



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

STUDIUL DURABILITĂȚII CONDUCTELOR PE BAZA CONCEPTELOR MECANICII RUPERII

Pavel TRIPA

THE STUDY OF DURABILITY PIPES BASED ON FRACTURE MECHANICS CONCEPTS

The paper describes the lifetime analysis of steam pipes subjected to internal pressure by applying the concepts of Fracture Mechanics of materials. It also presents the durability analysis of a pipeline with semi-elliptical longitudinal crack subjected to internal pressure.

Keywords: pipe internal pressure, crack, durability, ego

Cuvinte cheie: conductă, presiune interioară, fisură, durabilitate, exemplu

1. Calculul la durabilitate al conductelor

Cercetarea experimentală a demonstrat că viteza de propagare a unei fisuri depinde de sarcinile exterioare aplicate, dimensiunile conductei și ale fisurii, de proprietățile fizico-mecanice ale materialului din care sunt confecționate. Toate acestea conduc pentru viteza de propagare a fisurii la o funcție de forma:

$$\frac{da}{dN} = f(\sigma, L, a, p_{f-m}) \quad (1)$$

unde:

a – semilungimea fisurii;

N – numărul de cicluri, considerat ca o funcție continuă.

Dacă zona de la vârful fisurii este în domeniul comportării elastice, sau dacă la vârful fisurii apare o zonă deformată plastic de mărime limitată se propune pentru viteza de propagare a fisurii o relație de tipul [1]:

$$\frac{da}{dN} = C \cdot (\Delta K)^m \quad (2)$$

unde:

ΔK – variația factorului de intensitate al tensiunii la vârful fisurii, care are expresia:

$$\begin{aligned} \Delta K &= K_{\max} - K_{\min} = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) \cdot \sqrt{\beta \cdot \pi \cdot a} = \\ &= \sigma_{\max} \cdot (1 - R) \cdot \sqrt{\beta \cdot \pi \cdot a} \end{aligned} \quad (3)$$

R – coeficientul de asimetrie al ciclurilor de solicitare

C și m – constante de material, care se determină pe cale experimentală.

Pentru oțelurile carbon și slab aliate se recomandă următoarele relații pentru C , respectiv m [1], [2]:

$$\lg C = 0,00483 \cdot \sigma_c - 12,432 \quad (4a)$$

$$m = 4,52 - 0,0026 \cdot \sigma_c \quad (4b)$$

unde:

σ_c – limita de curgere a materialului conductei.

β – un factor de corecție, în general supraunitar, a cărui mărime este dată sub forma unor diagrame.

La o variație relativ mică a factorului de intensitate al tensiunii fisura nu se mai propagă. Fie ΔK_e valoarea maximă a variației factorului de intensitate al tensiunii sub care fisura nu se mai propagă. Având în vedere acest prag, viteza de propagare a fisurii este dată de expresia:

$$\frac{da}{dN} = C \cdot [(\Delta K)^m - (\Delta K_e)^m] \quad (5)$$

Pentru un coeficient de asimetrie al ciclului de solicitare $R = -1$ se admite pentru ΔK_e expresia:

$$\Delta K_{e(R=-1)} = 1,9 \cdot 10^{-4} \cdot E - 0,0165 \cdot \sigma_c \quad (6)$$

unde:

E – modulul de elasticitate al materialului conductei.
Tot pe cale experimentală s-a constatat că variația pragului ΔK_e descreește aproximativ liniar cu creșterea coeficientului de asimetrie, după o relație de forma:

$$\Delta K_{eR} = \Delta K_{e(R=-1)} \cdot \left(\frac{1}{2} - \frac{R}{2} \right) \quad (7)$$

De asemenea, ΔK_{eR} scade cu creșterea temperaturii, ceea ce înseamnă că pentru conducte care funcționează la temperaturi ridicate se poate considera $\Delta K_{eR} = 0$ și astfel se poate folosi relația (2).

