



A XV-a Conferință internațională – multidisciplinară
„Profesorul Dorin Pavel – fondatorul hidroenergeticii românești”
SEBEȘ, 2015

APRECIEREA COMPORTĂRII CONDUCTELOR FISURATE PRIN CRITERIILE MECANICII RUPERII

Pavel TRIPA

ASSESSMENT OF CRACKED PIPES BEHAVIOR BY FRACTURE MECHANICS CRITERIA

The paper presents the methods used to assess the behaviour of cracked pipes subjected to internal pressure by applying the Linear Elastic Fracture Mechanics criteria (LEFM). It is also described an analysis of a cracked steam pipe used in Romanian power plants.

Keywords: fracture mechanics, pipe, fracture toughness, heat resistant steel
Cuvinte cheie: mecanica ruperii, conducte, tenacitate la rupere, oțel termorezistent

1. Criteriile Mecanicii ruperii liniar-elastice (MRLE) aplicate la conducte [1], [2], [3], [4]

Starea de tensiuni ce se dezvoltă sub acțiunea solicitărilor din timpul exploatării conductelor și care se calculează pe baza relațiilor cunoscute din teoria elasticității sunt tensiuni nominale. Acestea sunt acceptate în absența defectelor reale din peretele conductelor.

Cele mai frecvente defecte în peretele conductei sunt: creștăturile, fisurile, amprentele de bacuri, incluziunile. În zonele din vecinătatea defectelor au loc puternice concentrări de tensiune care constituie surse de inițiere și propagare a proceselor de rupere.

Aplicarea criteriilor Mecanicii ruperii în cazul defectelor conductelor necesită adoptarea unor ipoteze simplificatoare.

Ipoteza I. Defectele reale din peretele conductelor se asimilează cu defecte plane de tip fisură, echivalente din punct de vedere al concentrării tensiunilor și deformațiilor. Orice defect de tip fisură se dezvoltă prin Modul I de rupere, ceea ce înseamnă că deplasările punctelor de pe suprafața fisurii se produc sub acțiunea tensiunilor nominale, care sunt normale la planul fisurii.

Ipoteza II. Starea de tensiune și deformație la vârful fisurii din peretele conductei sunt identice cu cele produse de prezența aceluiași fisuri într-o placă plană echivalentă, obținută prin desfășurarea plană a conductei și având aceeași grosime cu a conductei.

Expresia analitică generală a factorului de intensitate a tensiunii K_I pentru o placă finită cu fisură este:

$$K_I = \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot \beta \cdot a} \quad (1)$$

unde:

a – semilungimea fisurii

β – o funcție dependentă de dimensiunile fisurii și ale plăcii

σ – valoarea tensiunii normale în planul fisurii ce soliciță placa (conducta) în zona de amplasare a fisurii și care se determină considerând conducta fără defecte.

Pentru o placă plană cu dimensiune finită b prezentând un defect de tip fisură străpunsă de lungime $2a$ (figura 1), expresia factorului de intensitate al tensiunii K_I este:

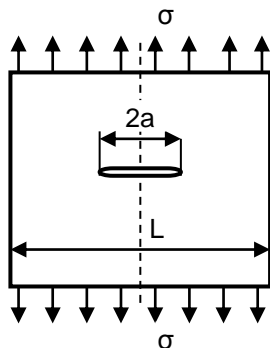


Fig.1 Fisură în placă plană

$$K_I = \sigma \cdot \sqrt{L \cdot \operatorname{tg} \left(\pi \cdot \frac{a}{L} \right)} \quad (2)$$

Cu acest caz se poate asimila fisura circumferențiară străpunsă din peretele conductei.

În cazul conductei sau a plăcii plane echivalente acesteia care conține o fisură eliptică cu axa mare $2a$ și axa mică $2b$ în direcția grosimii h a peretelui (figura 2), factorul de intensitate al tensiunii K_I are expresia:

$$K_I = \frac{\sigma}{\Phi} \cdot \sqrt{\pi \cdot b \cdot (1 - c^2 \cdot \cos^2 \varphi)^{\frac{1}{2}}} \quad (3)$$

unde:

$$c^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2} = 1 - \left(\frac{b}{a}\right)^2 \quad (4)$$

iar Φ este integrala eliptică completă de ordinul al doilea:

$$\Phi^2 = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - c^2 \cdot \sin^2 \varphi} \, d\varphi \quad (5)$$

Pentru o fisură circulară ($a = b$), $\Phi = \pi/2$, iar pentru o elipsă alungită ($b \ll a$), $\Phi = 1$.

