

УДК 539.4:536.543

ВИЗНАЧЕННЯ ПЕРІОДУ ДОКРИТИЧНОГО РОСТУ ТРІЩИНИ ПОВЗУЧОСТІ В ПАРОПРОВОДІ

О. Є. АНДРЕЙКІВ¹, Н. Б. САС²

¹ Львівський національний університет ім. Івана Франка;

² Львівський національний університет ветеринарної медицини і біотехнологій
ім. С. З. Гжицького

На основі енергетичного підходу і методу еквівалентних площ побудована методика для визначення залишкового ресурсу труби паропроводу з тріщиною. Задовільна для інженерних розрахунків точність цієї методики підтверджена результатами точнішого числового методу Рунге–Кутти.

Ключові слова: паропровід, залишковий ресурс, високотемпературна повзучість, коефіцієнт інтенсивності напружень, тріщина високотемпературної повзучості.

Відомо [1–5], що втрата міцності і вичерпання ресурсу металевих елементів конструкцій за довготривалих статичних навантажень і високих температур відбувається через зародження і докритичний ріст тріщин, особливо, коли такі дефекти вже наявні в матеріалі конструкції. Для того, щоб передбачити і відвернути руйнування, профілактично оглядають і діагностують відповідальні (несучі) елементи. При цьому виявляють дефекти типу тріщин різних розмірів. Тому дуже важливо визначити період їх докритичного росту залежно від розмірів і геометрії розміщення. Щоб запобігти катастрофічному руйнуванню конструкції, оцінюють період докритичного росту тріщини, який повинен бути більший від часу між профілактичними оглядами. Якщо він менший, тоді ремонтують або замінюють елемент конструкції.

Нижче визначено залишковий ресурс (період докритичного росту тріщини) елементів енергетичних установок, зокрема труби паропроводу.

Формулювання задачі та її розрахункова модель. Розглянемо задачу про визначення залишкового ресурсу труби внутрішнього радіуса r товщини h_1 за дії довготривалого статичного тиску p і високої температури. Вважаємо, що на внутрішній стінці труби вздовж твірної розміщена поверхнева півеліптична тріщина з півосями a_0 і b_0 площею S_0 (рис. 1). В умовах дії зовнішніх чинників, за яких реалізується явище високотемпературної повзучості в зоні передруйнування біля фронту тріщини, вона може поширюватися до втрати герметичності труби.

Задача полягає у визначенні часу $t = t^*$, коли площа тріщини S внаслідок високотемпературної повзучості підросте до критичного розміру $S = S^*$, тобто $b(t^*) = h_1$ і труба розгерметизується.

Щоб розв'язати таку задачу, на основі отриманих раніше результатів [3–5] побудуємо математичну модель для опису кінетики поширення тріщини високотемпературної повзучості в трубі і визначення періоду її докритичного росту $t = t^*$.

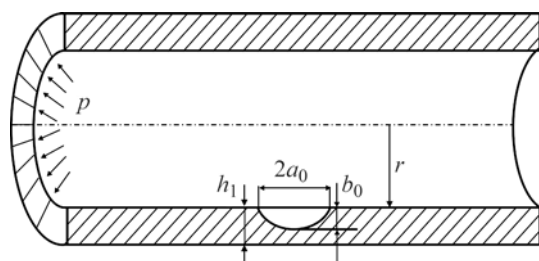


Рис. 1. Схема навантаження труби з півеліптичною тріщиною.

Fig. 1. Scheme of pipe loading with a semi-elliptic crack.

Для опису докритичного росту тріщини високотемпературної повзучості отримаємо таке диференційне рівняння:

$$\frac{dS}{dt} = 2\alpha_0 A_1 \left[\frac{K_I}{K_{IC}} \right]^{2m} \left[1 - \frac{K_I^2}{K_{IC}^2} \right]^{-1}. \quad (1)$$

Тут α_0 , A_1 , m , K_{IC} – константи матеріалу, які визначають із експерименту [3–5]; K_I – коефіцієнт інтенсивності напружень (КІН). Для повноти математичної моделі до рівняння (1) додамо початкову і кінцеві умови:

$$t = 0, \quad S(0) = S_0; \quad t = t_*, \quad S(t_*) = S_*; \quad b(t_*) = h_1. \quad (2)$$

Аналогічно, як це зроблено раніше [6] для втомних тріщин, рівняння (1) для плоских тріщин у тривимірному тілі зводимо до рівняння в частинних похідних

$$\partial \rho / \partial t = f(\lambda) \left(1 + \rho^{-2} (\partial \rho / \partial \varphi)^2 \right)^{1/2} \quad (3)$$

за початкових і кінцевих умов

$$t = 0, \quad \rho(0, \varphi_0) = \rho_0; \quad t = t_*, \quad \rho(t_*, \varphi_*) = \rho_*, \quad K_{I*}(\rho_*, \varphi_*) = K_{IC}. \quad (4)$$

Таким чином, період докритичного росту тріщин високотемпературної повзучості визначаємо на основі співвідношень (3)–(4).