Dacă la vârful fisurii se dezvoltă o zonă plastică semnificativă, pentru viteza de propagare a fisurii se poate utiliza relația bazată pe deschiderea la vârful fisurii (DVF), a cărei expresie este:

$$\frac{da}{dN} = A \cdot (\Delta \delta - \Delta \delta_e) \quad (8)$$

unde:

A – constantă de material care se determină pe cale experimentală;

$\Delta \delta$ – variația deschiderii la vârful fisurii pe durata unui ciclu de solicitare;

$\Delta \delta_e$ – variația maximă a deschiderii la vârful fisurii la care fisura nu se propagă (dezvoltă).

În cazul existenței unei zone plastice limitate DVF se poate înlocui cu factorul de intensitate al tensiunii, pe baza relației dintre aceste caracteristici:

$$\delta = \frac{K_I^2}{E \cdot \sigma_c} \quad (9)$$

În general, la solicitările variabile ale conductelor enclava plastică de la vârful fisurii are o valoare relativ mică, ceea ce permite utilizarea relațiilor (2), respectiv (5) pentru determinarea vitezei de propagare a fisurii. Pentru conductele care funcționează la temperaturi ridicate este recomandat a se utiliza relația (2) [2].

Viteza de propagare a unei fisuri trebuie să fie mai mică sau cel mult egală cu o valoare admisibilă a cărei mărime este stabilită în funcție de durata de funcționare prevăzută la proiectarea conductei.

Durabilitatea conductelor se calculează la solicitări variabile în prezența unor fisuri (defecte), admise ca posibile în materialul conductei, sau apărute în timpul funcționării acestora.

Durabilitatea, care se exprimă prin numărul de cicluri de funcționare, pentru un anumit tip de ciclu de solicitare și fisură rezultă prin integrarea relației (2) sau (5) între limitele a_0 (dimensiunea inițială a fisurii) și a_{cr} (dimensiunea critică a fisurii). Astfel, integrând relația (2) se obține:

$$N = \frac{2 \cdot \left(\sqrt{a_{cr}^{2-m}} - \sqrt{a_0^{2-m}} \right)}{(2-m) \cdot C \cdot \sigma_{\max}^m \cdot (1-R)^m \cdot \sqrt{(\beta \cdot \pi)^m}} \quad (10)$$

Pentru conductele obișnuite se poate considera $\beta = 1$, iar dimensiunea critică a fisurii a_{cr} se determină cu relația [2], [3]:

$$a_{cr} = \frac{K_{lc}^2}{\pi \cdot \sigma_{\max}^2} \quad (11)$$

În cazul fisurilor semieliptice, frecvent întâlnite în cazul conductelor, cu semiaxa mică b pe direcția grosimii peretelui, durabilitatea se poate determina cu relația [1], [4]:

$$N = \frac{2 \cdot \left(\sqrt{b_{cr}^{2-m}} - \sqrt{b_0^{2-m}} \right) \cdot \sqrt{Q^m}}{(2-m) \cdot C \cdot \sigma_{\max}^m \cdot (1-R)^m \cdot \sqrt{(1,21 \cdot \pi)^m}} \quad (12)$$

unde:

Q - are expresia [2], [3]:

$$Q = \Phi^2 - 0,212 \cdot \left(\frac{\sigma}{\sigma_c} \right)^2 \quad (13)$$

În acest caz, dimensiunea critică a fisurii este [1]:

$$b_{cr} = \frac{K_{lc}^2 \cdot Q}{1,21 \cdot \pi \cdot \sigma_{\max}^2} \quad (14)$$

Cunoscând acum numărul de cicluri în unitatea de timp (oră, lună, an etc.) și având numărul de cicluri până la atingerea dimensiunii critice se poate calcula durata de viață a conductei analizate.

Dacă pe durata funcționării conductei solicitările variabile prezintă cicluri de solicitare diferite, trebuie aplicate criteriile liniare de degradare cumulativă.