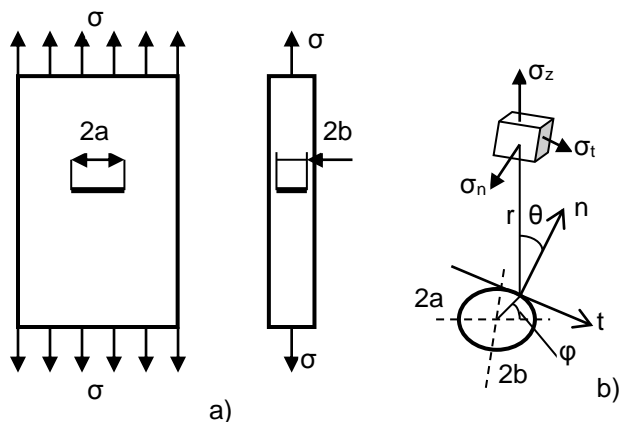


Fig.2 Placă cu fisură eliptică

În tabelul 1 sunt prezentate valorile integralei Φ determinate pentru diferite rapoarte ale semiaxelor elipsei sau semielipsei.

Tabelul 1

b/a	Φ	b/a	Φ
0,00	1,0000	0,50	1,2115
0,05	1,0049	0,55	1,2436
0,10	1,0160	0,60	1,2767
0,15	1,0317	0,65	1,3107
0,20	1,0508	0,70	1,3456
0,25	1,0726	0,75	1,3614
0,30	1,0967	0,80	1,4180
0,33	1,1137	0,85	1,4554
0,35	1,1227	0,90	1,4934
0,40	1,1508	0,95	1,5319
0,45	1,1805	1,00	1,5708

Din relația (3) rezultă că în cazul fisurii eliptice factorul de intensitate a tensiunii este maxim pentru $\varphi = \pi/2$, adică în dreptul semiaxei mici și are valoarea:

$$K_I = \frac{\sigma}{\Phi} \cdot \sqrt{\pi \cdot b} \quad (6)$$

Dacă fisura eliptică este plasată în apropierea unei suprafețe libere a peretelui, factorul maxim de intensitate a tensiunii este în punctul cel mai apropiat A de suprafața liberă (figura 3) și are expresia:

$$K_I = \beta \cdot \frac{\sigma}{\Phi} \cdot \sqrt{\pi \cdot b} \quad (7)$$

unde β este un factor de corecție, supraunitar ce se determină pe cale experimentală. În literatura de specialitate se găsesc diagrame pentru determinarea lui β .

Fig.3. Fisură eliptică în apropierea suprafeței libere

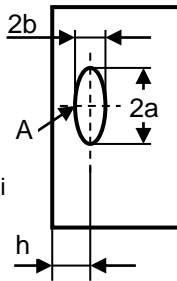
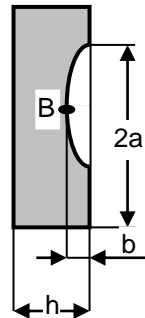


Fig.4 Fisură semieliptică



Dacă fisura este semieliptică pătrunzând dinspre suprafața liberă (axa mare a elipsei este cuprinsă în planul suprafeței libere,

(figura 4) factorul K_I este maxim în punctul B, iar factorul β se determină tot din diagrame.