Визначення періоду докритичного росту тріщини методом еквівалентних площ. Щоб встановити залишковий ресурс труби (час до розгерметизації), застосуємо метод еквівалентних площ [5]: зміна площі рухомої тріщини розглядуваної конфігурації, наближено така, як для півкругової тріщини радіуса a такої ж площі. Це значно спрощує розрахунки і, як встановлено раніше [5], забезпечить достатню точність. Оскільки товщина стінки труби h_1 набагато менша від її внутрішнього радіуса r ($r \gg h$), то таку трубу з тріщиною за внутрішнього тиску p моделюватимемо пластиною товщини h_1 з поверхневою тріщиною, яка розтягується рівномірно розподіленими напруженнями $\sigma = r h_1^{-1} p$.

На основі цього та результатів [5] рівняння (3) набуде вигляду

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{2\alpha_0 A_1}{h_1} \left[\frac{K_I}{K_{IC}} \right]^{2m} \left[1 - \frac{K_I^2}{K_{IC}^2} \right]^{-1}, \quad (5)$$

де

$$\varepsilon = a/h_1; \quad K_I = 0,7 p r h_1^{-1} \sqrt{\pi h_1 \varepsilon} (1 + 0,32 \varepsilon^2) (1,04 + 0,23 \varepsilon^2 - 0,11 \varepsilon^4) \quad (6)$$

за початкових і кінцевих умов

$$t = 0, \quad \varepsilon(0) = \varepsilon_0; \quad t = t_*, \quad \varepsilon(t_*) = 1. \quad (7)$$

Підставляючи вираз (6) в рівняння (5) і інтегруючи за умов (7), отримаємо розв'язок у такому вигляді

$$t_* = \frac{h_1}{2\alpha_0 A_1} \int_{\varepsilon_0}^1 \left[\frac{K_I}{K_{IC}} \right]^{-2m} \left[1 - \frac{K_I^2}{K_{IC}^2} \right] d\varepsilon. \quad (8)$$

Таким чином, для відомих характеристик матеріалу A_1 , α_0 , m період докритичного росту тріщин високотемпературної повзучості визначають на основі співвідношення (8). Величини A_1 , α_0 , m для матеріалу труби паропроводу визначаємо на основі результатів експериментальних досліджень [7] і побудованої кінетичної діаграми зміни швидкості росту тріщин високотемпературної повзучості на різних ділянках зварного з'єднання паропроводу зі сталі 15X1M1Ф, зокрема для основного матеріалу (рис. 2).

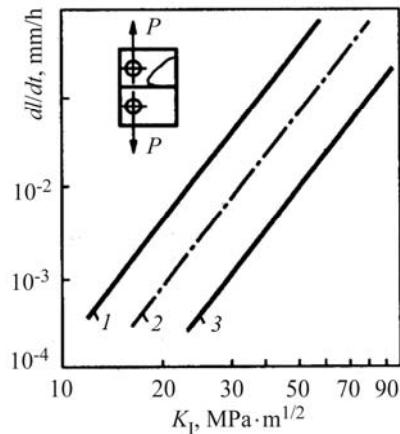


Рис. 2. Fig. 2.

Рис. 2. Кінетична діаграма зміни швидкості росту тріщин високотемпературної повзучості у зварному з'єднанні зі сталі 15X1M1Ф: 1 – зона термічного впливу; 2 – матеріал шва; 3 – основний матеріал.

Fig. 2. Kinetic diagram of the change of high-temperature creep crack growth rate in the welded joint of 15X1M1Ф steel: 1 – heat-affected zone; 2 – weld material; 3 – base material.

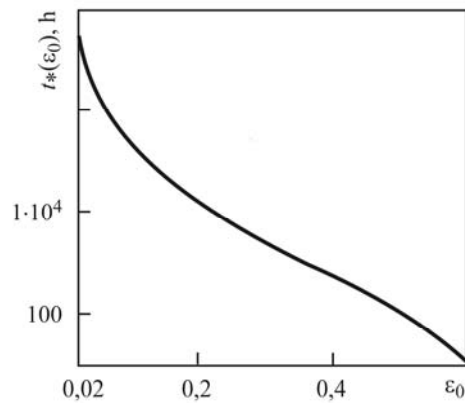


Рис. 3. Fig. 3.