2. Exemplu de calcul la durabilitate a unei conducte

Se consideră o conductă din oțel X41CrMoV5.1 supusă la presiunea interioară $p_i = 14$ MPa, cu $R_i = 170$ mm, $R_e = 200$ mm, $h = 30$ mm, și care prezintă o fisură longitudinală semieliptică la interior cu $b = 5$ mm și $a = 10$ mm. Pentru materialul conductei $\sigma_c = 1570$ MPa, $K_{Ic} = 1370$ MPa·mm^{1/2}. Coeficientul de asimetrie al ciclurilor de solicitare este $R = 0,3$. Fisura longitudinală de la interior este deschisă de tensiunea circumferențială σ_θ :

$$\sigma_\theta = \frac{R_i^2 + R_e^2}{R_e^2 - R_i^2} \cdot p_i = 86,9 \text{ MPa} \quad (15)$$

a) Durabilitatea pe grosimea peretelui conductei

Urmărind programul de calcul prezentat se obține:

$\Phi = 1,2115$ (Tabelul 1 [3]), $Q = 1,456$ (rel.13), $b_{cr} = 95,25$ mm $> h = 30$ mm (rel.14). Rezultă că și dacă se străpunge întregul perete, fisura nu atinge dimensiunea critică. Dar, odată străpuns peretele conductei, conducta devine periculoasă datorită pierderii lichidului din interior. Din acest motiv calculul la durabilitate se face pentru situația străpungerii peretelui conductei, adică pentru $b_{cr} = 30$ mm.

S-au obținut constantele: $C = 1,41 \cdot 10^{-5}$ (rel. 4a), respectiv $m = 0,438$ (rel. 4b).

Înlocuind valorile intermediare obținute în relația (12) se obține durabilitatea pentru conducta cercetată:

$$N_{b_{cr}} = \frac{2 \cdot \left(\sqrt{30^{2-0,438}} - \sqrt{10^{2-0,438}} \right) \cdot \sqrt{1,456^{0,438}}}{(2 - 0,438) \cdot 1,41 \cdot 10^{-5} \cdot 86,9^{0,438} \cdot (1 - 0,3)^{0,438} \cdot \sqrt{(1,21 \cdot \pi)^{0,438}}} =$$

$$= 143.244 \text{ cicluri} \quad (16)$$

b) Durabilitatea pentru dimensiunea longitudinală a fisurii

Dimensiunea critică a fisurii pe această direcție este $a_{cr} = 79$ mm (rel. 11). Dacă pe parcursul dezvoltării fisurii se păstrează raportul $b/a = 1/2$, rezultă că fisura străbate peretele conductei înainte de

atingerea lui $a_{cr} = 79$ mm. În aceste condiții se impune a se efectua calculul la durabilitate pe această direcție considerând $a_{cr} = 2 \cdot h = 2 \cdot 30 = 60$ mm.

Durabilitatea pentru atingerea acestei dimensiuni critice (rel. 10) conduce la următorul rezultat:

$$N_{a_{cr}} = \frac{2 \cdot (\sqrt{60^{2-0,438}} - \sqrt{10^{2-0,438}})}{(2 - 0,438) \cdot 1,41 \cdot 10^{-5} \cdot 86,9^{0,438} \cdot (1 - 0,3)^{0,438} \cdot \sqrt{(1 \cdot \pi)^{0,438}}} \approx \quad (17)$$

$$\approx 215.000 \text{ cicluri}$$

Se constată că

$$N_{b_{cr}} < N_{a_{cr}} \quad (18)$$

4. Concluzii

■ Durabilitatea conductei cercetate este impusă de dezvoltarea fisurii pe direcție radială, adică pe direcția de străpungere a peretelui.

■ Exemplul de calcul expus contribuie la o mai bună înțelegere a metodelor de calcul a durabilității conductelor cu defecte (fisuri), aplicând conceptele mecanicii ruperii materialelor.

■ Cunoscând acum numărul de cicluri până la atingerea dimensiunii critice, respectiv numărul de cicluri în unitatea de timp din timpul funcționării, se poate calcula durata de funcționare a conductei.

BIBLIOGRAFIE

- [1] Barsom, J.M., Rolfe, S.T., *Fracture and Fatigue. Control in Structures*. New Jersey. 1987, Second Edition.
- [2] Newby, J.R., *Fatigue Crack Propagation*. Metals Handbook, Ninth Edition, Vol. 8, Mechanical Testing, Ohio, 1985.
- [3] Tripa, P., *Aprecierea conductelor fisurate prin criteriile mecanicii ruperii*. A XV-a Conferință internațională multidisciplinară "Profesorul Dorin Pavel – fondatorul hidroenergeticii românești", Sebeș, 5 - 6 iunie 2015.
- [4] 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