Pentru cazul unei fisuri circulare în peretele conductei factorul de intensitate a tensiunii se obține din relația (3) care pentru $a = b$ și $\Phi = \pi/2$ devine:

$$K_I = 2 \cdot \sigma \cdot \sqrt{\frac{a}{\pi}} \quad (8)$$

În cazul fisurilor eliptice și semieliptice în zona de îmbinare a unei ramificații, factorul de intensitate al tensiunii, care ține seama și de efectul de plasticitate la nivele de solicitare $\sigma/\sigma_c > 0,4$ are expresia:

$$K_I = \sigma \cdot \sqrt{\frac{1,21 \cdot \pi \cdot b}{Q}} \quad (9)$$

unde:

Q – factor de formă al fisurii și se determină cu relația:

$$Q = \Phi^2 - 0,212 \cdot \left(\frac{\sigma}{\sigma_c} \right)^2 \quad (10)$$

Mărimile tensiunilor efective σ ce intervin în relațiile anterioare se determină cu relațiile:

$$\sigma = \sigma_x \cdot M \quad \text{sau} \quad \sigma = \sigma_\theta \cdot M \quad (11)$$

unde:

$$M = \sqrt{1 + 1,61 \cdot \frac{a^2}{R \cdot h}} \quad (12)$$

este un factor care ține seama de amplificarea tensiunii la vârful fisurii de lungime $2a$ datorită tensiunii radiale σ_x din presiunea interioară maximă p din conductă. În cazul fisurilor nepătrunse se recomandă $M = 1$.

Dacă fisura este situată pe generatoarea țevii (figura 5) atunci la determinarea tensiunii σ , în relația (11) intervine tensiunea circumferențiară σ_θ . Dacă presiunea interioară din conductă este constantă pe toată secțiunea circulară, aceasta se determină cu relația:

$$\sigma_\theta = \frac{p \cdot R}{h} \quad (13)$$

unde:

R – raza mediană a secțiunii transversale a țevii
 h – grosimea peretelui conductei.

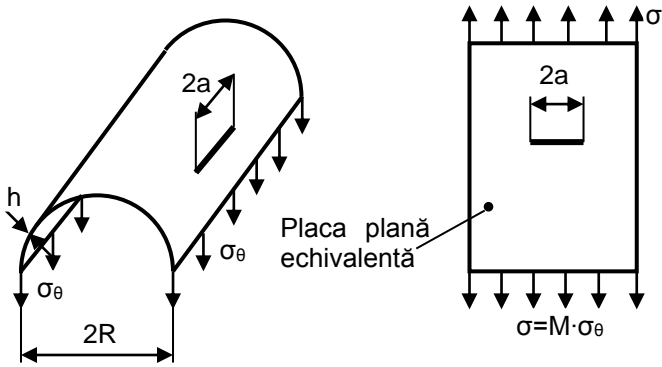


Fig.5 Fisură longitudinală

În cazul unei fisuri circumferențiare de lungime $2a$ (figura 6) la determinarea lui σ intervine tensiunea normală maximă σ_x din secțiunea transversală a conductei în care se găsește fisura respectivă.

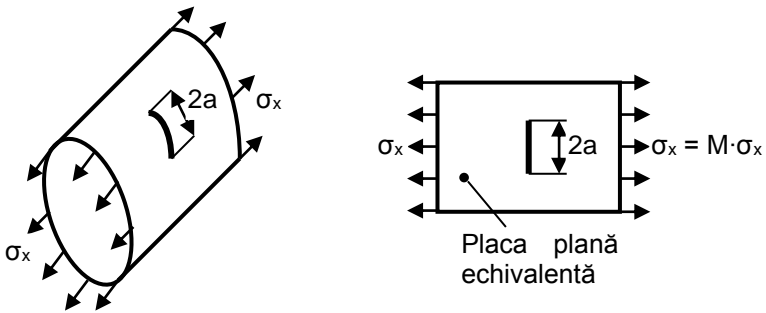


Fig.6 Fisură circumferențială

Condiția de neinițiere a unui proces de propagare instabilă a unei fisuri atunci când starea de tensiune este elastică, stare ce corespunde conductelor din materiale cu rezistență la rupere și limită de curgere ridicate, respectiv caracteristica de tenacitate K_{Ic} mică, este:

$$K_I < K_{Ic} \quad (14)$$

Din egalitatea (14) se determină fie dimensiunea până la care o fisură poate evolua prin propagare stabilă (lentă) denumită și *dimensiunea critică a fisurii* (a_{cr}), fie *tensiunea critică* (σ_{cr}) la inițierea extinderii fisurii.