Рис. 3. Залежність залишкового ресурсу труби t_* від початкової площі тріщини ε_0 .

Fig. 3. Dependence of residual life time of pipe t_* on ε_0 .

Як бачимо найшвидше тріщина високотемпературної повзучості поширюється в зоні термічного впливу (крива 1, рис. 2). Це означає, що тут найменший опір поширенню таких тріщин і зварне з'єднання паропроводу руйнуватиметься в цій зоні. Тому, щоб оцінити його залишковий ресурс, характеристики матеріалу K_{IC} , α_0 , A_1 , m необхідно брати для цієї зони. У зв'язку з цим порівнюємо аналітичну залежність швидкості поширення тріщини високотемпературної повзучості [3–5]

$$V = \alpha_0 A_1 (K_I K_{IC}^{-1})^{2m} / (1 - K_I K_{IC}^{-1}) \quad (9)$$

з відповідною графічною залежністю (крива 3, рис. 2), отриманою експериментальним шляхом [7]. У результаті цього порівняння і використання методу найменших квадратів отримаємо:

$$K_{IC} = 529 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}, \quad 2\alpha_0 A_1 = 1,7 \cdot 10^4, \quad m = 2, 3. \quad (10)$$

Разом з тим розраховуватимемо для конкретного паропроводу з параметрами [7] $r_1 = 162$ mm; $h_1 = 60$ mm; $p = 24,5$ МПа; $a_0 = 16$ mm; $b_0 = 9$ mm, де a_0, b_0 – початкові значення відповідно a, b .

На рис. 3 графічно відтворена залежність (8) залишкового ресурсу труби t_* від початкової ε_0 площі тріщини.

Визначення періоду докритичного росту тріщини методом Рунге–Кутти.

Щоб встановити залишковий ресурс труби (час до розгерметизації), застосуємо точніший, порівняно з методом еквівалентних площ, метод Рунге–Кутти. Таким чином, коли тріщина півеліптична, рівняння (3) запишемо на основі праці [5] у вигляді системи диференціальних рівнянь:

$$\frac{da}{dt} = 2\alpha_0 A_1 \left[\frac{K_{IA}}{K_{IC}} \right]^{2m} \left[1 - \frac{K_{IA}^2}{K_{IC}^2} \right]^{-1}, \quad \frac{db}{dt} = 2\alpha_0 A_1 \left[\frac{K_{IB}}{K_{IC}} \right]^{2m} \left[1 - \frac{K_{IB}^2}{K_{IC}^2} \right]^{-1} \quad (11)$$

за початкових і кінцевих умов

$$t = 0, \quad a(0) = a_0, \quad b(0) = b_0; \quad t = t_*, \quad a(t_*) = h, \quad b(t_*) = h. \quad (12)$$

Тут, як відомо [8], КІН для півеліптичної тріщини в пластині можна подати так:

$$K_{IA} = prh_1^{-1} \sqrt{\pi b} (M/\Phi) L; \quad K_{IB} = prh_1^{-1} \sqrt{\pi b} (M/\Phi), \quad (13)$$

де $M = (1,13 - 0,09\alpha) + \left(-0,54 + \frac{0,89}{0,2 + \alpha} \right) \beta^2 + \left(0,5 - \frac{1}{0,65 + \alpha} + 14(1 - \alpha)^{2,4} \right) \beta^4$,
 $\Phi^2 = 1 + 1,464\alpha^{1,65}$, $L = (1,1 + 0,35\beta^2) \sqrt{\alpha}$, $\alpha = b/a$, $\beta = b/h_1$.

Підставляючи КІН (13) у систему (11) і розв'язуючи її методом Рунге–Кутти за умов (12), отримаємо розв'язок у вигляді графічної залежності (рис. 4).

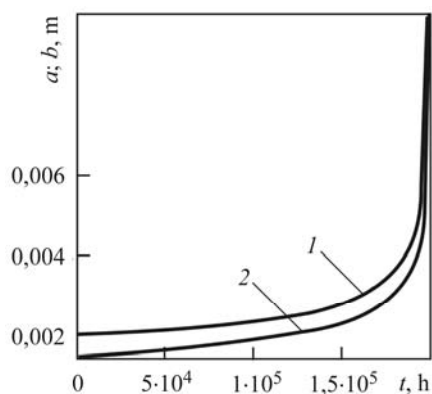


Рис. 4. Fig. 4.

