	1,83	4,87

6.7.2. Metoda defectului inițial

În cadrul acestei metode se realizează prin indentare (Vickers sau Knoop) un defect inițial pe suprafața plană a unei epruvete ce urmează să fie supusă la încovoiere. După ruperea epruvetei, defectul este identificat și apoi măsurat. Calculul K_{lc} are la bază studiul propagării unei fisuri sub formă eliptică, *figura 6.15*, plecând de la defectul artificial creat prin indentare:

$$K_{lc} = \frac{\sigma_f M \sqrt{\pi a}}{\Phi} \quad (6.17)$$

unde:

- σ_f este tensiunea aplicată;
- a este profunzimea fisurii reprezentând semilungimea axei pe adâncimea elipsei;
- c este semilungimea axei mari a fisurii de la suprafața elipsei;
- M este un factor de corecție care depinde de excentricitatea elipsei și de profunzimea defectului dată prin dimensiunea a .

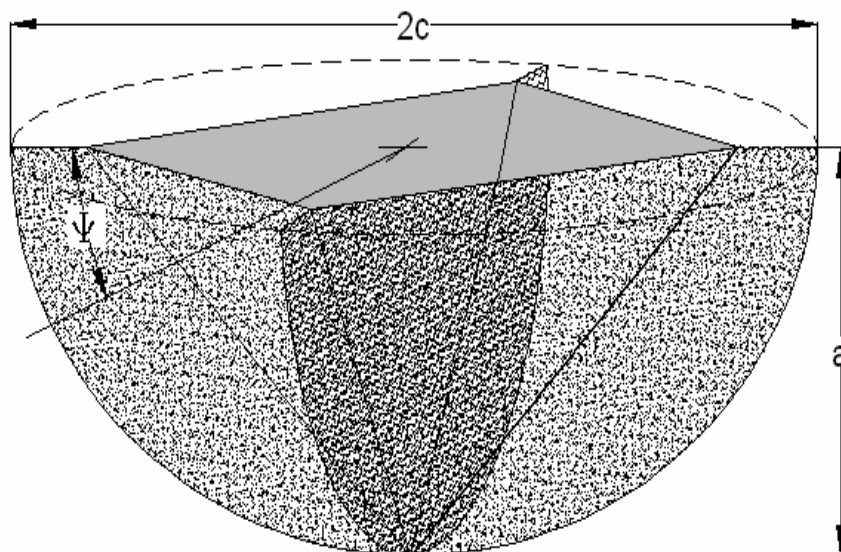


Fig. 6.15 Defect semieliptic introdus prin indentare (Knoop)

Valoarea lui M variază între $1,02 \div 1,2$ în funcție de locul inițial de fisurare: de la vârful penetrării sau de la suprafața probei. Pentru defectele mici se consideră $M \cdot \sqrt{\pi} = 2$ și vom avea:

$$K_{Ic} = \frac{2\sigma_f \sqrt{a}}{\Phi} \quad (6.18)$$

Parametrul Φ este dat de relația:

$$\Phi = \int_0^{\pi/2} \left[\sin^2 \Psi + \frac{a^2}{c^2} (\cos^2 \Psi)^{\frac{1}{2}} \right] d\Psi \quad (6.19)$$

Dificultatea acestei metode, utilizată în vederea determinării K_{Ic} , constă în posibilitatea redusă de măsurare cât mai exactă a defectului introdus prin indentare.