De exemplu, pentru cazul unei fisuri pătrunse utilizând pentru K_I relația (2) din (14) rezultă:

$$a_{cr} = \frac{L}{\pi} \cdot \operatorname{arctg} \left(\frac{K_{Ic}^2}{\sigma^2 \cdot L} \right) \quad (15)$$

sau

$$\sigma_{cr} = \frac{K_{Ic}}{L \cdot \operatorname{tg} \frac{\pi \cdot a}{L}} \quad (16)$$

În cazul fisurii eliptice sau semieliptice din zona de îmbinare a unei ramificații a conductei, utilizând pentru K_I (rel. 9), din (14) se obține:

$$a_{cr} = \frac{Q}{1,21 \cdot \pi} \cdot \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma} \right)^2 \quad (17)$$

sau

$$\sigma_{cr} = K_{Ic} \cdot \sqrt{\frac{Q}{1,21 \cdot \pi \cdot b}} \quad (18)$$

La stabilirea relațiilor (17), respectiv (18) se admite că $2b < h$ la fisuri eliptice și $b < h$ la fisuri semieliptice și că se păstrează raportul semiaxelor în cursul propagării fisurii.

Criteriul tenacității la rupere K_{Ic} se poate utiliza dacă se îndeplinește condiția:

$$\frac{1}{a} \cdot \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_c} \right)^2 \leq 1,2 \quad (19)$$

Dacă această condiție nu este îndeplinită, atunci pentru comportarea la propagare a unei fisuri, se aplică criteriile care acceptă existența unei enclave plastice la vârful fisurii.

2. Exemplu de calcul [5]

Se consideră o conductă din oțel termorezistent 12H1MF utilizată în centralele termoelectrice românești pentru care la

temperatura de 540 °C se cunoaște: $R_i = 170$ mm, $R_e = 200$ mm, $h = 30$ mm, $R = 185$ mm, $p = 14$ MPa, $K_{Ic} = 4000$ MPa·mm^{1/2}. Conducta are o fisură semieliptică pe generatoare cu $b/a = 1/2$, iar $b = 5$ mm (figura 5).

Urmărind programul de calcul prezentat se obține:

$\sigma_\theta = 86,33$ MPa (rel.13), $\Phi = 1,2115$ (tabelul 1), $M = 1$, $Q = 1,41$ (rel.10), $K_I = 316,88$ MPa·mm^{1/2} (rel. 9), $K_I < K_{Ic}$.

Concluzie: Fisura considerată nu se propagă instabil. De asemenea, $b_{cr} = 796$ mm, respectiv $\sigma_{\theta cr} = 1089$ MPa $\gg \sigma_\theta$. Condiția (19) nu este îndeplinită, ceea ce înseamnă că trebuie aplicate criteriile mecanicii ruperii elasto-plastice.

3. Concluzii

■ Metodologia prezentată se referă la criteriile mecanicii ruperii liniar elastice, cu aplicații strict pentru conductele sau recipientii aflați sub presiune interioară. Materialul conductei pentru care s-a efectuat calculul, provine dintr-o conductă utilizată deja în centrala termoelectrică (30.405 ore funcționare).

■ Exemplul de calcul expus contribuie la o mai bună înțelegere a metodelor de apreciere a comportării conductelor cu defecte (fisuri).

BIBLIOGRAFIE

- [1] Barsom, J.M., Rolfe, S.T., *Fracture and Fatigue. Control in Structures*. New Jersey. 1987, Second Edition.
- [2] Barsom, J.M., Rolfe S.T., ASTM STP 466, 1970.
- [3] Rolfe, S.T., Novak S.R., ASTM STP 463, 1970.
- [4] Barsom, J.M., *Eng. Fract. Mech.*, 7, 1975.
- [5] Tripa, P., *Cercetări asupra tenacității unor oțeluri utilizate la conductele de abur din centralele termoelectrice*. Teză de doctorat, Timișoara, 1997.

Prof. Dr. Ing. Pavel TRIPA
Universitatea Politehnica Timișoara, membru AGIR
e-mail: ptripa@yahoo.com
pavel.tripa@upt.ro