Рис. 4. Залежність великої a (1) та малої b (2) осей півеліптичної тріщини від часу навантаження t .

Fig. 4. Dependence of large a (1) and small b (2) axes of a semi-elliptic crack on loading time t .

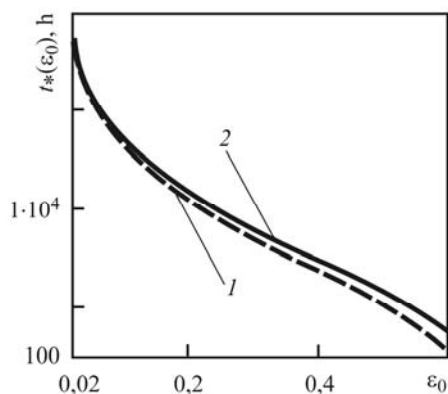


Рис. 5. Fig. 5.

Рис. 5. Залежність залишкового ресурсу труби t_* від безрозмірної початкової площі тріщини ε_0 : 1 – метод еквівалентних площ; 2 – метод Рунге–Кутти.

Fig. 5. Dependence of pipe residual life time t_* on the dimensionless value of the initial crack area ε_0 : 1 – method of equivalent areas; 2 – Runge–Kutta method.

Наведено (рис. 5) порівняння результатів, отриманих точнішим методом Рунге–Кутти та наближеним методом еквівалентних площ за поширення еліптичної тріщини високотемпературної повзучості в трубі.

Як бачимо, метод еквівалентних площ, який є досить простий у застосуванні, дає достатню для інженерної практики точність.

ВИСНОВКИ

Побудована математична модель для визначення залишкового ресурсу паропроводу. На її основі залишковий ресурс паропроводу для реального матеріалу і умов навантаження встановлений наближеним методом еквівалентних площ і точнішим числовим методом Рунге–Кутти. Із графічного порівняння отриманих розв'язків випливає, що досить простий для інженерного застосування метод еквівалентних площ дає достатню точність, а отримана при цьому похибка іде в запас довговічності паропроводу.

РЕЗЮМЕ. На основе энергетического подхода и метода эквивалентных площадей построена методика для определения остаточного ресурса трубы паропровода с трещиной. Удовлетворительная для инженерных расчетов точность этой методики подтверждена результатами более точного числового метода Рунге–Кутты.

SUMMARY. On the basis of energy approach and the method of equivalent areas the method is built for determination of the residual life time of steam pipeline pipes with a crack. Satisfactory exactness of this method for the engineering calculations is confirmed by the results of the more exact numerical Runge–Kutta method.

1. *Garofalo F.* Fundamentals of creep and creep-rupture in metals. – New York–London: Mac Millan Company, 1970. – 343 p.
2. *Taira S., Ohtani R., and Kitamura T.* Application of J-integral to high-temperature crack propagation. P. I: Creep crack growth // J. of Engng and Mater. Technol. – 1979. – **101**. – P. 154–161.
3. *Андрейків О. Є., Сас Н. Б.* Механіка руйнування металічних пластин при високотемпературній повзучості // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2006. – **42**, № 2. – С. 62–68.
(*Andreikiv O. E. and Sas N. B.* Fracture mechanics of metallic plates under the conditions of high-temperature creep // Materials Science. – 2006. – **42**, № 2. – P. 210–219.)
4. *Андрейків О. Є., Сас Н. Б.* Міцність тонкостінних елементів конструкцій з тріщинами під час повзучості // Там же. – 2007. – **43**, № 2. – С. 33–39.
(*Andreikiv O. E. and Sas N. B.* Strength of thin-walled structural elements with cracks under the conditions of creep // Materials Science. – 2007. – **43**, № 2. – P. 174–182.)
5. *Андрейків О. Є., Сас Н. Б.* Докритичний ріст плоскої тріщини в тривимірному тілі за високотемпературної повзучості // Там же. – 2008. – **44**, № 2. – С. 19–26.
(*Andreikiv O. E. and Sas N. B.* Subcritical growth of a plane crack in a three-dimensional body under the conditions of high-temperature creep // Materials Science. – 2008. – **44**, № 2. – P. 163–174.)
6. *Андрейків А. Е., Дарчук А. И.* Усталостное разрушение и долговечность конструкций. – К.: Наук. думка, 1992. – 184 с.
7. *Хромченко Ф. А.* Ресурс сварных соединений паропроводов. – М.: Машиностроение, 2002. – 352 с.
8. *Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений* / Под. ред. Ю. Мураками. – М.: Мир, 1990. – Т. 1; 2. – 1016 с.

Одержано 25.12.2012